

Research Article



DOI: 10.22034/ijche.2021.277386.1099



DOR: 20.1001.1.17355400.1401.21.120.2.2



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

## Investigating of Operational Parameters on the Performance of Membrane Electro bio Reactor System for Synthetic Wastewater Treatment

L. Karimi<sup>1</sup>, H. Hazrati<sup>2,3\*</sup>, H. Shokrkar<sup>4</sup>

1- M. Sc. Student of Chemical Engineering, Sahand University of Technology

2- Associate Professor of Chemical Engineering, Sahand University of Technology

3- Environmental Engineering Research Center, Sahand University of Technology

4- Assistant Professor of Chemical Engineering, Sahand University of Technology

Email: h.hazrati@sut.ac.ir

### Abstract

*In this study, the effect of the electrocoagulation process on the performance of the membrane bioreactor system was investigated using a laboratory setup and synthetic wastewater. First, the reactor without electric current, then in four different modes including anode and cathode (AI), the distance between anode and cathode (3.5, 2.5 cm), electric field (2.5, 1.5 Volts), and continuous or alternating current applications (one min on, 4 min off) were evaluated. Recent research shows that all of these factors affect membrane flow flux, activated sludge properties, and soluble microbial products (SMP) and extracellular polymeric substances (EPS) concentrations. The results showed that for EMBR reactor (voltage 1.5 V, the distance between anode and cathode 2.5 cm and application of intermittent current (one min on, 4 min off), better performance in reducing membrane fouling, reducing SMP and EPS. So that the membrane fouling rate, EPS, and SMP were reduced by 57%, 59%, and 58%, respectively. Also, the COD removal was 75% for the MBR reactor and 99% for the EMBR.*

Received: 17 March 2021

Accepted: 4 September 2021

Page Number: 21-34

### Keywords:

Wastewater Treatment,  
Membrane Bioreactor,  
Fouling Reduction,  
Combination Processes,  
Electric Field

### Please Cite this Article Using:

Karimi, L., Hazrati, H., Shokrkar, H., "Investigating of Operational Parameters on the Performance of Membrane Electro bio Reactor System for Synthetic Wastewater Treatment", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 21, No. 120, pp. 21-34, In Persian, (2022).



## بررسی پارامترهای عملیاتی بر روی عملکرد سیستم الکتروراکتور زیستی غشایی برای تصفیه پساب سنتزی

لیلا کریمی<sup>۱</sup>، حسین حضرتی<sup>۲\*</sup>، هانیه شکرکار<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۳- مرکز تحقیقات مهندسی محیط زیست، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۴- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

پیام نگار: [h.hazrati@sut.ac.ir](mailto:h.hazrati@sut.ac.ir)

### چکیده

در این مطالعه تأثیر فرایند انعقاد الکتریکی بر روی عملکرد سیستم راکتور زیستی غشایی با استفاده از یک ستاپ آزمایشگاهی و پساب سنتزی بررسی شد. در ابتدا راکتور بدون جریان الکتریکی، سپس در چهار حالت مختلف فاصله بین آند و کاتد (۳/۵ و ۲/۵ سانتی-متر)، میدان الکتریکی (۲/۵ و ۱/۵ ولت) و اعمال جریان به صورت پیوسته یا متناوب (یک دقیقه روشن، ۴ دقیقه خاموش) ارزیابی شد. نتایج تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که همه این عوامل بر روی شار عبوری از غشا، خصوصیات لجن فعال و میزان EPS و SMP تأثیرگذار هستند. نتایج نشان داد که راکتور EMBR در ولتاژ ۱/۵ V، فاصله بین آند و کاتد ۲/۵ cm و اعمال جریان منقطع (یک دقیقه روشن، ۴ دقیقه خاموش) عملکرد بهتری در کاهش گرفتگی غشا و کاهش محصولات میکروبی محلول و مواد پلیمری خارج سلولی دارد، به طوری که میزان گرفتگی غشا و EPS و SMP به ترتیب به میزان ۵۷٪، ۵۹٪ و ۵۸٪ کاهش یافت. همچنین میزان حذف COD برای MBR ۷۵٪ و برای EMBR ۹۹٪ به دست آمد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۳

شماره صفحات: ۲۱ تا ۳۴

### کلیدواژه‌ها:

تصفیه پساب، راکتورهای زیستی غشایی، کاهش گرفتگی، سیستم‌های ترکیبی، میدان الکتریکی

\* تبریز، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، گروه مهندسی شیمی

### استناد به مقاله:

کریمی، ل.، حضرتی ح.، شکرکار، ه.، "بررسی پارامترهای عملیاتی بر روی عملکرد سیستم الکترو راکتور زیستی غشایی برای تصفیه پساب سنتزی"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیست و یکم، شماره ۱۲۰، صص. ۳۴-۲۱، (۱۴۰۱).

## ۱. مقدمه

یکی از جدیدترین روش‌های تصفیهٔ پساب شهری و صنعتی فناوری راکتور زیستی غشایی<sup>۱</sup> (MBR) است که به صورت تجاری و صنعتی در کشورهای پیشرفته و در حال توسعه به کار می‌رود و روز به روز در حال پیشرفت و گسترش است. با وجود عملکرد مطلوب این روش، گرفتگی منافذ غشاها از موانع اصلی بر سر راه گسترش این فناوری است [۱]. به تازگی ترکیب فرایندهای الکتروشیمیایی با راکتور زیستی غشایی مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است؛ زیرا ظرفیت بالایی در حذف گرفتگی دارد. روش الکتروشیمیایی شامل سازوکار انعقاد الکتریکی، الکتروفورز و الکترواسمزی است که به کاهش و تخریب آلاینده‌ها کمک می‌کند. انعقاد الکتریکی سازوکار اصلی در سیستم الکتوراکتور زیستی غشایی<sup>۲</sup> (EMBR) است که باعث حذف ترکیبات آلی از پساب می‌شود. انعقاد الکتریکی شامل تولید منعقدکننده از انحلال الکتروشیمیایی آندهای (معمولاً آهن یا آلومینیوم) غوطه‌ور شده در راکتور زیستی است که بسته به pH محلول، انواع مختلف ذرات فلزی تولید می‌شود که منجر به بی‌ثبات شدن آلاینده‌ها و تجمع ذرات معلق و بارگذاری و جذب آلاینده‌های محلول می‌شود. در روش الکتروفورز، ولتاژ اعمال شده باعث می‌شود که در ذرات لجن و پلیمرهای ترشح شده بار الکتریکی منفی القا شود؛ بنابراین با ایجاد دافعه بین این ذرات و کاتد (دارای بار منفی)، ذرات به سمت الکتروود آند حرکت کرده، از غشا دور می‌شوند. در روش الکترو اسمزی آب مرطوبی که در لایه‌های میکروبی جمع می‌شود، کاهش پیدا می‌کند و لجن ته‌نشین می‌شود که از این راه میزان گرفتگی غشا را بهبود می‌بخشند [۲]. ملک<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ تصفیهٔ آب میدان نفتی با نمک بالا را با استفاده از یک EMBR و آب سنتز شده بررسی کردند. آزمایش‌ها با استفاده از دو الکتروود استیل و آلومینیوم در چگالی جریان و زمان‌های ماند هیدرولیکی<sup>۴</sup> (HRT) متفاوت انجام شد. تحقیقات با استفاده از الکترودهای آلومینیوم و غشای غوطه‌ور و غلظت روغن ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر انجام شد. نتایج نشان داد که الکتروود آلومینیوم عملکرد بهتری در حذف

اکسیژن‌خواهی شیمیایی<sup>۵</sup> (COD) و کدورت داشت. مقادیر بازده حذف COD و روغن و گریس به ترتیب از ۹۱٪ به ۹۷٪ و ۸۰٪ به ۹۵٪ افزایش یافتند [۳]. اونا<sup>۶</sup> و همکاران تأثیر مواد الکتروودی آهن و تیتانیوم را بر روی میزان نفوذپذیری غشا و مشخصات لایهٔ کیک در ولتاژهای ۱۵ و ۳۰۷ و بدون میدان الکتریکی بررسی کردند. نتایج نشان داد که شار نفوذی از غشا در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه و ولتاژ ۳۰۷ برای آهن به ترتیب ۴۷/۳۰ و ۸۲ h<sup>۷</sup> L/m<sup>۲</sup> و برای تیتانیوم ۴۲،۳۰ و ۷۰ h<sup>۷</sup> L/m<sup>۲</sup> بود [۴]. در تحقیق دیگری که مانیسا<sup>۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۰ انجام دادند تأثیر فرایند انعقاد الکتریکی در یک زمان ماند میکروبی<sup>۹</sup> (SRT) طولانی در یک سیستم EMBR و ۳ دورهٔ آزمایشی (چگالی جریان‌های ۰، ۵ و ۱۵ A/m<sup>۲</sup>) با استفاده از یک پساب سنتزی بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از چگالی جریان ۵ A/m<sup>۲</sup> باعث بهبود قابل توجه عملکرد غشا و حذف COD و فسفر به ترتیب به میزان ۹۵٪ و ۹۹٪ می‌شود [۵]. سو<sup>۱۰</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۰ یک EMBR برای بررسی عملکرد فرایند انعقاد الکتریکی طراحی کردند. در طول ۳۹ روز بهره‌برداری بهبود چشمگیری در میزان حذف فسفر (۹۹٪) و COD (۸۵٪) مشاهده شد. هم‌چنین نتایج نشان داد که میدان EC موجب افزایش تخلخل و کاهش ضخامت لایهٔ کیک به دلیل افزایش اندازهٔ فلاک‌ها و کاهش گرفتگی می‌شود [۶]. بنی‌ملحم و الکتورویژ<sup>۱۱</sup> با استفاده از یک میدان جریان مستقیم و متناوب ۱۷/cm در یک سیستم راکتور زیستی غشایی، میزان گرفتگی غشا را در حدود ۱۶/۳٪ نسبت به سیستم MBR متعارف کاهش دادند [۷]. تفتی<sup>۱۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ اثر چگالی جریان در محدودهٔ ۵-۲۳ A/m<sup>۲</sup> در راکتور زیستی غشایی را مطالعه و حالت‌های مختلف قرارگیری در معرض جریان را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش چگالی جریان، میزان محصولات میکروبی محلول<sup>۱۲</sup> (SMP) کاهش و اندازهٔ فلاک‌ها درشت‌تر می‌شود؛ در نتیجه میزان گرفتگی غشا کاهش می‌یابد [۸]. حسن<sup>۱۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۴ یک راکتور زیستی غشایی با چگالی جریان متناوب

5. Chemical Oxygen Demand  
6. unal  
7. Manica  
8. Solid Retention Time  
9. Su  
10. Bani\_Melhem and Elektorowicz  
11. Tafti  
12. Soluble Microbial Product  
13. Hasan

1. Membrane Bioreactor  
2. Electro Membrane Bioreactor  
3. Malack  
4. Hydraulic Retention Time

راه‌اندازی  $16 A/m^2$  و نشان دادند که میزان راندمان حذف نیترژن، فسفر و COD به ترتیب ۹۹٪، ۹۹٪ و ۹۲٪ است [۹]. فرایند الکتروشیمیایی در راکتور زیستی غشایی قادر به تخریب و کاهش باندهای پلیمرهای خارج سلولی (EPS) موجود در لجن فعال است. در این مطالعه، در ابتدا برای پیدا کردن مقدار ولتاژ مناسب در EMBR آزمایش‌هایی انجام شد و عملکرد EMBR در ولتاژهای مختلف ارزیابی و ولتاژهای مناسب تعیین شد. سپس گرفتگی غشای EMBR در چهار حالت و در شرایط و ساختارهای متفاوت فرایند شامل: تغییر فاصله بین آند و کاتد، تغییر نحوه اعمال جریان و تغییرات ولتاژ با راکتور شاهد مقایسه شد. علاوه بر این تأثیر فرایندهای الکتروشیمیایی بر روی میزان SMP و EPS و تأثیر آن‌ها بر روی گرفتگی غشا، بررسی شد که تاکنون در تحقیقات قبلی تأثیر همه این عوامل با هم بررسی نشده است. غلظت پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدهای موجود در EPS و SMP لجن فعال در داخل راکتور زیستی اندازه‌گیری شد. هم‌چنین شار اولیه آب خالص و میزان شار خروجی از غشا پس از شست‌وشوی شیمیایی و فیزیکی برای تعیین میزان گرفتگی‌های برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر اندازه‌گیری شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

یک سامانه در مقیاس آزمایشگاهی مطابق شکل (۱) طراحی شد. سیستم EMBR غوطه‌ور مورد استفاده در این تحقیق، شامل یک

مخزن تصفیه زیستی هوایی از جنس پلکسی گلاس، با ابعاد (۳۵×۱۰×۱۰cm)، مخزن خوراک، پمپ خلأ (مدل VP-1/5 AG شرکت آذین ساخت کشور چین)، پمپ مایعات پریستالتیک رایت، برند YW fluid و یک ارلن خلأ است. همه اجزای اشاره شده بر روی یک چارچوب فلزی قرار گرفته‌اند. در این سیستم خوراک تحت نیروی هیدرولیکی پمپ به مخزن هوادهی تزریق می‌شود. از پمپ خلأ برای ایجاد مکش در فشار ۰/۱۲ بار استفاده می‌شود. در داخل راکتور زیستی دو قطعه آند و کاتد به فاصله مشخص از هم در روبه‌روی غشا قرار گرفتند. آند و کاتد از جنس آلومینیوم با ابعاد (۵×۱cm) و ضخامت ۲ میلی‌متر انتخاب شد. در این سیستم غشا به‌صورت معلق در درون راکتور زیستی قرار داده می‌شود که به‌وسیله پمپ خلأ مکش ایجاد می‌شود و پالایش انجام می‌گیرد. پارامترهای راه‌اندازی سیستم راکتور زیستی غشایی در جدول (۱) آورده شده است. هم‌چنین در این تحقیق از ترازوی دیجیتال kern PFB300-3، با دقت ۰/۰۰۱ گرم برای توزین مواد، pH متر HANNA instrument-HI2211 برای تنظیم pH، سانتریفیوژ Gerber برای جداسازی جامد از محلول، آون BINDER برای خشک‌کردن، ترموراکتور Merck-TR 620 برای حرارت‌دادن، کوره AZAR furnace-VTM-25L-1500 برای خشک‌کردن، دستگاه آنالیز توزیع اندازه ذرات مدل Bettersizer S2-LS سازنده شرکت Bettersizer کشور چین و اسپکتروفوتومتر طیفی Hanon UV-Vis spectrophotometeri3 برای تعیین غلظت مواد محلول، استفاده شد.

### جدول ۱. پارامترهای راه‌اندازی سیستم‌های راکتور زیستی غشایی.

Table 1. Operational Parameters for MBR systems.

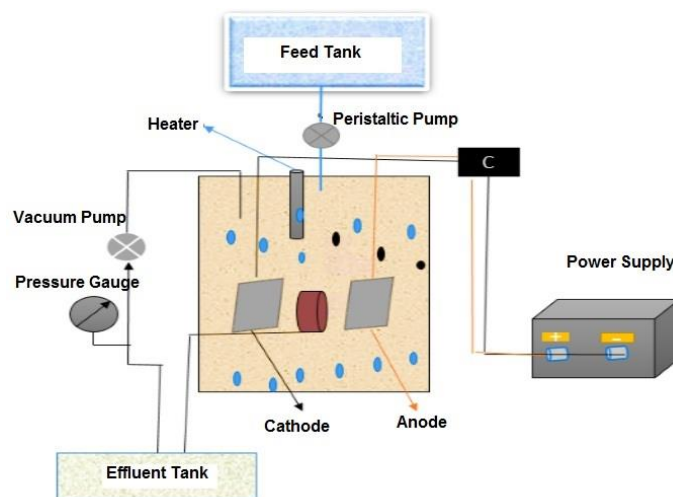
Operational condition for MBR and EMBR	unit	Amount
$Q_{air}$	L/min	2.5
pH	-	6.5-8
Mixed Liquor Suspended Solid/MLSS	mg/L	1200-3400
Mixed Liquor Vapour Suspended Solid / MLVSS	mg/L	1000-2700
Hydraulic Retention Time / HRT	h	5
Solid Retention Time / SRT	day	10
Bioreactor Volume	L	2
Chemical Oxygen Demanded / $COD_{feed}$	mg/L	650
Trans Membrane Pressure / TMP	bar	0.12

زمان ماند لجن برای همه حالات ثابت بود. میزان تخلیه لجن طوری تنظیم شده بود که SRT حدود ۱۰ روز باشد.

### ۱-۲ مشخصات پساب ورودی و لجن استفاده شده

لجن مورد استفاده در راکتور از کارخانه پگاه تبریز با MLSS در حدود  $2400 \text{ mg/L}$  تهیه شد و سپس به منظور رشد ریزاندامها در لجن به مدت دو هفته با پساب سنتزی که در جدول (۳) آمده است خوراک دهی شد تا با محیط راکتور زیستی سازگار شود. هم چنین همه مواد مورد استفاده از جنس مرک انتخاب شدند.

در ابتدا و قبل از شروع آزمایشهای اصلی، آزمایشهایی برای پیدا کردن مقدار ولتاژ بهینه در EMBR انجام شد و عملکرد EMBR در ولتاژهای  $2/5$  و  $1/5$  ولت ( $0/25$  و  $0/15$  آمپر بر مترمربع) ارزیابی شد. انتخاب مقدار ولتاژ اعمال شده بر اساس مطالعات قبلی [۱۰، ۱۱] و هم چنین با در نظر گرفتن حجم مایع درون راکتور زیستی و مساحت سطح تیغه های آند و کاتد مورد استفاده، انجام شد. نتایج نشان داد که EMBR در حضور ولتاژ  $1/5$  ولت عملکرد بهتری دارد. به جز مرحله اول که در ولتاژ  $2/5$  ولت انجام گرفت، بقیه مراحل در ولتاژ  $1/5$  ولت انجام شد. هر یک از این مراحل در جدول (۲) توضیح داده شده است. هم چنین



شکل ۱. شماتیک سیستم EMBR.

Figure. 1. Schematics of EMBR setup.

جدول ۲. شرایط عملیاتی برای حالت های راکتور زیستی غشایی.

Table 2. Operational conditions for MBR Runs.

Reactor	Applied voltage ( $\text{Vcm}^{-1}$ )	Electrode distance (cm)	Current applied modes
MBR	-	-	-
Run 1	2.5	3.5	1min ON 4min OFF
Run 2	1.5	3.5	continues
Run 3	1.5	3.5	1min ON 4min OFF
Run 4	1.5	2.5	1min ON 4min OFF

## ۲-۲ مشخصات غشا و مدول

در این تحقیق از غشای PVDF با اندازه منافذ ۰/۰۴ میکرومتر و سطح مفید ۱۲/۵ سانتی مترمربع که از شرکت سپنتا شریف تهران تهیه شده بود، استفاده شد.

### جدول ۳. مشخصات پساب سنتزی.

Table 3. Synthetic wastewater components.

synthetic wastewater components	Amount (g/L)
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH (40%)	0.75
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.035
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.045
Urea	0.56
MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0.013
CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	0.007
FeCl <sub>3</sub>	0.005
ZnSO <sub>4</sub>	0.003
NaHCO <sub>3</sub>	0.75
EDTA	0.015

## ۳-۲ روش‌های انجام آنالیز

مقادیر COD، MLSS و MLVSS در MBR مطابق با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد [۱۲، ۱۳]. مقادیر پروتئین در SMP و EPS با استفاده از روش فولین تخمین زده شد. در حالی که جز پلی سارکارید SMP و EPS با روش فنول و اسید سولفوریک تعیین شد [۱۴، ۱۵]. اندازه ذرات لجن در پایان هر فرایند با استفاده از ۵۰ میلی‌لیتر از مخلوط داخل راکتور زیستی در محدوده ۱۰۰۰-۰/۰۱ میکرومتر تعیین شد. شار آب خالص با استفاده از سامانه انتهایی اندازه‌گیری شد [۱۶].

## ۴-۲ شار آب خالص

مقدار شار آب خالص غشا با استفاده از سامانه انتهایی اندازه‌گیری شد. بدین منظور، غشا داخل مدول قرار گرفت و مخزن با آب مقطر پر شد. پس از رسیدن به حالت پایا، مقدار آب عبور داده شده از غشا اندازه‌گیری شد، که این شار J<sub>0</sub> نامیده می‌شود. سپس در سامانه، راکتور زیستی غشایی قرار گرفت و فرایند برای ده روز بدون توقف

ادامه یافت. در ادامه، مدول از سامانه جدا و به سامانه اندازه‌گیری شار آب خالص متصل شد. تا مقدار شار آن پس از گرفتگی اندازه‌گیری شود، پس از جداسازی غشا از مدول، ابتدا لایه کیک سطح غشا با آب مقطر به مدت ۵ دقیقه شست‌وشو داده شد (J<sub>1</sub>) سپس برای شست‌وشوی شیمیایی غشاها و ارزیابی گرفتگی آن‌ها بعد از اتمام فرایند از محلول هیپوکلریت سدیم برای کنترل رشد مواد آلی و برای جلوگیری از رسوب مواد غیر آلی به درون غشا از سیتریک اسید به کار رفت و شار پس از این شست‌وشو J<sub>2</sub> نامیده شد. در پایان پس از انجام عمل شست‌وشوی شیمیایی، شار عبوری غشای پاک‌شده با عنوان J<sub>3</sub> اندازه‌گیری شد.

با توجه به این که رابطه مستقیمی بین سازوکار گرفتگی و کاهش شار عبوری برقرار است، مدول مقاومت‌های سری<sup>۱</sup> ساده‌ترین روش برای پیش‌بینی شار عبوری است. شار عبوری از میان این کیک و غشا با استفاده از قانون دارسی به صورت معادله (۱) تعریف شده است [۱۷].

$$J_p = \frac{1}{A_M} \times \frac{dV_p}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_c + R_p + R')}, [L/(m^2 \cdot h)] \quad (1)$$

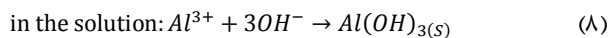
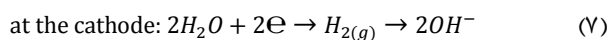
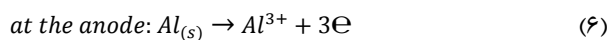
$\Delta P$  اختلاف فشار دو طرف غشا (TMP) [bar]،  $A_M$  سطح مفید غشا [m<sup>2</sup>]،  $V_p$  حجم جریان عبوری [L]،  $t$  زمان عملیات [h]،  $\mu$  گرانروی دینامیکی سیال عبوری [Pa.s]،  $R_c$  مقاومت لایه کیک [1/m]،  $R_m$  مقاومت ذاتی غشا [1/m]،  $R_p$  مقاومت ناشی از گرفتگی حفره غشا [1/m] و  $R'$  مقاومت برگشت‌ناپذیر [1/m] است. به این دلیل که در آزمون پالایش از آب خالص استفاده شده است مقاومت پلاریزاسیون غلظتی در محاسبات وارد نمی‌شود. مقدار هر مقاومت با روش بیان شده در مطالعات قبلی نویسندگان به دست آمد [۲۰].

## ۵-۲ بررسی مقاومت غشاها در مقابل گرفتگی

با داشتن مقادیر J<sub>0</sub>، J<sub>1</sub>، J<sub>2</sub> و J<sub>3</sub> میزان گرفتگی کلی (TFR)، برگشت‌پذیر (RFR)، برگشت‌ناپذیر (IFR) و درصد بازیابی از راه معادلات (۲) تا (۵) حساب شد [۱۲، ۱۹].

1. Rosistance in Series Modol
2. Total Membrane Fouling
3. Reversible Membrane Fouling
4. Irreversible Membrane Fouling

سطح ذرات لجن و بسپارهای ترشح شده بار الکتریکی منفی القا می‌شود و با فرار دادن کاتد (دارای بار منفی) در نزدیکی سطح غشا، نیروی دافعه بین ذرات کلئیدی و کاتد بیشتر شده، به سمت الکتروود روبه‌رو حرکت می‌کنند و از غشا دور می‌شوند (سازوکار الکتروفورز). همچنین افزایش شار به اثر پدیده انعقاد الکتریکی - که سازوکار اصلی در EMBR است - نسبت داده می‌شود. بنابراین هنگام اعمال میدان الکتریکی مونومرها و پلیمرهای کاتیونی  $Al^{3+}$  و  $Al(OH)_2^+$  طبق معادلات (۶) تا (۸) تولید می‌شوند، ذرات لجن و کلئیدها که دارای بار منفی هستند روی سطح این ذرات می‌نشینند و رسوب می‌یابند و میزان گرفتگی غشا کاهش می‌یابد. سازوکار دیگری که باعث افزایش شار عبوری از غشا در راکتور EMBR می‌شود، سازوکار الکترواسمزی است که باعث می‌شود آب مرطوبی که در لایه‌های میکروبی جمع شده کاهش پیدا کند؛ در نتیجه مقاومت خاصی در لجن در برابر پالایش به وجود می‌آید و از سطح غشا دور می‌شوند و میزان گرفتگی کاهش پیدا می‌کند [۲۰]. آکاماتسو<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۰ دریافتند که با اعمال میدان الکتریکی ۴ و ۶ ولت بر سانتی‌متر در راکتور زیستی غشایی میزان شار ثابت عبوری از غشا به ترتیب به ۰/۵ و ۰/۷ مترمکعب بر مترمربع در روز می‌رسد در حالی که بدون اعمال میدان الکتریکی به ۰/۲ مترمکعب بر مترمربع در روز رسیده بود [۲۱].



در حالت کلی از نظر مقایسه بین حالت‌های انجام شده می‌توان گفت که با کاهش ولتاژ از ۲/۵ ولت به ۱/۵ ولت میزان شار عبوری از غشا افزایش یافت؛ زیرا با افزایش ولتاژ غلظت یون‌های فلزی در داخل محلول بیشتر شد که این عامل خود باعث شکسته شدن فلاک‌های میکروبی و کاهش اندازه ذرات می‌شود و گرفتگی غشا افزایش می‌یابد، همچنین جریان بیش از حد منجر به اتلاف انرژی به صورت گرما در داخل راکتور می‌شود.

<sup>1</sup> Akamatsu

$$TFR = \frac{J_0 - J_1}{J_0} \quad (2)$$

$$RFR = \frac{J_2 - J_1}{J_0} \quad (3)$$

$$IFR = \frac{J_0 - J_2}{J_0} \quad (4)$$

$$FR = \frac{J_2}{J_0} \quad (5)$$

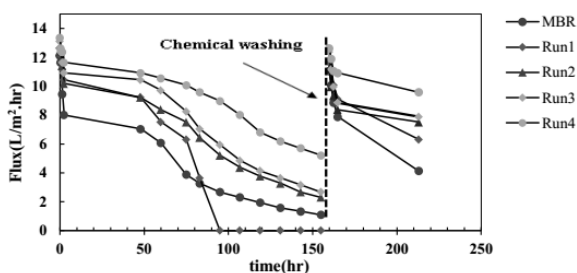
### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱- شار عبوری از غشا

میزان شار عبوری از غشا برای راکتور MBR و EMBR در شکل (۲) نشان داده شده است. زمان ماند لجن برای همه راکتورها ثابت بوده است؛ چون گرفتگی غشاها زودتر رخ می‌داد. شار برای همه راکتورها در ۲۰۰ ساعت (حدوداً ۹ روز پایانی) گزارش شده است. در حالت نخست، میزان شار عبوری از غشا، در راکتور EMBR که در آن ولتاژ ۲/۵ ولت اعمال شده بود تا روز سوم از راکتور MBR که هیچ ولتاژی اعمال نشده بود، بیشتر بود؛ اما از روز چهارم به بعد غشای موجود در راکتور EMBR کاملاً گرفته شد و میزان شار عبوری از آن به صفر رسید. همچنین ضخامت لایه کیک که روی غشای EMBR تشکیل شده بود، بیشتر از MBR بود. در این شرایط مشاهده شد که با اعمال ولتاژ بالا در EMBR، آند به سرعت دچار خوردگی می‌شود و ذرات فلزی که هنگام انحلال الکتریکی از سطح آند جدا می‌شوند افزایش یافته، این ذرات به سطح غشا می‌رسند و باعث افزایش گرفتگی می‌شوند. بنابراین اعمال ولتاژ بالا در راکتور زیستی، ابتدا موجب افزایش فلاکس عبوری شده است؛ اما پس از مدتی باعث می‌شود که منافذ غشا کاملاً گرفته شوند و حتی بعد از شست‌وشوی شیمیایی هم میزان شار عبوری از غشای EMBR کمتر از MBR بود که نشان می‌دهد گرفتگی برگشت‌ناپذیر برای غشای EMBR افزایش پیدا کرده است.

میزان شار عبوری برای غشا، در راکتور EMBR نسبت به راکتور MBR، در حالت دوم ۳۸٪، در حالت سوم ۴۶٪ و در حالت چهارم ۵۷٪، بیشتر شد. بدون اعمال میدان الکتریکی شار نفوذی از غشا به شدت با زمان کاهش یافت که این پدیده در فرایندهای تصفیه غشا همیشه مشاهده می‌شود و دلیل آن گرفتگی با ذرات لجن فعال است. ولی با اعمال میدان الکتریکی در راکتور زیستی غشایی در

EMBR نسبت به MBR، در حالت اول تا چهارم به ترتیب ۳۹٪، ۴۳٪، ۴۹٪ و ۵۹٪ کاهش پیدا کرد. لیو<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲ نشان دادند که با اعمال میدان الکتریکی ۰/۱۲، ۰/۳۶ و ۰/۷۳ ولت بر سانتی متر در EMBR، میزان EPS نسبت به MBR، به ترتیب ۲۲٪، ۳۵٪ و ۴۵٪ کاهش می‌یابد [۲۴].



شکل ۲. شار عبوری از غشا برای راکتور MBR و EMBR.

Figure 2. Flux passing through membranes for MBR and EMBR.

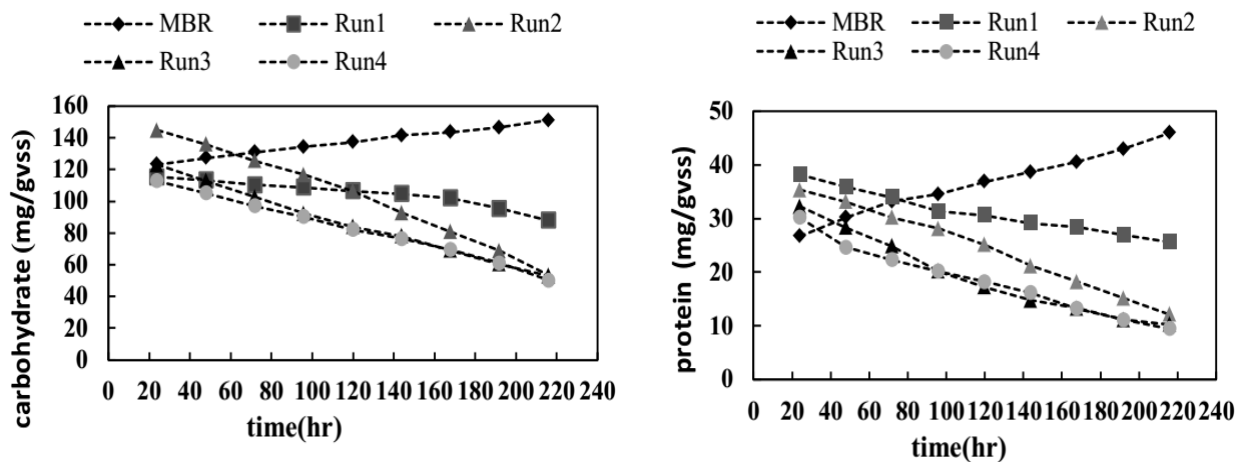
دلیل کاهش EPS در EMBR را می‌توان چنین تحلیل کرد که تعدادی ذرات فلزی ( $Al^{3+}$  و  $Al(OH)_3$ ) هنگام انحلال الکتریکی از سطح آند جدا می‌شوند که ذرات لجن و کلونیدها روی آن‌ها می‌نشینند و رسوب می‌کنند. در واقع این ذرات به‌عنوان جاذب در سیستم عمل می‌کنند. با توجه به این که سلول به‌وسیله این یون‌ها می‌تواند به‌صورت جذب سطحی بر روی آن‌ها تجمع یابد؛ لذا انتظار می‌رود که میزان EPS کمتری را تولید کند. در تحقیقات دیگر هم نشان داده شده است که وجود جاذب در سیستم می‌تواند، EPS را کاهش دهد [۲۶]. از طرف دیگر SMP ها می‌توانند در جاذب جذب شوند؛ لذا می‌توان گفت وجود این ذرات که به‌عنوان جاذب عمل می‌کنند در راکتور EMBR موجب می‌شوند که مقادیر EPS و SMP نسبت به راکتور MBR کم شود و نیز با گذشت زمان کاهش یابد. مقادیر متوسط SMP برای راکتور شاهد و چهار حالت مختلف، به ترتیب ۷۱، ۴۳، ۳۷، ۳۰ و ۲۵ mg/l است. هم‌چنین دلیل کاهش SMP می‌تواند این باشد که وجود ذرات فلزی به‌عنوان جاذب در مایع مخلوط باعث جذب مولکول‌های SMP با وزن مولکولی بالا می‌شود و باعث ساخت فلاک‌های بزرگ بیومس متصل به جاذب می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که پدیده انعقاد الکتریکی سازوکار اصلی در EMBR است [۲۳، ۲۴].

در حالتی که فاصله بین آند و کاتد از ۳/۵ سانتی‌متر به ۲/۵ سانتی‌متر در حالت چهارم کاهش یافت، میزان شار عبوری از راکتور نسبت به حالت‌های دیگر افزایش پیدا کرد؛ چون ذرات لجن فعال دارای بار منفی هستند و هرچه میدان قوی‌تری در داخل راکتور ایجاد شود باری که در سطح این ذرات ایجاد می‌شود، بیشتر خواهد شد که با نزدیک‌تر شدن آند و کاتد به یکدیگر، میدان الکتریکی در داخل راکتور قوی‌تر خواهد شد و باعث می‌شود که نیروی دافعه میان ذرات کلونیدی و کاتد (دارای بار منفی) بیشتر شود و به‌سمت الکتروود روبه‌رو حرکت کنند و از غشا دور شوند (سازوکار الکتروفورز) [۲]. هم‌چنین در حالتی که جریان به‌صورت منقطع به راکتور زیستی اعمال شد نسبت به حالتی که جریان به‌صورت پیوسته اعمال شده بود میزان شار عبوری از غشا افزایش پیدا کرد؛ زیرا با اعمال جریان پیوسته در داخل راکتور باکتری‌ها مدت زمان بیشتری در معرض جریان الکتریکی قرار می‌گیرند و به عملکرد آن‌ها آسیب وارد می‌شود. بنابراین مدت زمان قرار گرفتن در معرض جریان هم مهم است؛ چون زمان و شدت جریان می‌توانند بر جامعه باکتریایی تأثیر چشمگیری بگذارند، بنابراین این پارامترها باید بهینه شود.

## ۲-۲ EPS و SMP

چانگ و همکاران برای نخستین بار اهمیت وضعیت زیست‌شناسی میکروبی در متابولیسم غشا را بررسی کردند و به این نتیجه دست یافتند که بسپارهای زیستی تولیدشده با ریزاندام‌ها مانند SMP و EPS یکی از فاکتورهای اصلی در گرفتگی غشا MBR هستند [۲۲]. در این تحقیق هر سه روز یک بار میزان پروتئین و پلی‌ساکاریدهای موجود در EPS لجن فعال در هر حالت اندازه‌گیری شد. میزان کربوهیدرات و پروتئین در راکتور MBR در طی مدت زمان پالایش افزایش پیدا کرد، در حالی که در راکتور EMBR در طی مدت زمان پالایش بسیار کاهش پیدا کرد [۲۳، ۲۴، ۲۵]. در شکل (۳) میزان کربوهیدرات و پروتئین موجود در EPS برای چهار حالت نشان داده شده است. میزان کربوهیدرات در راکتور EMBR نسبت به MBR، در حالت اول تا چهارم به ترتیب ۳۱٪، ۳۵٪، ۴۲٪ و ۵۸٪ کاهش پیدا کرد. هم‌چنین میزان پروتئین EPS در راکتور EMBR نسبت به MBR، در حالت اول تا چهارم به ترتیب ۳۹٪، ۴۳٪، ۴۹٪ و ۵۹٪ کم شد. هم‌چنین میزان پروتئین EPS در راکتور





شکل ۳. غلظت کربوهیدرات و پروتئین EPS برای راکتور MBR و EMBR.  
 Figure 3. Protein and polysaccharides concentrations in EPS for MBR and EMBR.

میزان MLSS تغییرات چشمگیری نداشته است. لذا می توان گفت اگر هم گران روی مخلوط متفاوت بوده است مربوط به MLSS نیست و به ترکیبات دیگر مانند SMP مربوط است [۲۷]. از سویی دیگر پلیس<sup>۳</sup> و همکاران [۲۸] نیز رابطه گران روی با غلظت MLSS مختلف را به دست آورد و در پایان نشان داد که گران روی به MLSS وابسته نیست. اما با این حال گزارش شده است که در MLSS خیلی بالاتر، گران روی با آن رابطه مستقیم دارد؛ اما از یک حد معین کمتر، رابطه ای باهم ندارند. بنابراین می توان گفت چون MLSS در هر چهار حالت مقدار زیادی نیست و هم چنین تفاوت چشمگیری باهم ندارند، پس نمی توان کاهش گرفتگی غشا را به این پارامتر مرتبط دانست.

### ۳-۳ غلظت جامدات مایع مخلوط

MLSS<sup>۱</sup>، غلظت جامدات معلق در مایع مخلوط لجن درون راکتور است. غلظت MLSS یکی از عوامل گرفتگی است. در این مطالعه تغییرات غلظت MLSS و MLVSS<sup>۲</sup> برای راکتور MBR و EMBR در جدول (۴) گزارش شده است. با توجه به این که تغییرات در MLSS در اثر تغییر پارامترهای دیگر حاصل شده است، به صورت مستقیم نمی توان تغییرات MLSS را با گرفتگی غشا بیان کرد؛ اما در حالت کلی نشان می دهد که برای حالت اول MLSS افزایش بیشتری داشته است که در نتیجه خوردگی زیاد است. از طرف دیگر MLSS زمانی گرفتگی غشا را تحت تأثیر قرار می دهد که اختلاف غلظت MLSS بین چند حالت زیاد باشد، در حالی که در این کار

### جدول ۴. متوسط غلظت MLSS و MLVSS در مایع مخلوط.

Table 4. Average of MLSS and MLVSS concentration in mixed liquor.

	شاهد (MBR)	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4
MLSS (mg/L)	1244	2357	1432	1676	1989
MLVSS (mg/L)	1023	1700	1189	1279	1553

1. Mixed Liquor Suspended Solids

2. Mixed Liquor Vapour Suspended Solids

3. Pollice

### ۳-۴ بررسی مقاومت غشاها در مقابل گرفتگی

مقاومت در مقابل جریان شامل مقاومت ذاتی غشا ( $R_m$ )<sup>۱</sup>، مقاومت لایه کیک ( $R_c$ )<sup>۲</sup>، مقاومت ناشی از گرفتگی حفره‌های غشا ( $R_p$ )<sup>۳</sup> و مقاومت برگشت‌ناپذیر ( $R'$ )<sup>۴</sup> است. در بیشتر موارد عامل مهم گرفتگی غشا مقاومت لایه کیک است [۲۹]. مقاومتی را که لایه کیک ایجاد می‌کند، می‌توان با شست‌وشوی فیزیکی برطرف کرد؛ اما مقاومت منافذ نشان‌دهنده گرفتگی حفره‌های غشاست و در مواردی که این گرفتگی قابل حذف باشد باید به شست‌وشوی شیمیایی روی آورد، وگرنه غشا باید تعویض شود. در این تحقیق اندازه‌گیری مقاومت‌ها در پایان هر دوره انجام شد و نتایج آن در جدول (۴) برای هر حالت قابل مشاهده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت لایه کیک بیشترین مقدار را داشته است. جدول (۵) نشان می‌دهد که مقاومت برگشت‌ناپذیر و مقاومت لایه کیک ( $R'$ ،  $R_c$ ) در سیستم EMBR کمتر از MBR است و برای حالت چهارم مقاومت لایه کیک ( $0.32/0.81$ ) و مقاومت برگشت‌ناپذیر ( $0.16/0.60$ ) نسبت به حالت‌های دیگر کمترین بوده است. نتایج نشان می‌دهد که اعمال جریان الکتریکی باعث کاهش سرعت تشکیل ژل و افزایش شار روی سطح غشا می‌شود. مقاومت برگشت‌ناپذیر که به دلیل تشکیل لایه ژل روی سطح غشاست باعث مسدود شدن حفره‌های غشا می‌شود [۲۵]. دلیل کاهش مقاومت در راکتور EMBR این است که به سبب میدان ایجادشده در EMBR، مونومرها و پلیمرهای کاتیونی تولید می‌شوند که باعث جذب EPS و SMP و کاهش آن در مایع مخلوط می‌شوند. هم‌چنین باعث بهبود یافتن برگشت ذرات از سطح غشا به محیط سیال می‌شوند و مقاومت لایه کیک را کاهش می‌دهند. لیو و همکاران در سال ۲۰۱۳ دریافتند که با اعمال میدان الکتریکی  $0.2$  ولت بر سانتی‌متر میزان مقاومت کلی در EMBR به

$0.37(10^{-13} m^{-1})$  می‌رسد در حالی که میزان مقاومت کلی در MBR  $1/15(10^{-13} m^{-1})$  رسیده بود [۳۰].

### ۳-۵ بررسی انواع گرفتگی‌ها در سطح غشا

میزان گرفتگی کلی (TFR)، برگشت‌پذیر (RFR)، برگشت‌ناپذیر (IFR) و درصد بازیابی برای غشاها در هر دو راکتور MBR و EMBR حساب شد که نتایج آن در شکل (۴) نشان داده شده است. سهم گرفتگی برگشت‌ناپذیر از  $9\%$  در فرایند MBR به  $3/64\%$  در فرایند EMBR در حالت چهارم کاهش یافته است. گزارش شده است که گرفتگی برگشت‌ناپذیر، به دلیل جذب مواد آلی محلول و حلال‌ها در منافذ است که منجر به تشکیل لایه ژل بر روی سطح غشا می‌شود. چون لایه ژل از کلونیدها و بیوفیلم تشکیل شده، این نوع گرفتگی مقاوم است و با شست‌وشوی شیمیایی به‌طور جزئی از بین می‌رود [۳۱]. نیز میزان گرفتگی برگشت‌پذیر از  $82\%$  در سیستم MBR به  $72/73\%$  در سیستم EMBR در حالت چهارم کاهش یافته است. گرفتگی برگشت‌پذیر ناشی از فلاک‌های لجن فعال و ذرات بزرگ روی سطح غشاست. گرفتگی برگشت‌پذیر به‌آسانی با شست‌وشوی فیزیکی رفع می‌شود [۳۲]. شکل (۵) هم‌چنین نشان می‌دهد که درصد بازیابی برای غشا بعد از شست‌وشوی فیزیکی و شیمیایی در راکتور MBR  $91\%$  و برای راکتور EMBR در حالت اول تا چهارم به ترتیب  $68/27\%$ ،  $90/2\%$ ،  $93/52\%$  و  $96/36\%$  حاصل شده است. میزان گرفتگی برگشت‌پذیر، برگشت‌ناپذیر و گرفتگی کلی برای راکتور EMBR نسبت به MBR بسیار کاهش پیدا کرد که این به دلیل سازوکارهای الکترواسمزی، الکتروفورز و انعقاد الکتریکی است که در EMBR اتفاق می‌افتد.

جدول ۵. مقاومت‌های سطح غشا برای راکتور MBR و EMBR.

Table 5. Resistances of membrane surface for MBR and EMBR.

Resistance percent	(MBR)	Run1	Run2	Run3	Run4
$R_m$ (%)	9	1.92	20.37	18.62	39.09
$R'$ (%)	16.11	25.43	17.44	25.3	16.60
$R_c$ (%)	73.99	71.75	61.4	62.74	32.81
$R_p$ (%)	0.89	0.89	.78	20.02	3.06

1. Resistance Membrane

2. Resistance Cake

3. Resistance Pore

4. Resistance Irreversible

### ۶-۳ بازدهی حذف COD

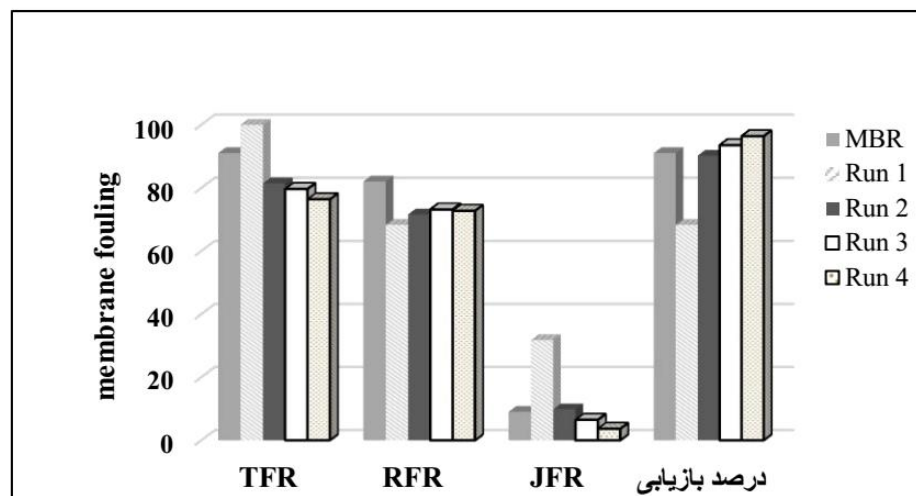
نتایج حذف COD در شکل (۴) آمده است. با توجه به نتایج، میزان حذف COD برای راکتور MBR به طور متوسط ۷۵٪ و برای راکتور EMBR برای حالت‌های اول تا چهارم به ترتیب ۸۳٪، ۹۳٪، ۸۷٪ و ۹۹٪ شد.

چنان‌که که راکتور شاهد نشان می‌دهد حذف عمده اتانول، از راه حذف زیستی بوده است. در راکتورهایی که میدان الکتریکی ایجاد شده، بازدهی افزایش یافته است. دلیل آن را می‌توان چنین دانست که اکسایش مواد آلی نیز انجام شده است و لذا میزان حذف COD افزایش یافته است. بنی‌ملح و الکتروویژن در سال ۲۰۱۱ دریافتند که میزان حذف COD در MBR معمولی بین ۷۲-۹۵٪ بود در حالی که در EMBR بین ۸۵-۹۸٪ بود [۲]. هم‌چنین گوانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ دریافتند که میزان حذف COD در MBR معمولی ۷۶٪ است ولی در EMBR ۹۲/۶٪ است [۳۳]. راندمان بالای حذف COD در EMBR را می‌توان به انعقاد الکتریکی نسبت داد. هم‌چنین مونومرها و پلیمرهای کاتیونی  $Al^{3+}$  و  $Al(OH)_2^+$  تولیدشده به‌عنوان جاذب عمل می‌کنند و مواد آلی را روی سطح خود جذب کرده، باعث افزایش سرعت حذف بار آلی می‌شوند. هم‌چنین می‌توان نتیجه گرفت که نه‌تنها خصوصیات ذاتی مونومرها و بسپارهای کاتیونی تولیدشده با مواد مغذی سازگار است و اثر سمی ندارد، بلکه

باعث بهبود عملکرد ریزاندام‌ها و افزایش فعالیت آن‌ها در حذف بار آلی می‌شود [۳۳].

### ۷-۳ توزیع اندازه ذرات لجن

مشخصات توده تجمع یافته نقش یگانه‌ای در فرایند گرفتگی غشا دارد که عامل مهمی برای واحدهای تصفیه صنعتی است. مشخصات توده روی قابلیت ته‌نشینی و قابلیت تراکم‌پذیری لجن در عملیات MBR تأثیر می‌گذارد. این توده‌ها به وسیله آنالیز FTIR<sup>۱</sup> (شناسایی ترکیبات پروتئینی و پلی‌ساکاریدی موجود در ساختار لجن)، توزیع اندازه ذرات لجن (PSD)<sup>۲</sup> و مشخصه‌های فیزیکی (توانایی تجمع‌یافتگی توده، آب‌گریز بودن و بار سطحی) توصیف می‌شوند. توده‌های بزرگ به علت نیروی دراگ در مسدود شدن ورودی حفره‌های غشا به طور مستقیم بر روی سطح غشا قرار نمی‌گیرند و توده‌های بیولوژیکی نقش مهم‌تری در تشکیل لایه کیک بر روی سطح غشا دارند. به طور کلی نفوذ ذرات در میان حفره‌های غشا را می‌توان با افزایش اندازه ذرات، کاهش داد که باعث بازگشت ذرات از سطح غشا می‌شوند. شار جریان تراوش یافته از غشا در راکتور زیستی غشایی غوطه‌ور را می‌توان به وسیله افزایش اندازه ذرات توده‌ها بالا برد [۳۵، ۳۴].

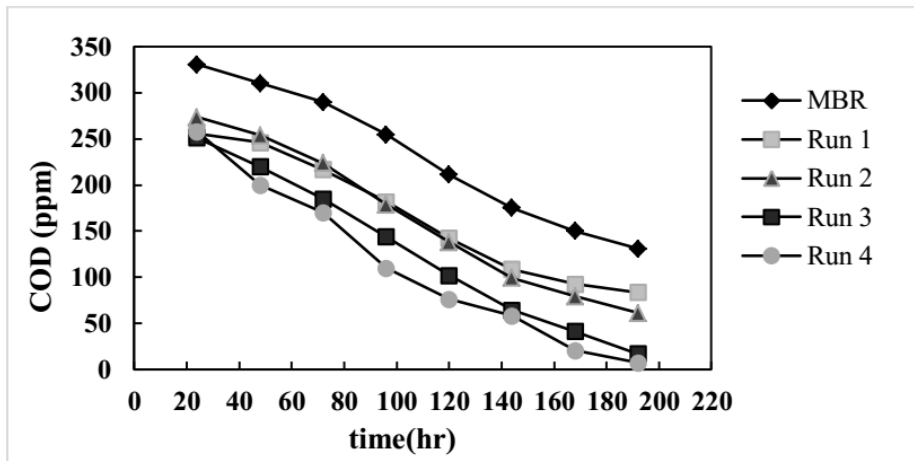


شکل ۴. درصد انواع گرفتگی‌های موجود در سطح غشا برای راکتور MBR و EMBR.

Figure 4. Percentage of different type of membrane fouling for MBR and EMBR.

1. Fourier Transform Infrared Spectrometer

2. Particle Size Distribution



شکل ۵. حذف COD در راکتور MBR و EMBR.

Figure 5. Removal COD for MBR and EMBR.

دارند، باعث شکستن فلاک شده‌اند و اندازه ذرات در حالت اول کاهش یافته است. از این رو خوردگی بیش از حد همیشه نمی‌تواند مناسب برای تشکیل فلاک باشد. وجود این ذرات فلزی در غلظت مناسب، باعث تشکیل لخته‌های بزرگ‌تر می‌شود که این لخته‌ها باعث تشکیل لایه کیک با تخلخل بیشتر بر روی سطح غشا می‌شوند. بنابراین شار عبوری از غشا افزایش پیدا می‌کند. همچنین تشکیل فلاک‌های بزرگ‌تر باعث می‌شود تا ذرات به راحتی درون حفره‌های غشا وارد نشوند؛ لذا گرفتگی غشا کاهش می‌یابد. بای و همکاران نیز اشاره کرده‌اند که ذرات کوچک‌تر به‌ویژه کوچک‌تر از ۵۰ میکرومتر در درون حفره‌های لایه کیک، باعث افزایش مقاومت غشایی می‌شود، در نتیجه میزان شار عبوری از غشا کاهش پیدا می‌کند [۳۶].

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر میدان الکتریکی در چهار حالت مختلف بر میزان نفوذپذیری غشا و حذف مواد آلی از پساب بررسی شد. نتایج نشان داد که در میدان الکتریکی پایین‌تر، اعمال جریان به صورت متناوب و فاصله کم الکترودها (میدان ۱/۵ ولت، یک دقیقه روشن و ۴ دقیقه خاموش و فاصله الکترودها ۲/۵ سانتی‌متر) راکتور عملکرد بهتری در کاهش گرفتگی غشا و حذف مواد آلی دارد. نتایج نشان داد که ایجاد میدان الکتریکی باعث افزایش تخلخل و کاهش مقاومت لایه کیک به دلیل افزایش اندازه فلاک‌ها و در نهایت منجر به کاهش

نتایج حاصل از آنالیز توزیع اندازه ذرات لجن نشان داد که توزیع اندازه ذرات با اندازه ۰/۱ تا ۵۰ میکرومتر در راکتور MBR ۸۷٪ و برای ۵۰ تا ۸۰ میکرومتر ۱۳٪ است. در راکتور EMBR، توزیع اندازه ذرات با اندازه ۰/۱ تا ۵۰ میکرومتر، در حالت اول ۴۵٪، در حالت دوم ۴۱٪، در حالت سوم ۳۹٪ و در حالت چهارم ۲۲٪ است. همچنین توزیع اندازه ذرات با اندازه ۵۰-۸۰ میکرومتر برای حالت‌های اول تا چهارم به ترتیب ۵۵٪، ۵۹٪، ۶۱٪ و ۷۸٪ گزارش شد. در جدول (۶) درصد توزیع اندازه ذرات برای راکتور MBR و EMBR بیان شده است. طبق نتایج، متوسط اندازه ذرات لجن در راکتور MBR ۳۸/۸۵ میکرومتر و در راکتور EMBR برای حالت اول تا چهارم به ترتیب ۵۴/۷۲، ۵۵/۷، ۶۳/۴۵ و ۷۳/۸۴ میکرومتر به دست آمد. در راکتور EMBR ذرات فلزی که هنگام انعقاد الکتریکی از سطح آند جدا می‌شود، می‌توانند ترکیبات آلی محلول، مواد کلوئیدی ریز و باکتری‌های شناور را جذب و لخته کنند. بنابراین توزیع اندازه ذرات در راکتور EMBR بیشتر از راکتور MBR است. نتایج آنالیز توزیع اندازه ذرات لجن نشان داد که متوسط اندازه ذرات لجن برای راکتور EMBR در حالت چهارم (۱/۵ ولت و ۲/۵ سانتی‌متر) بیشتر از حالت‌های دیگر است؛ زیرا در این حالت مشاهده شد که سطح آند خورده می‌شود و ذرات در غلظت نه‌چندان زیاد از سطح آن جدا می‌شوند. همچنین در حالت اول مشاهده شد که به دلیل خوردگی بیش از حد و غلظت بیشتر ذرات فلزی، غشا به سرعت گرفته شد؛ لذا ذرات در این حالت، چون غلظت بیشتری

جدول ۶. درصد توزیع اندازه ذرات لجن برای راکتور MBR و EMBR.

Table 6. The Size distribution of sludge particles for MBR and EMBR.

Particle Size Distribution (%)	(MBR)	Run1	Run2	Run3	Run4
1 $\mu\text{m}$	5	2	2	0.5	0.5
10 $\mu\text{m}$	7	8	9	7	3
20 $\mu\text{m}$	15	12	11.5	9	3.5
40 $\mu\text{m}$	65	25	20.5	21.5	8
70 $\mu\text{m}$	13	35	39	42	60
80 $\mu\text{m}$	0	20	20	19	25

operated without sludge discharge", International Journal of Environmental Science and Technology, pp. 1-14, (2020).

- [6] Su, F., Liang, Y., Liu, G., Mota Filho, C.R., Hu, C., Qu, J., "Enhancement of anti-fouling and contaminant removal in an electro-membrane bioreactor: Significance of electrocoagulation and electric field", Separation and Purification Technology, 248, p. 117077, (2020).
- [7] Bani-Melhem, K. and Elektorowicz, M., "Performance of the submerged membrane electro-bioreactor (SMEBR) with iron electrodes for wastewater treatment and fouling reduction", Journal of Membrane Science, 379(1-2), pp. 434-439, (2011).
- [8] Tafti, A. D., Mirzaii, S. M. S., Andalibi, M. R., Vossoughi, M., "Optimized coupling of an intermittent DC electric field with a membrane bioreactor for enhanced effluent quality and hindered membrane fouling", Separation and Purification Technology, 152, pp. 7-13, (2015).
- [9] Hasan, S. W., Elektorowicz, M., Oleszkiewicz, J. A., "Start-up period investigation of pilot-scale submerged membrane electro-bioreactor (SMEBR) treating raw municipal wastewater", Chemosphere, 97, pp. 71-77, (2014).
- [10] Bani-Melhem, K., Elektorowicz, M., " Development of a novel submerged membrane electro-bioreactor (SMEBR): performance for fouling reduction", Environmental science & technology, 44(9): pp. 3298-3304, (2010).
- [11] Hasan, S.W., Elektorowicz, M., Oleszkiewicz, J. A., "Correlations between trans-membrane pressure (TMP) and sludge properties in submerged membrane electro-bioreactor (SMEBR) and conventional membrane bioreactor (MBR)", Bioresource technology, 120: pp. 199-205, (2012).
- [12] Saraji, G. N., Dargahi, H., "Study of quality of work life (QWL)", Iranian Journal of Public Health, pp. 8-14, (2004).

گرفتگی غشا می‌شود. نتایج آنالیز PSD نشان داد که متوسط اندازه ذرات لجن برای راکتور EMBR در حالت چهارم حدود ۷۸٪ بیشتر از حالت‌های دیگر است. همچنین میزان حذف COD برای راکتور MBR به‌طور متوسط بین ۷۵-۵۱٪ و برای راکتور EMBR بین ۹۹-۸۳٪ است که در حالت چهارم COD تقریباً به‌طور کامل (۹۹٪) حذف شد.

#### مراجع

- [1] Al-Qodah, Z., Al-Qudah, Y., Omar, W., "On the performance of electrocoagulation-assisted biological treatment processes: a review on the state of the art", Environmental Science and Pollution Research, 26(28), pp. 28689-28713, (2019).
- [2] Ensano, B., Borea, L., Naddeo, V., Belgiorno, V., de Luna, M. D., Ballesteros Jr, F. C., "Combination of electrochemical processes with membrane bioreactors for wastewater treatment and fouling control: A review". Frontiers in Environmental Science, 4, p. 57, (2016).
- [3] Al-Malack, M. H., Al-Nowaiser, W. K., "Treatment of synthetic hypersaline produced water employing electrocoagulation-membrane bioreactor (EC-MBR) process and halophilic bacteria". Journal of Environmental Chemical Engineering, 6(2), pp. 2442-2453, (2018).
- [4] Unal, B. O., Dizge, N., Karagunduz, A., Keskinler, B., "Combined electrocoagulation and electrooxidation process in electro membrane bioreactor to improve membrane filtration effectiveness", Bioresource Technology Reports, 7, p. 100237, (2019).
- [5] Manica, M., Battistelli, A. A., Belli, T. J., Souza, J. B., Lapolli, F. R., Vidal, C. M. S., "Effects of electrocoagulation on membrane fouling and treatment performance of a membrane bioreactor

- [13] Rahimi, Z., Zinatizadeh, A. A., Zinadini, S., "Milk processing wastewater treatment in an MBR: A comparative study on the use of two synthetic anti-fouling PES-UF membranes", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), p. 103369.
- [14] Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr AL, Randall RJ., "Protein measurement with the Folin phenol reagent", *J. biol. Chem.*, 193(1), pp. 265-275, (1951).
- [15] Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. T., Smith, F., "Colorimetric method for determination of sugars and related substances", *Analytical chemistry*, 28(3), pp. 350-356, (1956).
- [16] Sheibaninia, A., Valaie, N., Mohammad Sadeghi, S., Azizi, F., "The evaluation of accuracy of article writing in scientific journals of dentistry in 2006", *Research in Medicine*, 33(1), pp. 5-11, (2009).
- [17] Tan, M., Qiu, G., Ting, Y. P., "Effects of ZnO nanoparticles on wastewater treatment and their removal behavior in a membrane bioreactor", *Bioresource technology*, 185, pp. 125-133, (2015).
- [18] Yang, S. F., Li, X. Y., "Influences of extracellular polymeric substances (EPS) on the characteristics of activated sludge under non-steady-state conditions", *Process Biochemistry*, 44(1), pp. 91-96, (2009).
- [19] Bottino, A., Capannelli, G., Comite, A., Mangano, R., "Critical flux in submerged membrane bioreactors for municipal wastewater treatment", *Desalination*, 245(1-3), pp. 748-753. (2009)
- [20] Hazrati, H., Karimi, N., Jafarzadeh, Y., "Performance and antifouling properties of PVDF/PVP and PSf membranes in MBR: A comparative study", *Membrane Water Treatment*, 11(2), pp. 159-166, (2020).
- [21] Akamatsu, K., Lu, W., Sugawara, T., Nakao, S. I., "Development of a novel fouling suppression system in membrane bioreactors using an intermittent electric field", *Water research*, 44(3), pp. 825-830, (2010).
- [22] Barceló, D., "MembraneBioreactor (MBR) asanAdvancedWastewater Treatment Technology", *Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste: Removal technologies*, 5, p. 275, (2008).
- [23] Dignac, M. F., Urbain, V., Rybacki, D., Bruchet, A., Snidaró, D., Scribe, P., "Chemical description of extracellular polymers: implication on activated sludge floc structure", *Water Science and Technology*, 38(8-9), pp. 45-53, (1998).
- [24] Liu, L., Liu, J., Gao, B., Yang, F., "Minute electric field reduced membrane fouling and improved performance of membrane bioreactor", *Separation and Purification Technology*, 86, pp. 106-112, (2012).
- [25] Grady Jr, C. L., Daigger, G. T., Love, N. G., Filipe, C. D., "Biological wastewater treatment. CRC press, (2011).
- [26] Mohamadi, S., Hazrati, H., Shayegan, J., "Influence of a new method of applying adsorbents on membrane fouling in MBR systems", *Water and Environment Journal*, 34, pp. 355-366, (2020).
- [27] Chae, S. R., Ahn, Y. T., Kang, S. T., Shin, H. S., "Mitigated membrane fouling in a vertical submerged membrane bioreactor (VSMBR)", *Journal of Membrane Science*, 280(1-2), pp. 572-581, (2006).
- [28] Pollice, A., Giordano, C., Laera, G., Saturno, D., Mininni, G., "Rheology of sludge in a complete retention membrane bioreactor", *Environmental technology*, 27(7), pp. 723-732, (2006).
- [29] Ouyang, K., Junxin, L. I. U., "Effect of sludge retention time on sludge characteristics and membrane fouling of membrane bioreactor", *Journal of Environmental Sciences*, 21(10), pp. 1329-1335 (2009).
- [30] Liu, L., Zhao, F., Liu, J., Yang, F., "Preparation of highly conductive cathodic membrane with graphene (oxide)/PPy and the membrane antifouling property in filtrating yeast suspensions in EMBR", *Journal of membrane science*, 437, pp. 99-107, (2013).
- [31] Tournay, J., Ngwenya, B. T., "The effect of ionic strength on the electrophoretic mobility and protonation constants of an EPS-producing bacterial strain", *Journal of colloid and interface science*, 348(2), pp. 348-354, (2010).
- [32] Wilén, B. M., Jin, B., Lant, P., "Relationship between flocculation of activated sludge and composition of extracellular polymeric substances", *Water Science and Technology*, 47(12), pp. 95-103, (2003).
- [33] Watanabe, Y., Kimura, K., Itonaga, T., "Influence of dissolved organic carbon and suspension viscosity on membrane fouling in submerged membrane bioreactor", *Separation science and technology*, 41(7), pp. 1371-1382, (2006).
- [34] Chang, I. S., Lee, C. H., "Membrane filtration characteristics in membrane-coupled activated sludge system—the effect of physiological states of activated sludge on membrane fouling", *Desalination*, 120(3), pp. 221-233 (1998).
- [35] Le-Clech, P., Jefferson, B., Judd, S. J., "Impact of aeration, solids concentration and membrane characteristics on the hydraulic performance of a membrane bioreactor", *Journal of Membrane Science*, 218(1-2), pp. 117-129, (2003).
- [36] Bai, R., Leow, H. F., "Microfiltration of activated sludge wastewater—the effect of system operation parameters", *Separation and Purification Technology*, 29(2), pp. 189-198, (2002).