

# زیست‌راکتور غشایی: مروری بر پارامترهای عملیاتی و پارامترهای مربوط به خصوصیات زیست‌توده

الهام عبدالله‌زاده شرقی

استادیار مهندسی شیمی، پژوهشگاه مواد و انرژی

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۸/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۵/۰۴

پیام‌نگار: e.abdollahzadeh@merc.ac.ir

## چکیده

زیست‌راکتور غشایی (MBR) عبارت است از ادغام سامانه زیستی و غشایی، و به دلیل مزایای بارز آن نسبت به سامانه‌های سنتی حذف آلاینده‌های آلی و معدنی، نیز ریزاندامگانها از فاضلاب شهری و صنعتی، کاربرد بسیار گسترده‌ای دارد. به‌منظور رسیدن به کیفیت بالای فاضلاب تصفیه شده و کاهش گرفتگی در سامانه‌های زیست‌راکتور غشایی، باید عوامل متعددی بهینه‌سازی شوند. در این تحقیق، ابتدا انواع زیست‌راکتور غشایی از لحاظ میزان هوادهی، ساختار، جنس و مدول غشاء مرور می‌شود. سپس به پارامترهای عملیاتی تأثیر گذار بر عملکرد زیست‌راکتور غشایی نظیر زمان ماند هیدرولیکی، زمان ماند لجن، غلظت و نوع خوراک ورودی، هوادهی، عملکرد غشا و گرفتگی غشا و نیز پارامترهای مربوط به خصوصیات زیست‌توده نظیر غلظت زیست‌توده، توزیع ابعاد ذرات، محصولات میکروبی (مواد بسپاری خارج سلولی و محصولات محلول میکروبی) و ریخت‌شناسی زیست‌توده، نظر انداخته شده است.

کلیدواژه‌ها: زیست‌راکتور غشایی (MBR)، پارامترهای عملیاتی، زیست‌توده، محصولات محلول میکروبی (SMP)، مواد بسپاری خارج سلولی (EPS)، زمان ماند هیدرولیکی (HRT)، زمان ماند لجن (SRT)، ریخت‌شناسی، گرفتگی غشا.

## ۱. مقدمه

فرایندهای غشایی نیز به دلیل گرفتگی بالا به احیای متناوب غشاء نیاز دارند و هزینه اجرایی این نوع فرایندها بالاست؛ از این‌رو، در سه دهه اخیر زیست‌راکتورهای غشایی (MBR)<sup>۱</sup> به عنوان سامانه‌های پیشرفته تصفیه انواع مختلف فاضلاب نظیر فاضلاب شهری، فاضلاب با بار آلی بالا و فاضلاب‌های سنگین به طور گسترده‌تری به کار گرفته شده‌اند. MBR ادغام سامانه زیستی شامل لجن فعال و سامانه غشایی است که نسبت به سایر روش‌های زیستی سنتی دارای

با توجه به بحران کم آبی در کشور، توجه به امر بازیافت آب از فاضلاب‌ها به عنوان یکی از منابع پایدار آب مورد توجه قرار گرفته است. استفاده گسترده از روش‌های شیمیایی و فیزیکی تصفیه فاضلاب صنایع مختلف، بدلیل هزینه بالای تصفیه، مصرف مواد شیمیایی سمی، نیاز به فضای زیاد برای نصب تجهیزات، آلودگی ثانویه و حساسیت به انواع مواد شیمیایی محدود شده است.

\* البرز، کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده انرژی، گروه محیط زیست

1. Membrane Bioreactor

هوادهی، عملکرد غشا و گرفتگی غشا و نیز پارامترهای مربوط به خصوصیات زیست توده همچون غلظت زیست توده (MLSS) و (MLVSS)<sup>۴</sup>، توزیع ابعاد ذرات (PSD)<sup>۵</sup>، محصولات میکروبی (مواد بسپاری خارج سلولی (EPS)<sup>۶</sup> و محصولات محلول میکروبی (SMP)<sup>۷</sup> و ریخت شناسی زیست توده‌ای به طور کامل مرور خواهد شد.

## ۲. تاریخچه و وضعیت کنونی استفاده از زیست راکتورهای غشایی در جهان و ایران

اولین MBR در اواخر دهه ۱۹۶۰ در آمریکای شمالی برای تصفیه فاضلاب کشتی را دور-البور<sup>۸</sup> به کار گرفته شد و همزمان استفاده از یک سامانه جداسازی غشایی همراه با فرایند لجن فعال در مقیاس آزمایشگاهی (۱۰ لیتر) به دست هاردت<sup>۹</sup> و همکارانش نیز گزارش شده است. در این فرایند غشاء صفحه ای تخت<sup>۱۱</sup> (FS) فراصافش به کار گرفته شد. فرایند به کار برده شده در تغلیظ زیست توده و ضد عفونی کردن، عملکرد بسیار مؤثری به شمار آمد<sup>۴</sup>. در اوایل دهه ۱۹۷۰، سامانه‌های جانبی با غشاهای چند لوله‌ای به منظور باز مصرف آب در آمریکا توسط کمپانی Thedford به بازار آمدند و در اوایل دهه ۱۹۸۰ کمپانی Techsep این فرایند جانبی را با غشاء FS در ژاپن برای باز مصرف آب وارد بازار کرد. در اواسط دهه ۱۹۸۰، امتیاز MBR نوع غوطه‌ور با غشاء FS توسط نیتو-دنکو<sup>۱۲</sup> ثبت شد و آزمایش‌هایی نیز در دانشگاه توکیو با نوع غوطه‌ور با غشاء الیاف میان تهی (HF)<sup>۱۳</sup> انجام شد. شرکت Kubota, MBR نوع غوطه‌ور با غشاء FS را در ژاپن وارد بازار کرد و همزمان کمپانی Zenon نوع غوطه‌ور را در آمریکای شمالی و اروپا معرفی کرد و کمپانی‌های دیگر نیز MBR جانبی را در مناطق مختلف به کار بردند. در حال حاضر نیز شرکت‌هایی چون Kubato, Mitsubishi, USFilter, Huber و Zenon و Puron در کشورهایی چون کانادا، ژاپن و آمریکا به ساخت و استفاده از MBR برای تصفیه فاضلاب می‌پردازند<sup>۴</sup>. در دو دهه اخیر، به دلیل پیشرفت‌های زیاد در طراحی و فناوری غشا، افزایش

مزایای زیادی چون کیفیت بالای آب خروجی، ظرفیت گندزدایی بالا، کنترل زمان ماند لجن (SRT)<sup>۱</sup> مستقل از زمان ماند هیدرولیکی (HRT)<sup>۲</sup>، غلظت بالاتر زیست توده، حذف گسترده آلاینده‌های آلی و معدنی (اجزای آلی، نیترژن کل و فسفر کل)، ظرفیت تحمل بالای بار آلی (OLR)<sup>۳</sup> ورودی، کوچکتر بودن ابعاد و تولید لجن کمتر است<sup>۳-۱</sup>. از سوی دیگر، محدودیت‌هایی چون هزینه سرمایه‌گذاری بالا، مصرف انرژی بالا، نیاز به مهارت فنی فراگیر متصدی، هزینه تعمیر و نگهداری، مشکلات مربوط به گرفتگی غشاء و تناوب تمیز کردن آن‌ها در ارتباط با سامانه‌های MBR وجود دارد<sup>۴</sup>. اما با پیشرفت‌های جدید در طراحی و فناوری غشاء (کاهش چشمگیر هزینه غشاهای و افزایش طول عمر آنها)، به نظر می‌رسد که فرایند MBR در تصفیه فاضلاب صنعتی و شهری از آینده نویدبخشی برخوردارند<sup>۵</sup>. همچنین، گسترش کاربرد فناوری MBR در کشورهایی چون امارات، قطر، عربستان سعودی و حتی ایران که با کمبود آب مواجه‌اند، و نیاز به باز مصرف پساب، انتظار می‌رود<sup>۶</sup>.

در سال‌های اخیر، شمار مقالات و گزارش‌های انتشار یافته مربوط به فناوری MBR در تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی نزدیک به ۴۰۰ نسخه در سال رسیده است<sup>۷</sup>. بررسی بازارهایی که آمار آنها در دسامبر ۲۰۰۹ منتشر شده، نشان داده است که ۵۶۶ واحد کارخانه از ۸۰۰ واحد کارخانه MBR در مقیاس صنعتی در اروپا، به کاربردهای صنعتی اختصاص یافته است. با توسعه شتابان فناوری MBR برای تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی، تجزیه و تحلیل دقیق و مرور پیشرفت تحقیقات علمی گذشته در تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی با ارزش خواهد بود<sup>۵</sup>.

به منظور رسیدن به کیفیت بالای فاضلاب تصفیه شده و کاهش گرفتگی در سامانه‌های MBR، باید عوامل متعددی بهینه‌سازی شوند. هرچند تعداد چشمگیری مقاله در این زمینه منتشر شده، اما مقالات مختلف، آثار متناقضی را بر افزایش یا کاهش پارامترهای موثر بر عملکرد سامانه MBR نشان داده‌اند. هدف از این مقاله، در ابتدا معرفی انواع MBR از نظر میزان هوادهی، ساختار، جنس و مدول غشاء است. سپس، انواع پارامترهای عملیاتی تأثیرگذار بر عملکرد MBR، نظیر HRT، SRT، غلظت و نوع خوراک ورودی،

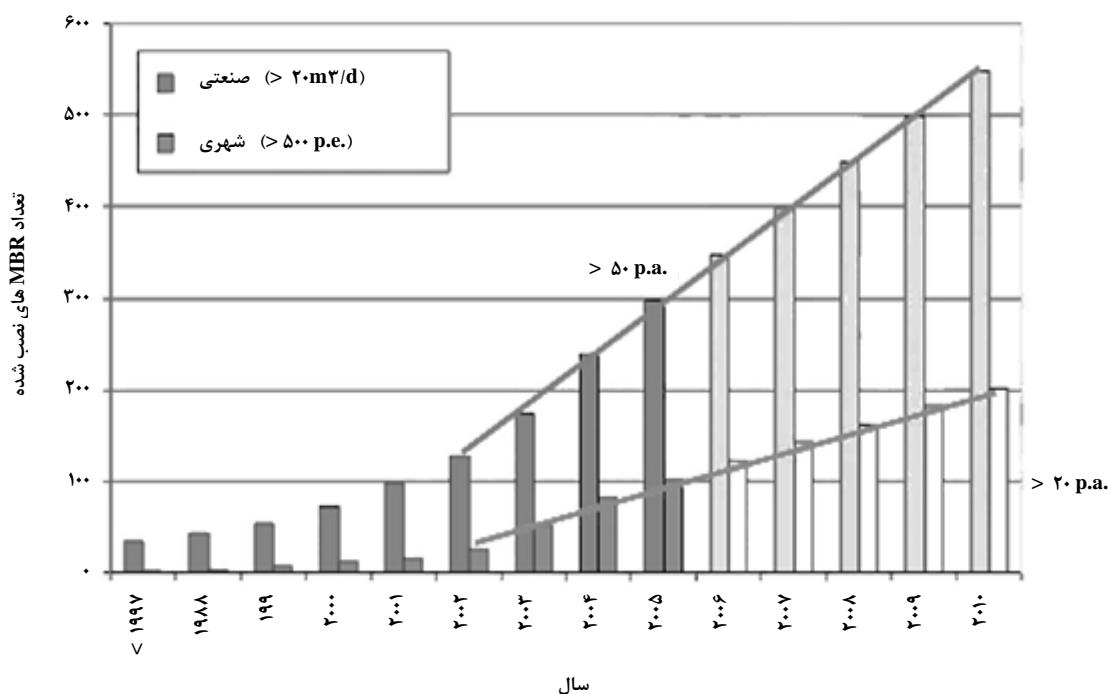
4. Mixed Liquor Suspended Solids  
5. Mixed Liquor Volatile Suspended Solids  
6. Particle Size Distribution  
7. Extracellular Polymer Substance  
8. Soluble Microbial Products  
9. Dorr-Oliver  
10. Hardth  
11. Flat Sheet  
12. Nitto-Denko  
13. Hollow Fiber

1. Sludge Retention Time  
2. Hydraulic Retention Time  
3. Organic Loading Rate

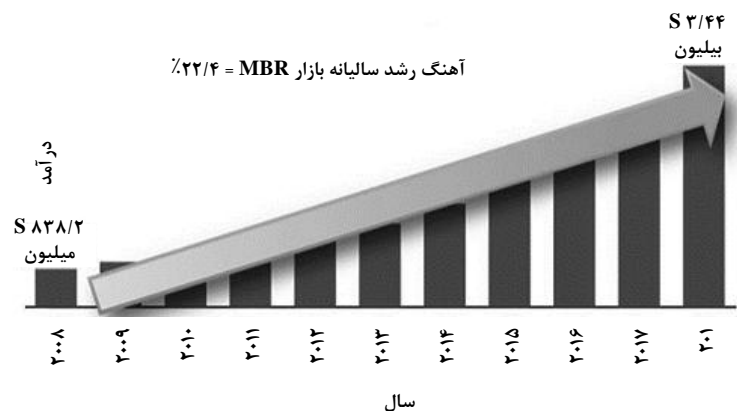
اختصاص داده‌اند [۹]. در جدول (۱)، که بر پایه گزارش انتشار یافته از فراست و سولیوان در سال ۲۰۱۲ تدوین شده، ظرفیت و سال بهره برداری در برخی کشورها که از فناوری MBR استفاده می‌کنند، آورده شده است. حجم فاضلاب تصفیه شده توسط MBR در سال ۲۰۱۱ حدود  $3879000 \text{ m}^3/\text{day}$  بوده که با آهنگ رشد سالیانه  $20/8\%$ ، پیش‌بینی می‌شود حجم فاضلاب تصفیه شده در سال ۲۰۱۸ به حدود  $12344000 \text{ m}^3/\text{day}$  برسد [۱۰]. همانطور که در نمودار شکل (۲) مشاهده می‌شود، آهنگ رشد سالیانه بازار MBR در جهان طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۸،  $22/4\%$  است، که حاکی از گسترش و رواج بهره‌گیری این فناوری در دنیاست، و نیز نشان می‌دهد که بهره‌گیری از این فناوری در صنعت تصفیه فاضلاب همچنان جای رشد دارد و هنوز به دوران بلوغ خود نرسیده است [۹].

طول عمر غشاهای از ۳ به ۸ سال، کاهش هزینه ساخت غشاهای، و در نتیجه کاهش هزینه استفاده از سامانه MBR، وضع قوانین سختگیرانه زیست‌محیطی، افزایش کمبود آب و افزایش توجه به بحث بازیافت و باز مصرف آب، استفاده از فرایند MBR در تصفیه فاضلاب‌های شهری، شیمیایی و صنعتی افزایش یافته است [۵]. در نمودار شکل (۱)، روند رو به رشد بهره‌گیری از MBR در تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی در مقیاس صنعتی را مشاهده می‌کنید [۸]. بر اساس گزارش لین<sup>۱</sup> و همکاران، در فواصل زمانی ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۰، حدود ۲۱۶۲ نشریه علمی و مقالات ارائه شده در همایش‌ها به زبان انگلیسی در زمینه MBR برای تصفیه فاضلاب چاپ و منتشر شده است [۵].

هم اکنون کشور چین رتبه اول (۳۸۰۰ تصفیه خانه MBR)، آمریکا رتبه دوم، امارات رتبه سوم، عمان رتبه ششم، عربستان رتبه نهم و قطر رتبه سیزدهم را در تعداد MBRهای نصب شده به خود



شکل ۱. روند رو به رشد کاربرد MBR در تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی در مقیاس صنعتی [۸].



شکل ۲. روند رشد سالانه بازار MBR در دنیا [۹].

جدول ۱. ظرفیت و سال بهره برداری در برخی از کشورهای دارای فناوری MBR [۱۰].

| سال بهره برداری | ظرفیت طراحی (m <sup>3</sup> /day) | کشور      |
|-----------------|-----------------------------------|-----------|
| ۱۹۹۷            | ۱۹۰۰                              | انگلیس    |
| ۱۹۹۸            | ۳۲۴۰                              | آلمان     |
| ۱۹۹۸            | ۱۲۷۰۰                             | انگلیس    |
| ۱۹۹۹            | ۴۳۰۰                              | فرانسه    |
| ۲۰۰۲            | ۴۲۴۰۰                             | ایتالیا   |
| ۲۰۰۲            | ۱۱۸۰۰                             | آمریکا    |
| ۲۰۰۴            | ۴۵۰۰۰                             | آلمان     |
| ۲۰۰۳            | ۱۸۰۰۰                             | هلند      |
| ۲۰۰۳            | ۴۵۴۰                              | آمریکا    |
| ۲۰۰۴            | ۳۸۶۰۰                             | آمریکا    |
| ۲۰۰۵            | ۷۰۰۰۰                             | کره جنوبی |
| ۲۰۰۶            | ۷۸۰۰۰                             | عمان      |
| ۲۰۰۶            | ۳۸۲۰۰                             | آمریکا    |
| ۲۰۰۶            | ۴۴۳۰۰                             | آمریکا    |
| ۲۰۰۶            | ۳۰۰۰۰                             | چین       |
| ۲۰۰۷            | ۹۳۵۰۰                             | آمریکا    |
| ۲۰۰۷            | ۸۰۰۰۰                             | چین       |
| ۲۰۰۷            | ۷۵۷۰۰                             | آمریکا    |
| ۲۰۰۷            | ۶۰۲۰۰                             | قطر       |
| ۲۰۰۷            | ۶۰۰۰۰                             | چین       |
| ۲۰۰۷            | ۴۷۳۰۰                             | ایتالیا   |
| ۲۰۰۷            | ۱۰۰۰۰۰                            | چین       |
| ۲۰۰۹            | ۱۱۴۰۰۰                            | آمریکا    |
| ۲۰۰۹            | ۳۰۰۰۰                             | عربستان   |
| ۲۰۰۹            | ۳۸۰۰۰                             | امارات    |
| ۲۰۰۱۰           | ۱۴۴۰۰۰                            | آمریکا    |
| ۲۰۰۱۰           | ۱۱۰۰۰۰                            | چین       |
| ۲۰۰۱۰           | ۱۰۰۰۰۰                            | چین       |
| ۲۰۰۱۰           | ۷۸۰۰۰                             | عمان      |

در ایران، در سال ۱۳۸۲ از یک MBR جانبی سه لیتری با یک مدول لوله‌ای برای تصفیه فاضلاب سنتزی شامل نفت خام و نفت سفید در انجام یک پروژه کارشناسی ارشد استفاده شده است. بازدهی این فرایند ۹۳ تا ۹۷ درصد گزارش شده است [۱۱]. در سال ۱۳۸۸، تصفیه‌پذیری فاضلاب روغن موتور از طریق MBR گرمادوست دارای غشاء خارجی از نوع فراصافش بسپاری بررسی شده است [۱۲]. قابلیت حذف زیستی استایرن از فاضلاب پتروشیمی با استفاده از MBR غوطه‌ور ۵ لیتری دارای غشای FS نیز در سال ۱۳۸۸ بررسی شد و بازده حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) و استایرن در این سیستم بیش از ۹۹٪ بوده است [۱۳]. در سال ۱۳۹۱ نیز، تصفیه زیستی آب تولیدی میادین نفتی شامل غلظت نمک بالا به واسطه ریزاندامگان‌های نسبتاً نمک دوست در MBR غوطه‌ور ۵ لیتری دارای غشای FS بررسی شد که بازده حذف COD و ترکیبات نفتی بیش از ۹۰ درصد بوده است [۱۴]. در حال حاضر نیز در تصفیه خانه شرکت نفت مرکزی، شرکت نفت پارس، ایران خودرو و چندین پروژه مسکن مهر از سامانه MBR استفاده می‌شود. همچنین، در تصفیه خانه مرکزی شهرک صنعتی شرق سمنان نیز برای تصفیه پیشرفته فاضلاب کارخانه‌های مختلف از سامانه MBR با ظرفیت ۳۰۰ مترمکعب در روز همراه با کربن فعال و اسمز معکوس استفاده می‌شود.

### ۳. مزایا و معایب سامانه‌های زیست‌راکتور غشایی

مقایسه سامانه لجن فعال سنتی و MBR نشان می‌دهد که به دلیل جایگزینی واحد زلال‌سازی ثانویه سامانه‌های سنتی با یک مدول غشایی در MBR، ابعاد این سامانه کوچکتر شده و فضای کمتری اشغال می‌کند. علاوه بر این، بر اثر جداسازی کامل لجن، کیفیت آب خروجی از سامانه بسیار بالاست، تا جایی که بسته به نوع غشاء مورد استفاده، ادعا شده است که جریان خروجی استریل است و به ضدعفونی کردن نیاز ندارد. به دلیل کیفیت بسیار بالای آب خروجی، امکان باز مصرف همان آب در فرایند فراهم می‌شود [۱۵]. از دیگر مزایای این سامانه باید به کنترل SRT، مستقل از HRT اشاره کرد. SRT بالا منجر به غلظت بالای زیست‌توده می‌شود. در سامانه‌های

### ۴. طبقه‌بندی زیست‌راکتورهای غشایی

#### ۴-۱ انواع زیست‌راکتورهای غشایی از نظر میزان هوادهی

MBR ها، که عموماً با توجه به حجم بالای فاضلاب صنعتی پیوسته اجرا می‌شوند، از نظر میزان هوادهی به دو دسته MBR هوازی و بی‌هوازی تقسیم‌بندی می‌شوند. در سامانه هوازی از ریزاندامگان‌های هوازی برای تجزیه آلاینده‌ها استفاده می‌شود. در این سامانه، ریزاندامگانها مواد آلی موجود در فاضلاب را به کربن دی اکسید، آب و ترکیبات محلول میکروبی و زیست‌توده تبدیل می‌کنند. در سامانه بی‌هوازی، به دلیل بهره‌گیری از ریزاندامگانهای بی‌هوازی، مواد آلی موجود در فاضلاب به گاز زیستی (متان) و زیست‌توده تبدیل می‌شوند. در این سامانه، ترکیبات محلول میکروبی نیز توسط زیست‌توده به داخل زیست‌راکتور ترشح می‌شود. مشکلاتی از جمله سرعت رشد پایین ریزاندامگانها در چنین سامانه‌هایی، و به تبع آن بازدهی پایین این سامانه‌ها، سبب شده است سامانه‌های هوازی برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی کاربرد گسترده‌تری داشته باشند [۱۷].

مواد، آب گریزی و یا آب دوستی غشاء است [۴]. غشاء می تواند از مواد مختلف آلی یا معدنی ساخته شود و این مواد را می توان در گروه های بسیاری، سرامیکی، فلزی و مایع دسته بندی کرد. جنس غشاء باید از مقاومت الکتریکی، گرمایی و شیمیایی لازم برخوردار و در برابر گرفتگی نیز مقاوم باشد. بسیاری از غشاهای به کار گرفته در MBR شامل پلی ونیلیدن دی فلوراید، پلی اتیلن سولفون، پلی اتیلن، پلی پروپیلن اند. غشاهای یاد شده در بالا قابلیت شکل گیری و مقاومت شیمیایی قابل قبولی دارند و در اصل آب گریزند که توسط روش های شیمیایی سطح آنها قابلیت آبدوستی یافته است.

#### ۴-۴ مدل غشاء

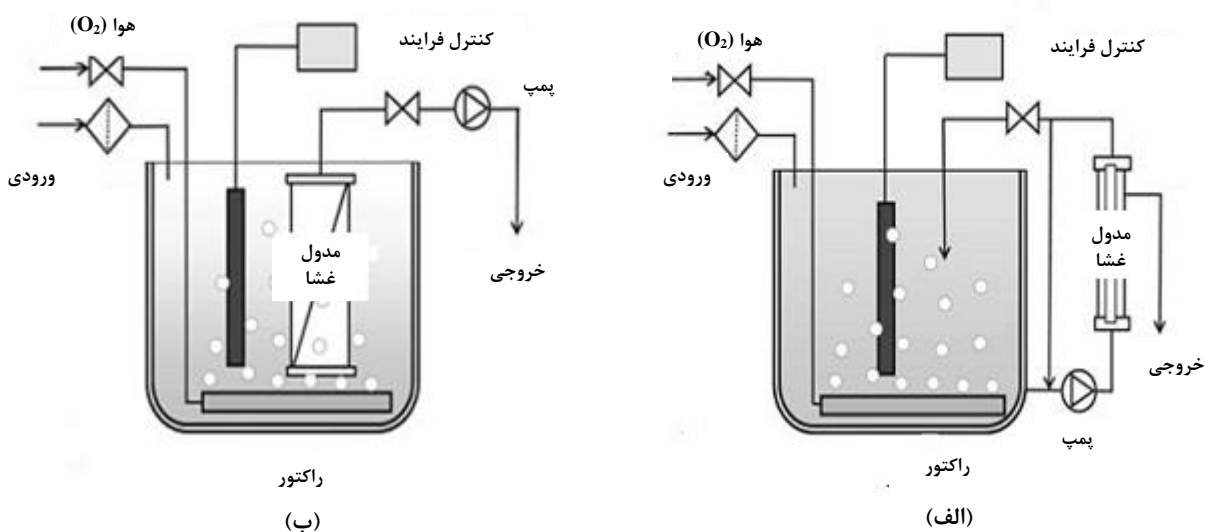
بر اساس شکل هندسی غشاء، مدل های گوناگونی چون FS، قاب و صفحه، لوله ای، HF، پیچشی، صافی کارتریج و لوله ای موین طراحی و ساخته شده است. مدل های FS (به دلیل امکان تهیه آن از مواد مختلف و نیز مصرف انرژی کم) و HF (دارای نسبت سطح به حجم زیاد اما گرفتگی سریع و قابلیت استفاده از شستشوی معکوس برای رفع گرفتگی) در MBR غوطه ور به کار گرفته شده اند. در MBR جانبی از مدل های لوله ای بهره می گیرند که برای سرعت های بالا و جریان هایی با گرانی زیاد مناسب اند [۴].

#### ۲-۴ طبقه بندی سازه ای زیست راکتورهای غشایی

از نظر سازه ای و ساختار، MBRها بر اساس محل قرار گرفتن غشاء به دو دسته کلی MBRهای غوطه ور و MBRهای جانبی تقسیم بندی می شوند. مطابق شکل (۳)، در MBR غوطه ور، غشاء درون محفظه راکتور قرار می گیرد و خروجی راکتور از درون غشاء مکیده می شود. در حالی که در MBR جانبی غشاء خارج از راکتور قرار دارد و مخلوط درون راکتور از روی آن عبور می کند. هر دو دسته با بهره گیری از تنش روی سطح غشاء از گرفتگی غشاء جلوگیری می کنند. MBR غوطه ور از طریق هوادهی و MBR جانبی از طریق پمپ تنش لازم را تأمین می کنند. در MBRهای غوطه ور میزان فشار عبوری غشاء (TMP) حدود ۰/۵ بار و شار خروجی حدود ۱۵-۵۰ L/m<sup>2</sup>.h است، در حالی که در MBR جانبی میزان فشار عبوری غشاء حدود ۱ تا ۴ بار و شار خروجی حدود ۵۰-۱۲۰ L/m<sup>2</sup>.h است [۱،۴].

#### ۳-۴ جنس غشاء

چگونگی کارکرد غشاء به کمک خواص فیزیکی و شیمیایی آن مشخص می شود. خواص فیزیکی شامل اندازه و شکل حفره های موجود در غشاء، و نوع آنها و خواص شیمیایی غشاء شامل بار سطحی، توانایی جذب اجسام دیگر و امکان انجام واکنش با سایر



شکل ۳. نمایشی از (الف) MBR جانبی، و (ب) MBR غوطه ور [۵].

## ۵. پارامترهای مهم در زیست‌راکتور غشایی

پارامترهای مهم در زیست‌راکتورهای غشایی را می‌توان به طور کلی به دو دسته پارامترهای عملیاتی و پارامترهای وابسته به خصوصیات زیست‌توده تقسیم‌بندی کرد. دسته دوم پارامترهایی‌اند که به طور کلی تحت تأثیر پارامترهای دسته اول قرار می‌گیرند.

### ۵-۱ پارامترهای عملیاتی

به نظر می‌رسد که پارامترهای عملیاتی مختلفی بر اجرای عملیات تصفیه MBR تأثیر دارد، ولی نتایج پیشنهاد شده از جانب پژوهشگران، بسته به سامانه‌های به کار برده شده فرق می‌کند. از جمله مهم‌ترین پارامترهای عملیاتی مورد بررسی در عملکرد MBR می‌توان به HRT، SRT، غلظت، و نوع خوراک ورودی، هوادهی، عملکرد غشا و گرفتگی غشا اشاره کرد. در ادامه، به نقش برخی از این پارامترها خواهیم پرداخت.

### ۵-۱-۱ زمان ماند هیدرولیکی (HRT)

HRT یکی از پارامترهای مهم عملیاتی در فرایند MBR به‌شمار می‌آید که نه تنها بر بازدهی سامانه بلکه بر روی خواص زیست‌توده و لجن فعال نیز تأثیر می‌گذارد [۱۸]. در متون مختلف، با تغییر HRT آثار متناقضی بر عملکرد سامانه MBR در تصفیه فاضلاب گزارش شده است. در برخی متون دیده شد که این کاهش تأثیری بر بازده حذف COD نداشت [۲۲-۱۹]. اما بر اساس گزارش پنداشته<sup>۱</sup> و همکاران [۲۳]، کاهش HRT از طریق کاهش زمان تماس بین آلاینده‌ها و ریزاندامگانها به کاهش بازده حذف COD منجر شد.

### ۵-۱-۲ غلظت و نوع خوراک ورودی و مواد مغذی

علاوه بر غلظت اولیه COD در خوراک ورودی به راکتور و ماهیت ترکیبات تشکیل‌دهنده آن، نسبت مواد مغذی ورودی به COD خوراک نیز پارامتر مهم دیگر عملیاتی در فرایند MBR به‌شمار می‌آید که نه تنها بر بازدهی سامانه، بلکه بر خواص زیست‌توده و لجن فعال نیز تأثیر می‌گذارد. در متون مختلف، با افزایش COD آثار متناقضی بر عملکرد سامانه MBR در تصفیه فاضلاب گزارش شده است. بر اساس مطالعات تروچ و هولر<sup>۲</sup> [۲۴] و پنداشته و

همکاران [۲۳]، افزایش OLR ورودی از طریق افزایش COD در خوراک به رشد بیشتر ریزاندامگانها و در نتیجه افزایش بازده حذف COD انجامید. در برخی گزارش‌ها، افزایش غلظت COD خوراک به دلیل حضور ترکیبات سخت یا دیر تجزیه‌پذیر موجود در خوراک، و یا آثار سمی آن منجر به کاهش بازده حذف شده است. فلاح<sup>۳</sup> و همکاران [۲۵] با افزایش غلظت ماده سمی استایرن در خوراک، تغییر ریخت‌شناسی لجن فعال را از حالت توده‌ای یا قله‌ای به صورت رشد پراکنده و دارای سلول‌های آزاد مشاهده کردند که به افزایش گرفتگی و کاهش درصد حذف منجر شد.

علاوه بر غلظت و نوع خوراک ورودی، نقش مواد مغذی نیتروژن و فسفر (N و P) و نسبت COD:N:P نیز پارامتر مهم عملیاتی دیگری در MBR برای تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی به‌شمار می‌آید که نه تنها بر عملکرد سامانه، بلکه به دلیل تأثیر بر روی خواص فیزیکی شیمیایی ریزاندامگانها و ترکیب درصد شیمیایی زیست‌توده بر گرفتگی غشا نیز تأثیر می‌گذارد. همچنین، نسبت COD:N:P بر مقدار EPS و ترکیبات پروتئینی و کربوهیدراتی آن و در نتیجه عملکرد غشا نیز تأثیر می‌گذارد. مطالعات زیادی در زمینه تأثیر نسبت COD:N بر روی خواص لجن، شامل ته‌نشینی، توانایی توده‌ای شدن و صافش انجام شده است [۲۶]. مطالعات دیگری نیز در حوزه تأثیر نسبت COD:N بر عملکرد حذف مواد مغذی و همچنین نیترودارشدن و نیتروزدایی [۲۷، ۲۸] انجام شده است. برخی مطالعات با افزایش نسبت COD:N، افزایش در تولید EPS را در تصفیه فاضلاب شهری [۲۹، ۳۰] و برخی دیگر کاهش در غلظت EPS را مشاهده کرده‌اند [۲۶]. هاوا<sup>۴</sup> و همکاران مشاهده کردند که با افزایش نسبت COD:N از ۵:۱۰۰ به ۱/۸:۱۰۰ عملکرد غشا بهتر شده و گرفتگی دیرتر اتفاق افتاده است [۲۶].

### ۵-۱-۳ زمان ماند لجن (SRT)

کنترل زمان ماند لجن از طریق حذف متناوب مقداری لجن از سامانه، صورت می‌گیرد. زمان ماند لجن در زیست‌راکتور غشایی را رابطه (۱) تعیین می‌کند:

$$\theta_c = \frac{V}{Q_w} \quad (1)$$

3. Fallah  
4. Hao

1. Pendashteh  
2. Holler and Trosch

$V$  حجم راکتور ( $m^3$ )،  $Q_w$  میزان لجن دفعی از راکتور ( $L/day$ ) و  $\theta_c$  زمان ماند لجن ( $day$ ) است.

SRT یکی از پارامترهای مهم در عملکرد MBR و نمایانگر مدت زمانی است که ریزاندامگانها در زیست راکتور اقامت دارند. در صورت کم بودن زمان ماند، غلظت زیست توده در MBR پایین خواهد بود. در حالی که در صورت طولانی بودن زمان ماند، سن ریزاندامگانها در زیست راکتور بالا می رود و در نتیجه بخشی از آنها از بین می روند؛ در نتیجه، نسبت زیست توده فعال در لجن کاهش می یابد.

برخی پژوهشگران، سامانه MBR را با SRT بالا اجرا کرده اند، زیرا معتقدند که غلظت بالاتر زیست توده بازدهی تصفیه را بالا می برد و حتی در برخی تحقیقات این زمان بی نهایت در نظر گرفته شده و نتیجه با بازدهی مطلوب و بدون مشکل اجرا شده است [۳۱، ۳۲]. اما برخی پژوهشگران معتقدند که رابطه خطی بین بازدهی تصفیه و غلظت زیست توده برقرار نیست، زیرا ممکن است فعالیت زیستی در غلظت بالای زیست توده، به دلیل کاهش نسبت خوراک به ریزاندامگان  $(F/M)^1$  و در نتیجه کمبود رشد مایه کاهش یابد [۳۳].

#### ۴-۱-۵ هوادهی

هوادهی، علاوه بر تأمین اکسیژن مورد نیاز رشد زیست توده، با تزریق یکنواخت از زیر مدول غشا از طریق نازل های هوادهی و ایجاد تنش برشی در سطح غشا و پاک کردن سراسر سطح غشا، به کاهش گرفتگی سطح غشا و افزایش عملکرد MBR می انجامد. بنابر نتیجه مطالعات انجام شده، وجود حباب های کوچک تر هوا سبب افزایش انتقال اکسیژن بین فاز گازی و مایع و در نتیجه فراهم کردن اکسیژن مناسب تر برای زیست توده شده است. اما از سویی، وجود حباب های درشت تر باعث جلوگیری بیشتر از پدیده گرفتگی شده است [۳۴]. هوادهی به منظور جلوگیری از گرفتگی می تواند از طریق تزریق کننده های جریان هوای مخصوص و مستقل از تزریق هوا برای زیست توده انجام شود. با وجود این که بیشتر MBRها در مقیاس صنعتی از ورود هوا برای کنترل گرفتگی بهره می گیرند، ولی به علت فقدان درک سازوکار، بهینه سازی هوادهی مسئله حل شده ای محسوب نمی شود. توزیع نامناسب هوادهی یکی از مشکلات اساسی در MBR به شمار می آید که به مشکلات ثانویه متعددی در سامانه

می انجامد [۷].

افزایش شدت هوادهی در MBR غوطه ور باعث بهبود شرایط هیدوردینامیکی سامانه می شود. با این احوال، افزایش شدت هوادهی می تواند منجر به افزایش هزینه انرژی، فروپاشی توده های لجن، تولید ذرات با ابعاد کوچک تر و رهاسازی EPS بیشتر شود که تأثیر منفی بر گرفتگی غشا و عملکرد سامانه می گذارد. بنابراین، باید حد بهینه ای برای آن وجود داشته باشد [۵]. مطالعات قبلی نشان داده که افزایش بازده حذف کیک تشکیل شده بر سطح غشا از طریق هوادهی، رابطه متناسبی با افزایش سرعت هوادهی ندارد و یک مقدار بهینه سرعت هوادهی برای حذف کیک لازم است [۳۳].

#### ۵-۱-۵ عملکرد غشا

عملکرد غشا نمایانگر کارایی آن در مدت زمان طولانی همراه با شستشوست. خصوصیات مدول و غشا، بار هیدرولیکی، خصوصیات زیست توده و فاضلاب، پیش تصفیه فاضلاب، طراحی زیست راکتور، نوع بهره برداری، دمای آب و استانداردهای خروجی فاضلاب از عوامل موثر تأثیرگذار در عملکرد غشا به شمار می آیند [۳۵].

روش پخش کردن گاز به عنوان یکی از روش های موثر برای کنترل گرفتگی غشاء به منظور افزایش عملکرد آن شناخته شده است، که با ایجاد یک چرخش داخلی برای توده سیال، آشفته گی و اغتشاشی در سامانه پدید می آورد که نتیجه آن کاهش قطبی شدن غلظتی است. از طریق تنش ایجاد شده به واسطه جریان لجن نیز لایه کیک روی سطح غشاء از بین می رود و سطح غشاء در داخل زیست راکتور تمیز می شود. این روشی ساده و مقرون به صرفه محسوب و سبب افزایش شار خروجی می شود [۳۶]. هرچند پخش کردن گاز پر کاربردترین روش در کاهش گرفتگی است، اما روش های دیگری چون شستشوی معکوس، ضربان معکوس با تناوب زیاد، ضربان با تناوب بالا، چرخه مکش-استراحت و شستشوی شیمیایی نیز در MBR برای رفع گرفتگی و کاهش مقاومت به کار گرفته شده است [۱، ۴].

#### ۵-۱-۶ گرفتگی غشا

گرفتگی غشاء از مشکلات عمده در ارتباط با فناوری غشایی و مشکل اصلی کاربرد تجاری فرایندهای غشایی به شمار می آید. در

1. Food/ Microorganisms

سال‌های اخیر، تعداد بی‌شماری مقاله به بررسی پدیده گرفتگی غشاء و بررسی پارامترهای مؤثر در عملکرد صافش در MBR همت گمارده‌اند. مرورهای تفصیلی مطلوبی از یافته‌های نو درباره گرفتگی غشاء تاکنون ارائه شده است [۵،۷،۳۷،۳۸].

گرفتگی غشاء به واسطه نشست و رسوب ذرات جامد و محلول، هم روی سطح غشاء و هم درون حفره‌های آن اتفاق می‌افتد. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه سازوکارهای گرفتگی غشاء (شامل مدل‌های ریاضی) و نیز روی روش‌های کاهش پدیده گرفتگی و افزایش مدت زمان عملکرد غشاء، قبل از تمیز کردن شیمیایی، صورت پذیرفته است. گرفتگی، مقاومت غشاء را از طریق جذب، ته نشینی یا چسبندگی ذرات و سلول‌های میکروبی به سطح غشاء افزایش می‌دهد. گرفتگی غشاء نه تنها از ماهیت شیمیایی غشاء، بلکه از پارامترهای عملیاتی چون HRT و SRT نیز تأثیر می‌پذیرد. همچنین، پارامترهای زیستی چون EPS، SMP، ریخت‌شناسی لجن، PSD و گرانروی مخلوط لجن از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر گرفتگی غشاء معرفی شده‌اند [۵،۷،۳۷،۳۸].

### ۵-۲-۳ محصولات میکروبی

#### ۵-۲-۳-۱ مواد بسیاری خارج سلولی (EPS)

مواد بسیاری خارج سلولی چسبیده به سلول، مواد تشکیل‌دهنده زیست‌پوسه‌ها، توده‌ها، لخته‌ها و گرانول‌ها هستند. این مواد، شامل ترکیبات مختلفی از درشت‌مولکول‌ها نظیر پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها، اسیدهای هسته‌ای، فسفولیپیدها، اسیدهای هیومیک و ترکیبات بسیاری دیگری‌اند که در خارج سطح سلول‌ها و یا فضای بین سلولی انباشته می‌شوند [۴۵،۴۶]. پروتئین‌ها و آمینواسیدها ترکیبات و اجزای آبگریز EPS را تشکیل می‌دهند، در حالی که پلی‌ساکاریدها آب دوست‌اند. EPSها متشکل از مواد نامحلول (شامل پوسته، بسپارهای کپسولی، ژل‌های متراکم و بسپارهای سست‌پیوند) هستند که به واسطه ترشح تولید و از سطح سلول خارج می‌شوند. EPS جزء اصلی مواد آلی لجن و دارای وظایف متعددی شامل گردآوردن و انباشتن یاخته‌های باکتری در گرانول‌ها، توده‌ها و زیست‌پوسه‌ها، تشکیل سد و مانع حفاظت‌کننده در پیرامون باکتری‌ها، نگهداری آب و چسبیدن به سطوح است. با توجه به ساختار ناهمگن و ماهیت متغیر، EPSها قادر به تشکیل ماتریس ژلی با قابلیت جذب آب بالا هستند که سلول‌های میکروبی درون آن قرار می‌گیرند.

پارامترهایی چون نوع فاضلاب، سن لجن، غلظت MLVSS، گرانروی، تنش‌های مکانیکی، غلظت نیترات، نسبت F/M، فاز رشد، پخش گاز و میزان هوادهی، غلظت اکسیژن محلول، OLR، SRT و HRT بر مشخصات EPS در زیست‌راکتورهای غشایی تأثیر

سال‌های اخیر، تعداد بی‌شماری مقاله به بررسی پدیده گرفتگی غشاء و بررسی پارامترهای مؤثر در عملکرد صافش در MBR همت گمارده‌اند. مرورهای تفصیلی مطلوبی از یافته‌های نو درباره گرفتگی غشاء تاکنون ارائه شده است [۵،۷،۳۷،۳۸].

گرفتگی غشاء به واسطه نشست و رسوب ذرات جامد و محلول، هم روی سطح غشاء و هم درون حفره‌های آن اتفاق می‌افتد. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه سازوکارهای گرفتگی غشاء (شامل مدل‌های ریاضی) و نیز روی روش‌های کاهش پدیده گرفتگی و افزایش مدت زمان عملکرد غشاء، قبل از تمیز کردن شیمیایی، صورت پذیرفته است. گرفتگی، مقاومت غشاء را از طریق جذب، ته نشینی یا چسبندگی ذرات و سلول‌های میکروبی به سطح غشاء افزایش می‌دهد. گرفتگی غشاء نه تنها از ماهیت شیمیایی غشاء، بلکه از پارامترهای عملیاتی چون HRT و SRT نیز تأثیر می‌پذیرد. همچنین، پارامترهای زیستی چون EPS، SMP، ریخت‌شناسی لجن، PSD و گرانروی مخلوط لجن از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر گرفتگی غشاء معرفی شده‌اند [۵،۷،۳۷،۳۸].

### ۵-۲ پارامترهای مربوط به خصوصیات زیست‌توده

#### ۵-۲-۱ میزان زیست‌توده (MLVSS)

از آنجا که درجه تصفیه فاضلاب به مقدار ریزاندامگان‌های موجود در سامانه بستگی دارد، میزان زیست‌توده نیز از جمله پارامترهای مهم به‌شمار می‌آید. چنانچه مقدار ریزاندامگان برای جذب بار آلی کافی نباشد، قسمتی از COD از سامانه خارج می‌شود و کیفیت فاضلاب خروجی افت می‌کند.

برای اطمینان از وجود ریزاندامگان کافی برای تجزیه کامل COD ورودی، باید نسبت F/M در حد مناسبی حفظ شود. نسبت F/M و سن لجن امکانی را فراهم می‌آورد تا بتوان میزان مطلوب MLVSS را در سامانه حفظ کرد [۳۹]. این پارامتر از جمله عواملی است که تحت تأثیر موارد مختلفی چون پارامترهای عملیاتی، از جمله SRT و HRT، همچنین نوع و میزان OLR، قرار می‌گیرد.

#### ۵-۲-۲ توزیع ابعاد ذرات (PSD)

توده‌های باکتریایی شامل گستره وسیعی از ابعاد ذرات است که در محدوده ۰/۵ تا ۵ میکرومتر برای باکتری‌های تک سلولی و تا بیش

گفته می‌شود که از متلاشی شدن سلول‌ها و یا در خلال سوخت‌وساز رشدمایه آزاد و به محلول منتقل می‌شوند [۵۵،۵۶]. مفاهیم EPS، محلول و SMP یکسان است (شکل ۴). SMPها متشکل از مواد آلی متعددی نظیر پلی ساکاریدها ( $SMP_c$ )، پروتئین‌ها ( $SMP_p$ )، اسیدهای هسته ای و هیومیک‌اند [۷،۱۶].

SMP می‌تواند به دو دسته محصولات مرتبط با مصرف رشدمایه (UAP)<sup>۱</sup> که به طور مستقیم در طی سوخت و ساز رشدمایه و رشد زیست‌توده تولید می‌شوند، و محصولات مرتبط با زیست‌توده (BAP)<sup>۲</sup> که احتمالاً در فرایند تجزیه زیست‌توده تشکیل می‌شوند، تقسیم شود [۵۷،۵۸]. BAPها عموماً شامل مواد آلی با اندازه درشت مولکولی، آروماتیک، آبگریز و دارای پیوند دوگانه‌اند، که در سامانه‌های غشایی توسط غشاء درون سامانه نگه داشته شده و پس از گذشت زمان کافی توسط مخلوط میکروبی به ترکیبات با وزن مولکولی کوچکتر تبدیل می‌شوند. به طور کلی، ترکیبات UAP راحت‌تر و سریع‌تر از BAP توسط مخلوط میکروبی تجزیه می‌شوند [۵۸،۵۹]. در SRT طولانی BAP جزء غالب SMP به‌شمار می‌آید [۶۰،۶۱].

پارامترهای تأثیرگذار فرایندی بر تولید عبارت‌اند از SMP در سامانه لجن فعال متداول، شامل HRT، نوع خوراک و رشدمایه، SRT، دما، OLR، نوع راکتور، اکسیژن محلول، ریخت‌شناسی، لجن و غلظت زیست‌توده می‌باشد [۵۶].

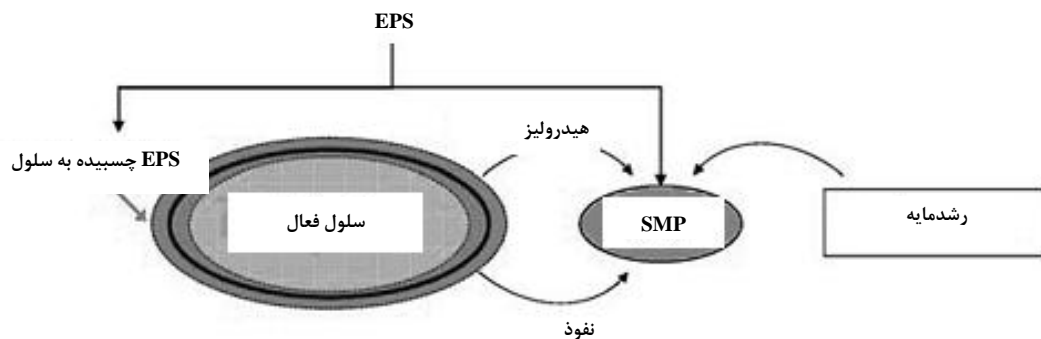
می‌گذارند [۵۰-۵۱، ۴۷، ۱۸، ۷]. تحقیقات نشان می‌دهد که OLR و HRT از جمله پارامترهای عمده عملیاتی مؤثر برای میزان تولید EPS به‌شمار می‌آیند [۱۸، ۷، ۵۱].

بنابر نتایج تحقیقات بسپار، EPS یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر گرفتگی غشاء است. EPS عامل تشکیل کیک گزارش شده و رابطه بین مقاومت کیک تشکیل شده بر روی غشاء و EPS ارائه شده است [۷، ۱۶]. در تحقیقات مختلف دیده شده که کاهش در اجزای کربوهیدرات و پروتئین EPS، به گسستگی لخته‌های لجن فعال، و در نتیجه ایجاد ذراتی با ابعاد کوچکتر انجامیده، که سبب افزایش گرفتگی غشاء شده‌اند [۱۳، ۵۲]. اما در تحقیقات دیگر، افزایش EPS در نتیجه حجیم شدن لخته‌های لجن، به افزایش گرفتگی غشاء انجامیده است [۵۴ و ۵۳ و ۳۱ و ۷].

همچنین، بین EPS با سایر خواص لجن، چون شاخص حجمی لجن، توانایی توده‌سازی، آبگریزی، بار سطحی و گرانیروی لجن، رابطه مکانیکی برقرار است. بنابراین، با در نظر گرفتن اهمیت نقش EPS و اجزای آن، در خواص لجن و گرفتگی غشاء کنترل میزان این پارامتر برای دستیابی به بازدهی زیاد در فرایندهای غشایی بسیار ضروری است [۷].

#### ۵-۲-۳-۲ محصولات محلول میکروبی (SMP)

محصولات محلول میکروبی به ترکیبات سلولی محلولی



شکل ۴. نمودار ساده‌ای از EPS و SMP [۱۶].

1. Utilization Associated Products
2. Biomass Associated Products

پایداری کلوئیدی پیشنهاد شده است. در این مدل، نیروی واندروالس و نیروی رانش الکتروستاتیکی برقرار شده از طریق نفوذ داخلی لایه دوگانه الکتریکی برای توصیف برهمکنش بین ذرات به هم اضافه می‌شوند. برهمکنش‌های عمده غیر از DLVO نیز نظیر برهمکنش‌های فضایی، برهمکنش‌های آبریزی و پیچیدگی‌های بسیاری برای توصیف لخته شدن لجن فعال و سایر توده‌های باکتریایی در متون مختلف پیشنهاد شده است [۴۰].

اما، به طور کلی EPS به‌عنوان عامل اصلی برای تجمع تک باکتری‌ها و تبدیل آنها به لخته شناخته شده است [۶۷-۷۰]. اما غلظت بالای EPS به دلیل رانش قوی الکتروستاتیکی بین اجزاء با بار منفی زیاد که بر پایه نظریه DLVO توصیف می‌شود [۷۱]، جذب آب [۵۴،۷۲] و ممانعت فضایی [۶۹]، سبب فشردگی و لخته شدن ضعیف لجن، و در نتیجه حجیم شدن لخت<sup>۳</sup> می‌شود. همچنین، مشخص شده است که خواص سطحی، آبریزی، بار سطحی و ترکیب EPS بیش از مقدار آن بر توده‌سازی موثر است [۶۷-۷۴، ۷۳، ۶۹].

طی مطالعات گوناگون، تأثیر اجزای EPS، شامل پروتئین، پلی ساکارید، چربی و مواد هیومیک بر خواص لخته‌ها، از جمله قدرت آنها، اندازه و خواص سطح نشان داده است [۶۷، ۶۸، ۷۳]. در برخی متون به اهمیت بیشتر پروتئین‌ها در توده‌سازی اشاره شده است [۴۰، ۶۸، ۴۶]. در حالی که در برخی مطالعات دیگر، پلی ساکاریدها نقش پررنگ‌تری در تشکیل لخته‌های لجن فعال دارند [۵۶، ۷۵]. در برخی متون نیز به نقش منفی هیومیک اسید در تشکیل لخته اشاره شده است [۴۰، ۷۰، ۷۶]. از سوی دیگر، لیاو<sup>۴</sup> و همکاران [۶۹] هیچ رابطه‌ای بین EPS کل و اجزایش با توانایی لخته شدن مشاهده نکردند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که تأثیر نسبت بین اجزای اصلی EPS از مقدار آنها بر لخته شدن مهم‌تر است. بنابراین، نسبت مناسب پروتئین به پلی ساکارید برای لخته شدن لازم است [۶۷]. بنابراین، نتایج مختلف نشان‌دهنده پیچیده بودن تأثیر اجزای مختلف EPS روی لخته شدن است.

از هم پاشیدگی لخته (تشکیل لخته بسیار کوچک و یا تولید نشدن لخته) سبب بروز مشکلاتی چون تشکیل لخته‌های سوزنی و یا سلول‌های آزاد و پراکنده، و در نتیجه کدورت زیاد خروجی

در تحقیقات بسیاری، SRT عامل اصلی تأثیرگذار بر میزان SMP و اجزای آن گزارش شده است. برخی این تأثیر را مستقیم و برخی دیگر معکوس دانسته‌اند. تحقیقات بسیاری نشان داده که در SRT پایین میزان SMP بالاتر است [۵۳، ۶۲]. در تحقیقات دیگر، مشاهده شده که افزایش OLR منجر به افزایش جزء UAP انجامیده است [۵۲، ۶۳].

در خلال عبور مایع از غشاء MBR، SMP بر روی سطح غشاء جذب شده و باعث پرکردن حفره‌های غشاء و تشکیل ساختاری ژل مانند بر سطح غشاء می‌شود و ضمن فراهم آوردن منبع غذایی برای تشکیل زیست پوسه، مقاومت هیدرولیکی در برابر جریان خروجی ایجاد می‌کند [۷]. اخیراً، تأثیر SMP بر گرفتگی غشاء در MBR توجه زیادی را به خود جلب کرده است و بنابر تحقیقات فراوان، SMP اثر دامنه‌داری بر گرفتگی غشاء می‌گذارد و در بسیاری از آنها تأثیر آن از EPS مهمتر بوده است [۷، ۶۴، ۶۵]. تا جایی که گاهی SMP را به عنوان عامل اصلی در گرفتگی برگشت‌ناپذیر غشاء معرفی کرده‌اند [۱۶]. همچنین، تحقیقات نشان داده‌اند که غلظت، اجزاء و ترکیب SMP تعیین‌کننده پتانسیل گرفتگی آن به‌شمار می‌آیند [۶۶].

#### ۵-۲-۴ ریخت‌شناسی زیست‌توده

در سامانه لجن فعال، لخته شدن زیستی زیست‌توده دلیل اصلی جداسازی جامد-مایع است. از جمله دلایل جداسازی ضعیف جامد-مایع در سامانه‌های تصفیه فاضلاب می‌توان به حجیم شدن لجن ناشی از رشد بیش از اندازه باکتری‌های رشته‌ای<sup>۱</sup>، حجیم شدن لجن ناشی از میزان بالای تولید EPS و یا تشکیل لخته‌های کوچک و باکتری‌های آزاد پراکنده اشاره کرد [۶۷].

به‌طور کلی، دو سازوکار، مدل پل‌های بسیاری و مدل برهمکنش‌های کلوئیدی (مدل DLVO<sup>۲</sup>)، برای تشکیل لخته‌های میکروبی پیشنهاد شده است. در مدل پل‌های بسیاری، EPS که شامل گروه‌هایی با بار منفی است، از طریق کاتیون‌های دو ظرفیتی و سه ظرفیتی به یکدیگر متصل می‌شوند و شبکه بسیاری بزرگی را تشکیل می‌دهند که اجزای مختلف لخته شامل باکتری‌های مجزا و یا کلونی باکتری‌ها در آن غوطه‌ور می‌شود. در مدل برهمکنش کلوئیدی، برهمکنش بین اجزای لخته، به اعتبار نظریه DLVO برای

3. EPS Bulking or Viscouse Bulking  
4. Liao

1. Filamentous Bulking  
2. Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek

صافی کارتریج و لوله‌ای موبین تهیه شده است که مدول‌های FS و HF در MBR غوطه‌ور استفاده شده‌اند. به منظور رسیدن به کیفیت مطلوب فاضلاب تصفیه شده و کاهش گرفتگی در سامانه‌های MBR، عوامل متعددی باید بهینه‌سازی شود. پارامترهای مهم در MBR را به طور کلی به دو دسته پارامترهای عملیاتی و پارامترهای وابسته به خصوصیات زیست‌توده می‌توان تقسیم‌بندی کرد. دسته دوم پارامترهایی‌اند که به طور کلی تحت تأثیر پارامترهای دسته اول قرار می‌گیرند. پارامترهای عملیاتی تأثیرگذار بر عملکرد MBR، شامل HRT، SRT و غلظت و نوع خوراک ورودی، هوادهی، عملکرد غشا و گرفتگی غشا و نیز پارامترهای مربوط به خصوصیات زیست‌توده، مانند غلظت زیست‌توده، PSD، محصولات میکروبی (EPS و SMP) و ریخت‌شناسی زیست‌توده است. در مقالات مختلف، آثار متناقضی بر افزایش یا کاهش هر یک از این پارامترها نسبت عملکرد سامانه MBR مطرح شده است.

## ۷. تشکر و قدردانی

از زحمات و راهنمایی‌های ارزشمند جناب آقای دکتر بابک بنگدارپور سپاس فراوان ابراز می‌شود.

## مراجع

- [1] Marrot, B., Barrios-Martinez, A., Moulin, P., Roche, N., "Industrial wastewater treatment in a membrane bioreactor: A review", *Environmental Progress*, 23, 59-68, (2004).
- [2] Abdollahzadeh Sharghi, E., Bonakdarpour, B., Roostazadeh, P., Rabbani, A. R., Amoozegar, M.A., "The biological treatment of high salinity synthetic oilfield produced water in a submerged membrane bioreactor using a halophilic bacterial consortium", *Chemical Technology and Biotechnology*, 88(16), 2016-2026, (2013).
- [3] Abdollahzadeh Sharghi, E., Bonakdarpour, B., Pakzadeh, M., "Treatment of hypersaline produced water employing a moderately halophilic bacterial consortium in a membrane bioreactor: Effect of salt concentration on organic removal performance, mixed liquor characteristics and membrane fouling", *Bioresource Technology*, 164, 203-213, (2014).
- [4] Judd, S., Judd, C., "The MBR Book: Principles and Application of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment", 2th ed., Oxford, Elsevier, (2011).

می‌شود [۷۷، ۷۹]. از هم پاشیدگی لخته می‌تواند ناشی از شرایط عملیاتی و یا تنش‌های محیطی شامل افزایش ناگهانی دما، مواد سمی و فلزات سنگین (سرب، مس، روی و کادمیم)، غلظت مواد آلی، اکسیژن محلول، غلظت بالای کاتیون‌های تک ظرفیتی نسبت به دو ظرفیتی و خواص مواد مغذی باشد [۷۷]. فرایند تشکیل و از هم گسستگی لخته Lجن فعال به تغییرات شرایط عملیاتی همچون HRT، SRT، F/M و OLR نیز بستگی دارد. مثلاً، گزارش شده است، SRT پایین در MBR سبب افزایش میزان سلول‌های آزاد و کاهش ESP در لجن شده است، از این‌رو ریزاندامگانها توانایی لازم برای تشکیل لخته را از دست می‌دهند. به علاوه، به دلیل دسترسی کافی به رشدمایه، ریزاندامگانها تمایل دارند آزادانه رشد کنند [۴۴]. در مقابل، پژوهشگران دیگری نشان دادند که با افزایش SRT میزان EPS کل و نیز نسبت پروتئین به پلی ساکارید در لخته کاهش می‌یابد و در نتیجه کاهش در ابعاد لخته، گسیختگی انبوهه و افزایش ریزاندامگان‌های آزاد برقرار شده است [۴۲]. برخی پژوهشگران نشان دادند که F/M زیاد بر ابعاد متوسط ذرات تأثیر می‌گذارد و ذرات بزرگتر با پایداری کمتر تولید می‌کند [۷۹]. بار آلی بسیار بالا سبب شکست لخته می‌شود.

## ۶. نتیجه‌گیری کلی

MBR ادغام سامانه سامانه زیستی و غشایی است که نسبت به سایر روش‌های زیستی سنتی دارای مزایای زیادی چون کیفیت بالای پساب خروجی، ظرفیت گندزدایی زیاد، کنترل SRT مستقل از HRT، غلظت بیشتر زیست‌توده، حذف مقادیر زیادی آلاینده‌های آلی و معدنی، ظرفیت حمل زیاد بار آلی ورودی، کوچکتر بودن ابعاد و تولید لجن کمتر است و از این رو در سه دهه اخیر به طور گسترده‌تری برای تصفیه انواع مختلف فاضلاب شهری و صنعتی به کار گرفته شده‌اند.

انواع MBR از نظر میزان هوادهی به دو دسته هوازی و بی‌هوازی و از لحاظ ساختاری به دو دسته MBR غوطه‌ور و MBR جانبی تقسیم‌بندی می‌شوند. غشاء می‌تواند از مواد مختلف آلی یا معدنی ساخته شود و این مواد را می‌توان در گروه‌های بسپاری، سرامیکی، فلزی و مایع دسته‌بندی کرد. بر اساس شکل هندسی غشاء، مدول‌های گوناگونی چون FS، قاب و صفحه، لوله‌ای، HF، پیچشی،

- [5] 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*, 42, 677-740, (2012).
- [6] Alaboud. T. M., "Membrane bioreactor for wastewater reclamation-Pilot plant study in Jeddah, Saudi Arabia", *Research Journal of Environmental Sciences*, 3(2), 267-277, (2009).
- [7] Meng, F., Chae, S. R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H. S., Yang, F., "Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material", *Water Research*, 43, 1489-1512, (2009).
- [8] Lesjean, B., Huisjes, E. H., "Survey of the European MBR market: trends and perspectives", *Desalination*, 231, 71-81, (2008).
- [9] Frost and Sullivan, The membrane bioreactor market in China files high, 10 August, (2011).
- [10] Asia Pacific Advanced Network (APAN), Wastewater treatment systems using membrane bioreactors (MBR) for separation of activated sludge, 23 April, (2012).
- [۱۱] نوروزی، فرود، "بررسی کاربرد فناوری بیوراکتورهای غشایی در تصفیه فاضلابهای نفتی"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شریف، (۱۳۸۲).
- [۱۲] گرامی وار، فرزانه، "مطالعه و بررسی تصفیه پذیری فاضلاب روغن موتور با بیوراکتور غشایی گرما دوست"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شریف، (۱۳۸۸).
- [۱۳] فلاح، نرگس، "حذف زیستی استاتین از فاضلاب پتروشیمی با استفاده از زیست راکتورهای غشایی"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۸۸).
- [۱۴] عبداللهزاده شرقی، الهام، "تصفیه زیستی آب تولیدی میدان نفتی در زیست راکتور غشایی"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۹۱).
- [15] Brindle, K., Stephenson, T., "The application of membrane biological reactors for the treatment of wastewater", *Biotechnology and Bioengineering*, 49(6), 601-610, (1996).
- [16] Le-Clech, P., Chen, V., Fane, T. A. G., "Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment", *Journal of Membrane Science*, 284, 17-53, (2006).
- [17] Hu, A. Y., Stuckey, D. C., "Activated carbon addition to a submerged anaerobic membrane bioreactor: effect on performance, transmembrane pressure, and flux", *Journal of Environmental Engineering - ASCE*, 133(1), 73-80, (2007).
- [18] Meng, F., Shi, B., Yang, F., Zhang, H., "Effect of hydraulic retention time on membrane fouling and biomass characteristics in submerged membrane bioreactors", *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 30, 359-367, (2007).
- [19] Pajoum Shariati, S. R., Bonakdarpour, B., Zare, N., Zokaee Ashtiani, F., "The effect of hydraulic retention time on the performance and fouling characteristics of membrane sequencing batch reactors used for the treatment of synthetic petroleum refinery wastewater", *Bioresource Technology*, 102, 7692-7699, (2011).
- [20] Scholz, W., Fuchs, W., "Treatment of oil contaminated wastewater in a membrane bioreactor", *Water Research*, 34, 3621-3629, (2000).
- [21] Lu, M., Zhang, Z., Yu, W., Zhu, W., "Biological treatment of oilfield-produced water: A field pilot study", *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63, 316-321, (2009).
- [22] Rahman, M. M., Al-Malack, M. H., "Performance of a cross flow membrane bioreactor (CF-MBR) when treating refinery wastewater", *Desalination*, 191, 16-26, (2006).
- [23] Pendashteh, A. R., Luqman Chuah, A., Fakhru'l-Razi, A., Madaeni, S. S., Zainal, Z. A., Dayang Radiah, A. B., "Evaluation of membrane bioreactor for hypersaline oily wastewater treatment", *Process Safety and Environmental Protection*, 90(1), 45-55, (2011).
- [24] Holler, S., Trosch, W., "Treatment of urban wastewater in a membrane bioreactor at high organic loading rates", *Journal of Biotechnology*, 92, 95-101, (2001).
- [25] Fallah, N., Bonakdarpour, B., Nasernejad, B., Alavi Moghadam, M., "Longterm operation of submerged membrane bioreactor (MBR) for the treatment of synthetic wastewater containing styrene as volatile organic compound (VOC): Effect of hydraulic retention time (HRT)", *Journal of Hazardous Materials*, 17, 718-724, (2010).
- [26] Hao, L., Liss, S. N., Liao, B. Q., "Influence of COD:N ratio on sludge properties and their role in membrane fouling of a submerged membrane bioreactor", *Water Research*, 89, 132-141, (2016).
- [27] McAdam, E. J., Judd, S. J., "Denitrification from drinking water using a membrane bioreactor: chemical and biochemical feasibility", *Water Research*, 41, 4242-4250, (2007).
- [28] Meng, Q. J., Yang, F. L., Liu, L. F., Meng, F. G., "Effects of COD/N ratio and DO concentration on simultaneous nitrification and denitrification in an airlift internal circulation membrane bioreactor", *Journal of Environmental Sciences (China)*, 20, 933-939, (2008).
- [29] Feng, S. P., Zhang, N. N., Liu, H. C., Du, X. L., Liu, Y. L., Lin, H., "The effect of COD/N ratio on process performance and membrane fouling in a submerged bioreactor", *Desalination* 285, 232-238, (2012).
- [30] Miquelito, A. P., Dolosic, C. C., Pozzi, E., Foresti, E., Zaiat, M., "Influence of carbon sources and C/N ratio on EPS production in anaerobic sequencing batch biofilm reactors for wastewater treatment", *Bioresource Technology*, 101, 1324-1330, (2010).
- [31] Sun, D. D., Khor, S. L., Hay, C. T., Leckie, O. J., "Impact of prolonged sludge retention time on performance of a submerged membrane bioreactor", *Desalination*, 208, 101-112, (2007).
- [32] Rosenberger, S., Kruger, U., Witzig, R., Manz, W., Szewzyk, U., Kraume M., "Performance of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal waste water", *Water Research*, 36(2), 413-420, (2002).
- [33] Han, S. S., Bae, T. H., Jang, G. G., Tak, T. M., "Influence of sludge retention time on membrane fouling and bioactivities in membrane bioreactor system", *Process Biochemistry*, 40, 2393-2400, (2005).
- [34] Karimi, A., Golbabaie, F., Mehrnia, M. R., Neghab, M., Kazem, M., Nikpey, A., Pourmand, M. R., "Oxygen mass transfer in a stirred tank bioreactor using different impeller configurations for environmental purposes", *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 10(1), 1735-2746, (2013).

- [35] Poostchi, A. A., Mehrnia, M. R., Rezvani, F., Sarrafzadeh, M. H., "Low-cost monofilament mesh filter used in membrane bioreactor process: Filtration characteristics and resistance analysis", *Desalination*, 286, 429-435, (2012).
- [36] Meng, F., Yang, F., Shi, B., Zhang, H., "A Comprehensive study on membrane fouling in submerged membrane bioreactors operated under different aeration intensities", *Separation and Purification Technology*, 59, 91-100, (2008).
- [37] Yoon, S. H., "Membrane bioreactor processes: Principles and applications", CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, London, New York, (2016).
- [38] Drews, A., "Membrane fouling in membrane bioreactors: Characterisation, contradictions, cause and cures", *Journal of Membrane Science*, 363, 1-28, (2010).
- [39] Chang, M. C., Horng, R. Y., Shao, H., Hu, Y. J., "Performances and filtration characteristics of non-woven membranes used in a submerged membrane bioreactor for synthetic wastewater treatment", *Desalination*, 191 (1-3), 8-15, (2006).
- [40] Wilen, B. M., Jina, B., Lant, P., "The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties", *Water Research*, 37, 2127-2139, (2003).
- [41] Sperandio, M., Masse, A., Cabassud, C., "Characterization of sludge structure and activity in submerged membrane bioreactor". IWA Biennial World Water Congress and Exhibition, 19-24 September, Marrakech, Marroco, (2004).
- [42] Masse, A., Sperandio, M., Cabassud, C., "Comparison of sludge characteristics and performance of a submerged membrane bioreactor and an activated sludge process at high solids retention time", *Water Research*, 40(12), 2405-2415, (2006).
- [43] Chiu, T. Y., Lara Dominguez, M. V., James, A. E., "Critical flux and rejection behavior of non-circular-channeled membranes Influence of some operating conditions", *Separation Science and Technology*, 50, 212-219, (2006).
- [44] Ng, H. Y., Hermanowicz, S. W., "Membrane bioreactor operation at short solids retention times: performance and biomass characteristics", *Water Research*, 39, 981-992, (2005).
- [45] Frolund, B., Palmgren, R., Keiding, K., Nielsen, P. H., "Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin", *Water Research*, 30, 1749-1758, (1996).
- [46] Urbain, V., Block, J. C., Manem, J., "Bioflocculation in activated sludge: an analytic approach", *Water Research*, 27, 829-938, (1993).
- [47] Wilen, B. M., Jin, B., Lant, P., "Impacts of structural characteristics on activated sludge floc stability", *Water Research*, 37, 3632-3645, (2003).
- [48] 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, 221-233, (1998).
- [49] Chang, I. S., Le-Clech, P., Jefferson, B., Judd, S., "Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment", *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, 128, 1018-1029, (2002).
- [50] Nagaoka, H., Kono, S., Yamanishi, S., Miya, A., "Influence of organic loading rate on membrane fouling in membrane separation activated sludge process", *Water Science and Technology*, 41, 355-362, (2000).
- [51] Laspidou, C. S., Rittmann, B. E., "A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass", *Water Research*, 36 (11), 2711-2720, (2002).
- [52] Huang, Zh., 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*, 45, 705-713, (2011).
- [53] Lee, Y., Cho, J., Seo, Y., Lee, J. W., Ahn, K. H., "Modeling of submerged membrane bioreactor process for wastewater treatment", *Desalination*, 146 (1-3), 451-457, (2002).
- [54] Abdollahzadeh Sharghi, E., Bonakdarpour, B., "The study of organic removal efficiency and halophilic bacterial mixed liquor characteristics in a membrane bioreactor treating hypersaline produced water at varying organic loading rates", *Bioresource Technology*, 149, 486-495, (2013).
- [55] Shin, H. S., Kang, S. T., "Characteristics and fates of soluble microbial products in ceramic membrane bioreactor at various sludge retention times", *Water Research*, 37(1), 121-127, (2003).
- [56] Barker, D. J., Stuckey, D. C., "A review of soluble microbial products (SMP) in wastewater treatment systems", *Water Research*, 33, 3063-3082, (1999).
- [57] Wang, Zh., Mei, X., Wu, Zh., Ye, Sh., Yang, D., "Effects of biopolymer discharge from MBR mixture on sludge characteristics and membrane fouling", *Chemical Engineering Journal*, 193-194, 77-87, (2012).
- [58] Urbain, V., Mobarry, B., de Silva, V., Stahl, D. A., Rittmann, B. E., Manem, J., "Integration of performance, molecular biology and modeling to describe the activated sludge process", *Water Science and Technology*, 37, 223-229, (1998).
- [59] Jiang, T., Myngher, S., Pauw, D., Spanjers, H., Nopens, I., Kennedy, M., Amy, G., Vanrolleghem, P., "Modeling the production and degradation of soluble microbial products (SMP) in membrane bioreactors (MBR)", *Water Research*, 42, 4955-4964, (2008).
- [60] Fenu, A., Guglielmi, G., Jimenez, J., Sperandio, M., Saroj, D., Lesjean, B., Brepols, C., Thoeve, C., Nopens, I., "Activated sludge model (ASM) based modeling of membrane bioreactor (MBR) processes: A critical review with special regard to MBR specificities", *Water Research*, 44, 4272-4294, (2010).
- [61] Furumai, H., Rittmann, B. E., "Advanced modeling of mixed population of heterotrophs and nitrifiers", *Water Science and Technology*, 26(3-4), 493-502, (1999).
- [62] McAdam, E. J., Judd, S. J., Cartmell, E., Jefferson, B., "Influence of substrate on fouling in anoxic immersed membrane bioreactors", *Water Research*, 41(17), 3859-3867, (2007).
- [63] Ng, K. K., Lin, C. F., Panchanqam, S. C., Andy Hong, P. K., Yang, P. Y., "Reduced membrane fouling in a novel bio-entrapped membrane reactor for treatment of food and beverage processing wastewater", *Water Research*, 45, 4269-4278, (2011).
- [64] Dong, B., Jiang, S., "Characteristics and behaviors of soluble microbial products in sequencing batch membrane bioreactors at various sludge retention times", *Desalination*, 243, 240-250, (2009).
- [65] Xiang, T., Sheng, Z., Lirong, X., Mingchuan, Z.,

- Jiangrong, Z., "Performance and fouling characteristics in a membrane sequence batch reactor (MSBR) system coupled with aerobic granular sludge", *Desalination*, 261, 1-19, (2010).
- [66] Wu, S., Lee, C., "Correlation between fouling propensity of soluble extracellular polymeric substances and sludge metabolic activity altered by different starvation conditions", *Bioresource Technology*, 102, 5375-5380, (2011).
- [67] Wilen, B. M., Lumley, D., Mattsson, A., Mino, T., "Relationship between floc composition and flocculation and settling properties studied at a full scale activated sludge plant", *Water Research*, 42, 4404-4418, (2008).
- [68] Mikkelsen, L. H., Kending, K., "Physico-chemical characteristics of full scale sewage sludges with implications to sea watering", *Water Research*, 36, 2451-2462, (2002).
- [69] Liao, B. Q., Allen, D. G., Droppo, I. G., Leppard, G. G., Liss, S. N., "Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and satiability", *Water Research*, 35, 339-350, (2001).
- [70] Jin, B., Wilen, B. M., Lant, P., "A comprehensive insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settleability of activated sludge", *Chemical Engineering Journal*, 95, 221-234, (2003).
- [71] Morgan, J. W., Forster, C. F., Evison, L., "A comparative study of the nature of biopolymers extracted from anaerobic and activated sludges", *Water Research*, 24, 743-750, (1990).
- [72] Mesquita, D. P., Amaral, A. L., Ferreira, E. C., "Identifying different types of bulking in an activated sludge system through quantitative image analysis", *Chemosphere*, 85, 643-652, (2011).
- [73] Sponza, D. T., "Investigation of extracellular polymer substances (EPS) and physicochemical properties of different activated sludge flocs under steady-state conditions", *Enzyme and Microbial Technology*, 32, 375-385, (2003).
- [74] Li, X. Y., Yang, S. F., "Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge", *Water Research*, 41, 1022-1030, (2007).
- [75] Higgins, M., Novak, J. T., "Characterization of extracellular protein and its role in bioflocculation", *Journal of Environmental Engineering*, 12, 479-485, (1997).
- [76] Lurie, M., Rebhun, M., "Effect of properties of polyelectrolytes on their interaction with particulates and soluble organics", *Water Science and Technology*, 36, 93-101, (1997).
- [77] Bott, C. B., Love, N. G., "Investigating a mechanistic cause for activated Sludge deflocculation in response to shock loads of toxic electrophilic chemicals", *Water Environmental Research*, 74, 306-315, (2002).
- [78] Bott, C. B., Love, N. G., "The Immunochemical Detection of Stress Proteins in Activated Sludge Exposed to Toxic Chemicals", *Water Research*, 35(1), 91-100, (2001).
- [79] Li, D. H., Ganczarzyk, J. J., "Factors affecting dispersion of activated sludge flocs", *Water Environment Research*, 65, 258-26, (1993).