

## بررسی بیوراکتورهای غشایی نوین در تجزیه بیولوژیکی شیرابه مراکز دفن پسماند شهری

محمد اعتمادی<sup>۱</sup>

مرتضی شکری<sup>۲\*</sup>

[Msh.Shokri@gmail.com](mailto:Msh.Shokri@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۹۵/۶/۲۱

تاریخ دریافت: ۹۴/۸/۱۶

### چکیده

**زمینه و هدف:** در این مقاله، به تنویر و بررسی بیوراکتورهای غشایی (MBR) مورد استفاده در مراکز دفن پسماندهای شهری پرداخته شده است. از آن جا که امروزه میزان تولید سرانه زباله در حال افزایش بوده و به علت عدم توازن بین حجم زباله های تولیدی و بازیافتی در اکثر مناطق جهان، نحوه مدیریت و جمع آوری پسماندها چالش برانگیز بوده، لذا روش دفن بهداشتی زباله های تولیدی، بهترین روش کاربردی در اکثر کشورها می باشد. در این راستا، کنترل و مدیریت شیرابه های تولیدی در مراکز دفن پسماند به جهت جلوگیری از آلودگی های زیرزمینی و خاک امری لازم و ضروری است.

**روش بررسی:** در این تحقیق، به بررسی مطالعات صورت گرفته بر روی تعدادی از جدیدترین بیوراکتورهای غشایی کاربردی در مراکز دفن پسماند شهری بزرگ، مزایا و معایب هر یک از این روش ها و موارد کاربرد آن ها پرداخته شده است. به همین منظور، مقالات و پژوهش های اخیر در حوزه تجزیه بیولوژیکی شیرابه ها مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند.

**یافته ها:** از میان روش های مختلف تصفیه بیولوژیکی، سیستم مرکب به عنوان یکی از موثرترین و توان مندترین روش تصفیه و تجزیه بیولوژیکی پساب ها مورد ارزیابی قرار می گیرد و در انتها نیز دو مدل پایلوت هوازی به منظور جلوگیری از رسوب گذاری غشاها جهت نمایش عملکرد کربن دانه ای فعال مقایسه شده است. هم چنین، میزان پاک سازی پارامترهای مهم آلاینده پساب ها نظیر COD و  $NH_3-N$  در حضور کربن دانه ای فعال بررسی شدند.

**بحث و نتیجه گیری:** به منظور تصفیه شیرابه های مراکز دفن پسماند شهری، روش های مختلفی استفاده می گردد که هر یک دارای نقاط قوت و ضعف هستند. با بررسی و امکان سنجی سایت دفن زباله های شهری، می توان بهینه ترین و موثرترین روش را از نظر عملکرد و هزینه را براساس نیاز انتخاب نمود.

**واژه های کلیدی:** مرکز دفن پسماند، بیوراکتورهای غشایی، تجزیه بیولوژیکی، کربن دانه ای فعال، پایلوت هوازی.

۱- دانش آموخته مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده فنی مهندسی کبودرآهنگ، همدان، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده فنی مهندسی کبودرآهنگ، همدان، ایران. \* (مسوول مکاتبات)

## **Modern Membrane Bio Reactors Investigation in biodegrading of municipal landfills leachate**

**Mohammad Etemadi**<sup>1</sup>

**Morteza Shokri**<sup>2\*</sup>

[Msh.Shokri@gmail.com](mailto:Msh.Shokri@gmail.com)

Admission Date: September 11, 2016

Date Received: November 7, 2015

### **Abstract**

**Background and Objective:** This article, demonstrate uses of Membrane Bio Reactors in municipal landfills. Because of daily increasing sweeping amounts and no balance between generation and recycling of them in the most part of the world, type of management and gathering of sweeping has challenged. Thus hygienic burial method for generated sweeping is one of the applied methods in many countries. Hence, monitoring and management of productive leachate of municipal landfills to prevent underground water and soil from pollutant is obligatory.

**Material and Methodology:** In this study, some modern Membrane Bio Reactors in municipal landfill were investigated. Then, advantages, defects, and application of each ones have been considered. Therefore, recent articles and researches about biodegrading of leachate were studied.

**Findings:** Among the various methods of biological treatment, complex system method is one of the effective and strong approaches to treatment and biodegrading of wastewaters. Finally, to showing active carbon action for prevention of membranes fouling, two aerobic pilots with equal conditions were compared. Also, clearing the important parameters of wastewater contaminants such as COD and NH<sub>3</sub>-N in the presence of granular activated carbon was compared.

**Discussion and Conclusion:** In order to treatment of municipal landfills leachate lots of methods with strengths and weaknesses is used. With investigation and Feasibility of municipal landfill site, the most efficient and effective method in terms of performance and cost based on need can be selected.

**Keywords:** Landfill, Membrane Bio Reactors, Biodegrading, Granular active carbon, Aerobic pilot.

---

1- Graduated of Civil Eng., Bu – Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2- Assistant. Prof., Dept. of Civil Eng., Bu – Ali Sina University, Hamedan, Iran. *\*(Corresponding Author)*

## مقدمه

مدفون، اقلیم و مشخصات هیدرولوژیکی منطقه (میزان و شدت بارندگی، رطوبت هوا و تبخیر) می باشد (۴ و ۳).

براساس مطالعات انجام شده، سن پسماندها از مهم ترین عوامل تاثیر گذار بر ساختار تشکیل دهنده ی مواد آلاینده و مقاومت شیرابه ها در برابر تجزیه شدن می باشد. به همین منظور در یکی از انواع طبقه بندی، شیرابه ها را بر حسب سن به صورت شیرابه جوان (کم تر از ۵ سال)، شیرابه متوسط (۵-۱۰ سال) و شیرابه قدیمی (بالتر از ۱۰ سال) تقسیم بندی می نمایند (۵).

در جدول (۱)، شیرابه های جوان، متوسط و قدیمی بر اساس مقادیر مواد آلاینده مقایسه شده اند.

زباله ها مواد زایدی هستند که حیات و محیط زیست بشر را به خطر می اندازند. به طور کلی، زباله به عنوان مواد حاصل از فعالیت های مختلف انسانی تعریف می شود. صنعتی شدن جوامع، افزایش روز افزون جمعیت و هم چنین اسراف گرایی جامعه ی امروزی، از عوامل افزایش تولید سرانه ی زباله ها و پسماند ها در قرن حاضر است. به دلیل شیوع بیماری های خطرناکی همچون سرطان و ایدز و اثبات ارتباط مستقیم آن ها با آلودگی های زیست محیطی از سال ۱۹۷۵ میلادی، اکثریت قریب به اتفاق کشور های جهان اقدام به تهیه و تنظیم قوانینی به منظور کنترل مواد زاید نمودند.

یکی از ارکان مهم تأمین و حفظ سلامت جامعه، وجود مراکز دفن بهداشتی زباله در آن جامعه می باشد. یک مرکز دفن زباله بهداشتی، مجموعه ای است که علاوه بر کنترل محیط زیستی بر فعالیت آن، طراحی آن نیز بر اساس معیار های مهندسی بوده و تابع قوانین و ضوابط محیط زیستی باشد. به علت عواملی چون کاهش آلودگی، اشتغال زایی و از همه مهم تر جنبه اقتصادی، استفاده از مراکز دفن زباله<sup>۱</sup> نسبت به سایر روش های سنتی نظیر سوزاندن<sup>۲</sup>، انعقاد سازی<sup>۳</sup>، جذب سطحی<sup>۴</sup> و... ارجحیت دارد (۱).

یکی از چالش های اساسی مراکز دفن پسماند شهری، کنترل و مدیریت شیرابه های حاصل از انباشت زباله ها است. به همین دلیل طراحی این مراکز، نیازمند دانش به روز مهندسی و تکنولوژی های نوین است (۲).

شیرابه حاصل از زباله، یکی از منابع آلوده کننده آب های سطحی و زیر زمینی و نیز خاک می باشد که درجه ی آلودگی آن چندین برابر فاضلاب ها و پساب های خانگی است. پساب های مقاوم، آمونیاک، فلزات سنگین و فلزات شیمیایی آلوده کننده، از مواد اصلی تشکیل دهنده ی شیرابه ها هستند. مقادیر این مواد تحت تاثیر عواملی چون سن زباله های

- 
- 1- landfills
  - 2- Incineration
  - 3- Coagulation
  - 4- Adsorption

## جدول ۱- طبقه بندی و ترکیبات شیرابه های مراکز دفن زباله بر اساس سن

Table 1. Classification and composition of landfill leachate based on age

مشخصه ها	شیرابه جوان	شیرابه متوسط	شیرابه قدیمی
سن (سال)	<۵	۱۰-۵	>۱۰
pH	<۶/۵	۷/۵-۶/۵	>۷/۵
BOD/COD	۰/۵-۱	۰/۱-۰/۵	<۰/۱
COD (mg L <sup>-1</sup> )	>۱۰۰۰۰	۴۰۰۰-۱۰۰۰۰	<۴۰۰۰
NH <sub>3</sub> - N (mg L <sup>-1</sup> )	<۴۰۰	ناچیز	>۴۰۰
فلزات سنگین	متوسط رو به پایین	کم	کم
قابلیت تجزیه پذیری	زیاد	متوسط	کم

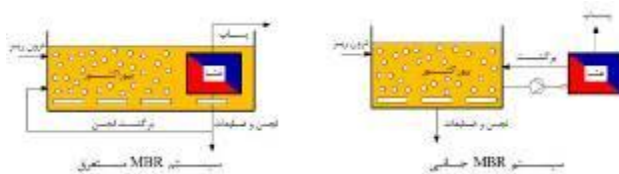
گیرد(۹). لازم به ذکر است استفاده از سیستم مستغرق رایج تر و متداول تر می باشد. فیلترها یا همان غشاها به صورت صفحات تخت<sup>۳</sup>، ورق و قاب<sup>۴</sup> و یا لوله ای<sup>۵</sup> در سیستم های متعارف MBR استفاده می شوند. شکل (۱) دو نوع سیستم جریان مستغرق و جانبی MBR را به صورت شماتیک نشان می دهد.

همان طور که جدول (۱) نشان می دهد، تجزیه و کنترل شیرابه های سنین مختلف با روش های متفاوتی انجام می گیرد. در این میان شیرابه های قدیمی به دلیل خاصیت قلیایی بالا و هم چنین قابلیت تجزیه پذیری کم، نیازمند تدابیر مهمی برای تجزیه و کنترل می باشند. در این پژوهش، به بررسی روش های تجزیه بیولوژیکی در بیوراکتورهای غشایی پرداخته می شود.

به کارگیری روش بیوراکتور غشایی در مراکز مختلف تصفیه فاضلاب صنعتی و شهری از حدود سال ۱۹۹۰ میلادی آغاز شده است. از فواید و مزایای مهم این روش می توان به توانایی تجزیه بیولوژیکی پساب های سخت و مقاوم، پایداری در بهره برداری و کیفیت بسیار بالای پساب خروجی، اشاره نمود(۷و۶). MBR یک سیستم تصفیه فاضلاب یک پارچه می باشد که شامل دو بخش اصلی است. یک واحد بیولوژیکی یا یک بیوراکتور که نقش تجزیه بیولوژیکی را ایفا می کند و دیگری یک واحد غشایی که وظیفه ی آن جداسازی و ته نشین نمودن لجن ها از پساب ها یا به عبارت دیگر زلال سازی می باشد(۸). بسته به نحوه قرارگیری واحد فیلتراسیون و غشایی مربوطه، دو سیستم جریان مستغرق<sup>۱</sup> و سیستم جریان جانبی<sup>۲</sup> وجود دارد. در سیستم جریان جانبی، واحد غشایی در خارج از راکتور و در سیستم مستغرق، به صورت غرق شده درون راکتور قرار می

3- Flat sheet  
4- Plate and Frame  
5- Tubular

1- Submerged  
2- Side stream



شکل ۱- شماتیک اجزای مختلف دو نوع سیستم متعارف MBR

Figure 1. Schematic form the different components of two types of standard MBR systems

چین مجهز به روش MBR می باشند که از سال ۲۰۰۶ شروع به فعالیت نموده اند. شکل (۲) نوع اول سیستم MBR به نام سیستم مستغرق در چین را نشان می دهد. جدول (۲)، تعدادی از بیوراکتورهای غشایی مورد استفاده در مراکز دفن پسماند شهری کشورهای مختلف را عرضه می کند.

روش MBR در تصفیه و کنترل فاضلاب های صنعتی و شیرابه های مراکز دفن پسماند کاربرد دارد. تا کنون حدود ۵۰ مرکز تصفیه خانه فاضلاب مجهز به MBR در اروپا مورد بهره برداری قرار گرفته اند. (۱۰) هم چنین براساس مطالعات وانگ و همکاران (۲۰۰۸) بیش از ۱۵ مرکز دفن پسماند شهری در



شکل ۲- سیستم MBR جریان مستغرق به منظور تجزیه بیولوژیکی پسماندهای شهری در کشور چین

Figure 2. Submerged MBR system for biological decomposition of municipal solid waste in China

جدول ۲- تعدادی از بیوراکتورهای غشایی (MBR) در مراکز دفن پسماند شهری

Table 2. A number of membrane bioreactors (MBR) for municipal solid waste disposal

مدل غشا	مستغرق	جریان جانبی	جریان جانبی	مستغرق	جریان جانبی	جریان جانبی
حجم تانکر بیوراکتور (لیتر)	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰۰۰	۱۳۲۰۰۰	۱۵	۵۰
محل مرکز	تایلند	چین	انگلستان	آلمان	لهستان	آلمان
نام مرکز	Thailand	Tianjin	Dorset	Penzberg	Tychy	Alsdorf-Warden
عملکرد پاکسازی (%)	BOD	۹۹/۶۰	۷۴	بیش از ۹۵	بیش از ۹۸	۹۱
	COD	۶۰-۷۸	۸۷	۶۵	۸۹	۳۰
مقیاس	اجرای	اجرای	اجرای	اجرای	آزمایشگاهی	آزمایشگاهی
مرجع	(۱۱)	(۱۲)	(۱۳)	(۱۴)	(۱۵)	(۱۶)

## مواد و روش ها

بیوراکتورهای غشایی صورت می گیرد (۲۰۱۰ و ۲۱). علاوه بر این مزیت، به منظور بهینه سازی مصرف انرژی و نیز رفع مشکلات روش های قدیمی نظیر رسوب گذاری در غشاهای، از سال ۲۰۱۰ روش بی هوازی مستغرق در مراکز دفن پسماند و پژوهش های آزمایشگاهی به صورت چشم گیری استفاده می شود.

از دیگر مزایای این روش، می توان به کیفیت بالای پساب خروجی، کم تر بودن لجن مازاد و مصرف انرژی پایین تر اشاره نمود. همانند روش بیوراکتور غشایی هوازی، در روش بی هوازی نیز از مدول غشایی (قسمت فیلتراسیون جداساز) به دو صورت جریان مستغرق و جریان جانبی استفاده می شود. در این روش، حالت جریان جانبی کاربرد بیش تری داشته و مزایایی چون کنترل رسوب گذاری فیلترها، تعویض و جا به جایی راحت تر فیلترها را دارد (۲۲)، اما در مقایسه با حالت مستغرق، به دلیل نیاز تعویض فیلترها، هزینه ی بالاتر و هم چنین مصرف انرژی بالایی دارد که علت آن پایین بودن سرعت عبور جریان نسبت به حالت مستغرق می باشد (۲۳)، ۲۴ و ۲۵).

غشاهای فیلتراسیون براساس ساختار موادشان، به سه دسته ی عمده پلیمری، فلزی و سرامیکی طبقه بندی می شوند. از ویژگی غشاهای سرامیکی می توان به مقاومت بالا در برابر خوردگی، سایش و هم چنین کاهش رسوب گذاری اشاره نمود. اما این مدل از غشاهای گران هستند (۵ و ۲۶). براساس تحقیقات قیوت و ورستراتی (۱۹۹۷) دبی جریان عبوری از یک نمونه غشای سرامیکی از غشاهای می تواند حدود ۲۵۰-۲۰۰ لیتر بر ساعت به ازای هر متر مربع مساحت شار جریان داشته باشد که حدود ۱۰ برابر یک نمونه ی پلیمری است (۲۴). به دلیل هزینه بالای غشاهای سرامیکی و فلزی در مقابل غشاهای پلیمری، استفاده از غشاهای پلیمری رایج تر می باشد. لین و همکاران (۲۰۱۱) دریافتند (۲۷) که ۴۶/۴ تا ۷۲/۳ درصد از هزینه های سرمایه گذاری یک سیستم بیوراکتور غشایی بی هوازی انتخاب و خرید غشاهای می گردد. از آن سو قیمت بالای این غشاهای نیز امری نگران کننده در انتخاب نوع روش تجزیه

محققان و پژوهشگران حوزه محیط زیست، با بررسی و پژوهش های فراوانی که انجام داده اند، به نقاط قوت و ضعف بیوراکتورهای غشایی تا حدودی دست یافته اند. در کنار این امر، توسعه و گسترش علوم مهندسی سبب دست یابی به تکنولوژی و روش های نوین در زمینه تجزیه پساب ها گردیده است. لازم به ذکر است، افزایش روز افزون مقادیر شیرابه های تولیدی، پساب های مقاوم و سخت نیز سبب توسعه و گسترش فعالیت های پژوهشی بر روی بیوراکتورهای غشایی در دهه های اخیر می باشد.

از این رو، در این پژوهش به مطالعه و بررسی جدیدترین بیوراکتورهای غشایی، نظیر بیوراکتور غشایی بی هوازی، بیوراکتور غشایی بی هوازی پویا، غشای اسمزی مستقیم و در نهایت روش ترکیبی فیزیکی شیمیایی به منظور تجزیه بیولوژیکی شیرابه های مراکز دفن پسماند شهری اشاره شده است.

روش بیوراکتور غشایی بی هوازی<sup>۱</sup>

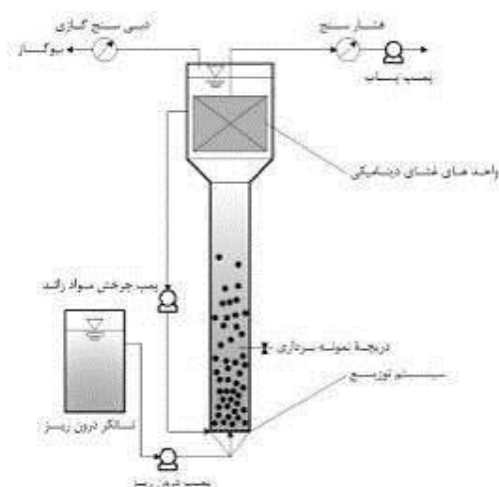
روش بیوراکتور غشایی بی هوازی به نام AnMBR، یک روش تجزیه بیولوژیکی جدید است که بدون مصرف اکسیژن با استفاده از غشا ذرات معلق پساب را جدا می کند (۱۷).

روش بیوراکتور غشایی بی هوازی، نخستین بار توسط گرتلین (۱۹۷۸) استفاده شد (۱۸). وی با استفاده از سیستم غشای جریان جانبی، توانست به پساب خروجی با کاهش مقدار BOD به میزان ۸۵-۹۵ درصد و هم چنین رفع آلودگی ۷۲ درصدی نترات برسد. گسترش مقیاس های اقتصادی و تجاری روش حاضر، مدیون تلاش و کوشش های انجام شده در سال ۱۹۸۰ میلادی تحت عنوان سیستم های غشاهای بیوراکتوری بی هوازی (MARS) و اولترا فیلتراسیون تجزیه بی هوازی می باشد (ADUF)<sup>۳</sup> (۱۹).

در این روش، به دلیل حذف بخش هوادهی در سیستم، کنترل لجن ها با هزینه ی کم تری نسبت به سایر روش های

- 1- Anaerobic Membrane Bio Reactor
- 2- Membrane Anaerobic Reactor System
- 3- Anaerobic Digestion Ultrafiltration

دینامیک)، از جمله روش های تکمیلی غشاهای بیوراکتوری بی هوازی است که عمده تفاوت آن استفاده از غشاهای دینامیکی می باشد. جهت ارزیابی این روش به مطالعه ی انجام گرفته در تجزیه بیولوژیکی شیرابه مرکز دفن پسماند شانگهای چین اشاره می گردد. در پژوهش صورت گرفته توسط ژنگ فانگ زی و همکاران (۲۰۱۴)، این روش عمل کرد خود را در سایت مرکز دفن پسماند مذکور به خوبی نمایش داد. شکل (۳) دیاگرام این روش را به صورت کلی و مرحله به مرحله نشان می دهد (۳۲).



شکل ۳- بخش های مختلف سیستم AnDMBR

Figure 3. Different parts AnDMBR system

پایلوت استفاده شده در این روش، شامل یک تانکر ۴۸ لیتری است که خود از بخش ته نشینی به حجم ۲۱/۳ لیتر (در قسمت بالایی مخزن) و یک راکتور بستر ته نشینی به حجم ۲۶/۷ لیتر (در قسمت زیرین مخزن) تشکیل شده است. قطر راکتور بستر ته نشینی برابر ۱۷ سانتی متر و ارتفاع آن ۱۱۷ سانتی متر است. در این پایلوت از مدول غشایی صفحه ای پویا با اندازه حفره حدود ۴۰ میکرومتر در بخش ته نشینی استفاده گردیده است.

غشای دینامیکی به وسیله یک پمپ متصل به مدول با دبی ۶ لیتر بر ساعت بازای هر متر مربع مساحت تغذیه می گردد. علت نام گذاری این روش نیز، وجود همین پمپ می باشد. جدول (۳) خصوصیات شیرابه منبع خوراک این دستگاه را نشان می دهد.

بیولوژیکی نیست، چرا که این روش انعطاف پذیری بالایی داشته و متناسب با نوع پساب مدنظر و نوع کاربری، می توان از غشاهای مناسب و متناسب با تقاضای محیط استفاده نمود. به عبارت دیگر، نیازی به انتخاب غشاهای بسیار گران قیمت در تجزیه پساب با مقاومت کم و ضعیف نمی باشد (۱۷).

از دیگر مزایای روش بیوراکتور غشایی بی هوازی، می توان به قابلیت استفاده از اغلب فیلترهای روش MBR در آن اشاره نمود. البته لازم به ذکر است غشاهای MBR استفاده شده در این روش دوام چندانی نسبت به غشاهای پلیمری ندارند، چرا که به دلیل خلل و فرج بالاتر آن ها خصوصاً در فشارهای پایین، دبی جریان بالا بوده که این امر خود سبب آسیب رساندن به غشاهای می شود (۲۸ و ۲۹).

یکی از اشکالات اساسی و مهم روش حاضر، رسوب گذاری غشاهای می باشد. تعویض و پاک کردن غشاهای از رسوبات هزینه بر می باشد، اما تحقیقات نشان می دهد که با ترکیب غشاهای با پودر کربن فعال، تا حدی می توان رسوب گذاری آن ها را تعدیل نمود (۳۰).

روش AnMBR، به دلیل مشخصه های بهتری نسبت به روش MBR و سایر روش ها و هم چنین به کارگیری دانش جدید ساخت غشاهای در آن، مورد توجه بسیاری از سایت های تصفیه شیرابه ها قرار گرفته است، زیرا گزارش ها حاکی از انتشار مقالات مرتبط بسیاری با این روش می باشد که از این بین حدود ۱۰۰ مقاله مربوط به ۶ سال اخیر می باشد (۱۷).

### روش بیوراکتور غشایی بی هوازی پویا<sup>۱</sup>

علی رغم مزایای فراوان روش بیوراکتور غشایی بی هوازی، که در قسمت قبل بیان شد، معایب این روش نظیر میزان نگهداری بیومس<sup>۲</sup> پایین (مخصوصاً در روش های سنتی بی هوازی نظیر UASB<sup>۳</sup>)، میزان رشد کم میکرو ارگانیسم ها در پساب خروجی و هم چنین هزینه بالای غشاهای آن، محققان را بر آن داشت تا جهت تکمیل کارایی این فرآیند، روش های نوینی را به کار گیرند (۳۱). روش بیوراکتور غشایی بی هوازی پویا

1-Anaerobic Dynamic Membrane Bio Reactor  
2- Biomass  
3-Up flow Anaerobic Sludge Blanker

جدول ۳- خصوصیات شیرابه منبع خوراک دستگاه AnDMBR (همگی واحد ها به جز pH: میلی گرم بر لیتر)

Tabale 3. AnDMBR leachate properties of the feedstock devices (all units except pH:mg)

پارامترها	شیرابه مرکز دفن پسماند	فاضلاب مصنوعی
COD	$13000 \pm 750$	۲۰۰۰
VFA	$7133 \pm 1027$	---
pH	$7.6 \pm 0.2$	۷/۵
$\text{NH}_3 - \text{N}$	$3199.4 \pm 136.6$	۲۰/۰
Calcium (Ca)	$104.4 \pm 89.5$	۹۳/۰
Magnesium (Mg)	$175.5 \pm 61.1$	۴۱/۷
Iron (Fe)	$20.7 \pm 14.0$	۴/۴
Aluminum (Al)	$1.52 \pm 1.30$	---
Chrome (Cr)	$0.150 \pm 0.24$	---
Boron (B)	$7.60 \pm 0.186$	---

تغذیه دستگاه در شش مرحله و در بازه زمانی مختلف انجام گرفته است. در هر مرحله درصدی از منبع خوراک با غلظت-های مختلف COD و  $\text{NH}_3 - \text{N}$  به پایلوت وارد می گردد. جدول (۴) مشخصات دوره های تغذیه را نمایش می دهد.

پساب ورودی به این پایلوت، حاصل ترکیب شیرابه مرکز دفن پسماند شهری شانگهای چین و فاضلاب مصنوعی ساخته شده در آزمایشگاه می باشد. لازم به ذکر است شیرابه این مرکز دفن پسماند شهری، سنی کم تر از ۵ سال را داشته و جزء شیرابه-های جوان طبقه بندی می گردد.

جدول ۴- پارامترهای زمان عملیات برای دستگاه AnDMBR

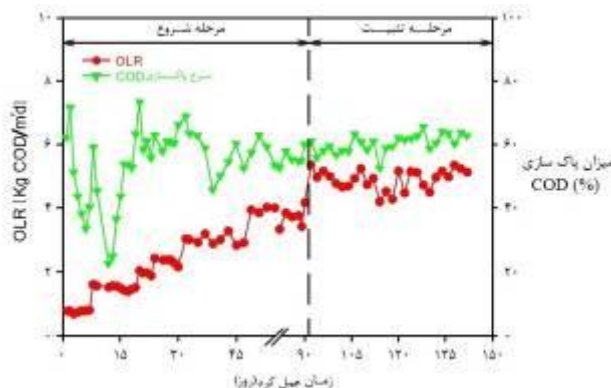
Table 4. Time parameters for AnDMBR operation

غلظت $(\text{mg L}^{-1})\text{NH}_3 - \text{N}$	غلظت $\text{COD}(\text{mg L}^{-1})$	درصد شیرابه	زمان عملیات (روز)
$21.2 \pm 2.6$	$1970 \pm 110$	۰	۰-۷
$673.5 \pm 24.2$	$3910 \pm 180$	۲۰	۸-۱۹
$1275.0 \pm 63.7$	$5670 \pm 540$	۴۰	۲۰-۳۰
$1920.0 \pm 147.8$	$7810 \pm 380$	۶۰	۳۱-۴۷
$2653.1 \pm 126.3$	$9180 \pm 620$	۸۰	۴۸-۸۹
$3199.4 \pm 136.6$	$13000 \pm 750$	۱۰۰	۹۰-۱۴۲

درصد در طی چند مرحله، مقدار OLR از  $0.75 \frac{\text{kg COD}}{\text{m}^3\text{d}}$  تا  $4.87 \frac{\text{kg COD}}{\text{m}^3\text{d}}$  تغییر می کند. شکل (۴) تغییرات COD در برابر OLR را در زمان های مختلف نشان می دهد.

به منظور وقف دادن میکروارگانیسم ها در محیط بی هوازی، شیرابه مرکز دفن پسماند مورد نظر درون راکتور دستگاه با فاضلاب مصنوعی ساخته شده در آزمایشگاه ترکیب می گردد. هم چنین جهت افزایش مقدار شیرابه ورودی از صفر تا ۱۰۰





شکل ۴- تغییر در میزان پاکسازی COD در برابر تغییرات OLR در دو مرحله شروع و تثبیت عملکرد دستگاه

#### AnDMBR مقابل زمان

Figure 4. The variation in COD clearing against OLR changes at the start and fixing AnDMBR performance against the time

روش اسمز مستقیم (FO)، یک جریان اسمزی عبوری از میان غشاهاست. در این روش، نیروها و فشارهایی که به سبب تفاوت غلظت بین دو محلول ایجاد می شوند، به کمک غشاها، سبب جداسازی ذرات معلق آلوده می گردند. در واقع یک غشای نیمه تراوا در این فرآیند، سبب عبور جریان آب می شود و در کنار آن، از عبور ذرات آلوده کننده محلول در آب جلوگیری می نماید (۳۷).

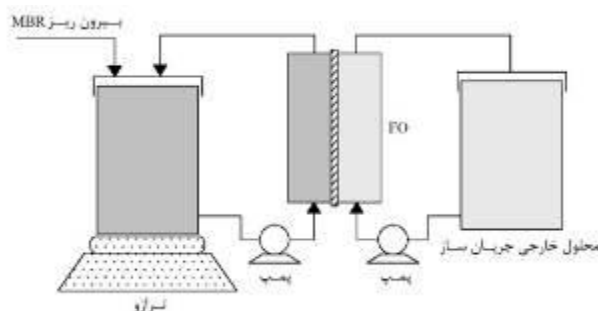
در مقایسه با سایر روش های فیزیکی شیمیایی نظیر NF و RO، روش FO مزایایی هم چون عدم نیاز به فشار هیدرولیکی، پاکسازی موثرتر آلاینده ها و تمایل به رسوب گذاری کم تر را داراست. در سال های اخیر، این روش برای تصفیه فاضلاب های صنعت نفت و گاز و هم چنین تصفیه شیرابه های مراکز دفن پسماند شهری استفاده می گردد (۳۸). علاوه بر این، مقالات و پژوهش های اخیر و مدل های آزمایش-گاهی موجود، تمایل زیاد سایت های تصفیه را برای استفاده از این روش نشان می دهد (۳۹).

در بررسی این روش، به پژوهش آزمایش گاهی انجام شده توسط بینگ دانگ و همکاران (۲۰۱۴) در چین اشاره خواهد شد. در این پژوهش، از یک سیستم اسمزی مستقیم، برای پس تصفیه پساب خروجی از یک سیستم MBR استفاده شده است. شکل (۵) پایلوت آزمایش گاهی روش مذکور را نشان می دهد.

همان طور که اشاره شد، جابه جایی و تعویض مدول های غشایی هزینه بر است. از مزایای این روش می توان به میزان نگهداری بیومس بالاتر و دبی جریان زیاد بین غشاها و هم چنین رسوب گذاری به میزان کم تر و در نتیجه کاهش هزینه اشاره کرد (۳۳). با این حال با وجود یک منبع انرژی مازاد (پمپ متصل به مدول غشایی) مصرف انرژی این پایلوت بالاست.

#### سیستم غشای اسمزی مستقیم (FO)

یکی از روش های تاثیر گذار در تصفیه فاضلاب ها و شیرابه ها، ادغام روش های فیزیکی-شیمیایی با روش های بیولوژیکی است. این روش دوگانه در تصفیه، سبب عمل کرد بالای سیستم یا سیستم های تصفیه و هم چنین دست یابی به کیفیت بالای آب خروجی می گردد. واحد های فیزیکی-شیمیایی به عنوان پیش تصفیه و یا پس تصفیه به منظور کاهش میزان بارگذاری مواد آلوده و یا افزایش کیفیت تصفیه استفاده می شوند. با گسترش روز افزون روش های MBR و هم چنین سرعت بالای پیشرفت این روش، ترکیب آن با روش های فیزیکی-شیمیایی نظیر نانو فیلتراسیون، اسمز معکوس و اسمز مستقیم در مراکز دفن پسماند شهری اهمیت بیشتری می یابد (۳۴، ۳۵ و ۳۶).



شکل ۵- اجزای مختلف پایلوت آزمایشگاهی اسمز مستقیم

Figure 5. Forward osmosis pilot reactor components

عمل کرد این روش را می توان به تصفیه کوتاه مدت و تصفیه بلند مدت تقسیم نمود. در تصفیه کوتاه مدت، دستگاه به مدت ۱ ساعت کار انجام می دهد و بعد از پایان این مدت، به منظور تمیز کردن غشاهای خوراک و محلول خارجی جریان ساز با آب مقطر جا به جا می گردند. در حالی که در روش تصفیه بلند مدت، از محلول NaCl با غلظت ۳ مولار، به عنوان محلول خارجی جریان ساز استفاده می گردد و در هر ۲۴ ساعت، مخازن خوراک و محلول خارجی جریان ساز با مواد جدید نظیر خود تعویض می شوند. در این حالت دستگاه نیازی به تمیز کردن غشاهای خود ندارد. جدول (۵) خصوصیات منبع خوراک این پایلوت را نشان می دهد.

#### جدول ۵- خصوصیات شیرابه منبع خوراک دستگاه

##### اسمز مستقیم

Table 5. Leachate characteristics of the feedstock forward osmosis device

غلظت (میلی گرم بر لیتر)	پارامترها
$20 \pm 696$	COD
$10 \pm 215$	TOC
$47 \pm 7100$	TDS
$12 \pm 143$	TN
$0 \pm 0.3$	TP
$22 \pm 925$	Calcium (Ca)
$14 \pm 324$	Magnesium (Mg)
$58 \pm 3676$	Chloride ( $Cl^-$ )

همان طور که شکل (۵) نشان می دهد، محلول خارجی جریان ساز و خوراک دستگاه، در تانکرهای جدایی نگهداری می شوند. منظور از محلول خارجی جریان ساز، محلولی است که سبب اختلاف فشار در دستگاه و به وجود آمدن جریان اسمزی شود. این محلول معمولاً NaCl و KCl با غلظت معین می باشد. تنظیم غلظت و هم چنین پایداری جرم محلول خارجی جریان ساز در طول فرآیند اسمزی امری بسیار مهم می باشد. غشاهای استفاده شده در این دستگاه، ساختار شبکه ای مستطیلی دارند. طول، عرض و ضخامت هر کدام از شبکه ها به ترتیب برابر با ۱۰۰، ۲۰ و ۱/۵ میلی متر می باشد. هم چنین مساحت موثر هر شبکه در حدود  $0.02$  متر مربع می باشد. گردش خوراک سیستم (پساب ورودی) و محلول خارجی جریان ساز توسط دو عدد پمپ دیافراگمی با سرعت متغیر انجام می شود. هم چنین در طول انجام آزمایش، سرعت جریان در دو طرف غشاهای برابر  $0.25$  متر بر ثانیه حفظ گردیده است. اندازه گیری جریان آب توسط یک ترازوی الکترونیکی بر اساس تغییرات وزن خوراک در طول زمان ثبت می شود. نتایج جریان متغیر، در هر لحظه به یک رایانه متصل به سیستم گزارش می گردد. لازم به ذکر است فرآیند آزمایش در دمای اتاق ( $25 \pm 0.5$ ) انجام شده است. غشاهای قبل از تغذیه توسط دستگاه، با آب مقطر به مدت ۲۴ ساعت مرطوب می شوند. هم چنین قبل از استفاده از دستگاه، غشاهای به مدت ۳۰ دقیقه توسط آب مقطر با سرعت  $0.25$  متر بر ثانیه، شسته می شوند. با این کار دستگاه تنظیم (کالیبره) می گردد. حجم مخازن خوراک و محلول خارجی جریان ساز هر کدام برابر با ۶ لیتر می باشد.

روش اسمز مستقیم، با هزینه کم، توانایی تولید آب تصفیه شده با کیفیت بالا دارد. هم چنین مدل های آزمایشگاهی و پایلوت‌هایی از این دستگاه در مناطق محروم از آب سالم قابل شرب و یا مناطق نظامی که امکان دست یابی به آب تصفیه شده ضعیف است، کاربرد چشم گیری خواهد داشت. اما رسوب گذاری غشاها و بازیابی و پاک‌سازی آن‌ها به روش شیمیایی، مصرف انرژی بالا و هم چنین امکان بهره برداری برای تصفیه شیرابه های خاص قدیمی از معایب این روش محسوب می گردند.

#### روش ترکیبی تصفیه بیولوژیکی - فیزیکی شیمیایی به همراه کربن دانه ای فعال + MBR - GAC - A/O (NF & RO) <sup>۴</sup>

این روش، یکی دیگر از روش های مرکب تجزیه بیولوژیکی و فیزیکی شیمیایی می باشد، با این تفاوت که نسبت به روش ۲-۳ توانایی بیش تری داشته و برای شیرابه های قدیمی مناسب می باشد. برای استفاده پساب تصفیه شده در مصارف کشاورزی و هم چنین تامین آب شرب مناطق خشک، فشار موجود در پدیده اسمز معکوس به علاوه بخش نانوفیلتراسیون، سبب دست یابی به آب شیرین با کیفیت بالا می گردد. بر اساس تحقیقات و گزارشات ارائه شده، بهترین تصفیه و پاک‌سازی مقادیر مواد آلی، نیترات ها، COD و BOD از یک شیرابه قدیمی، در یک واحد تصفیه ترکیبی صورت می گیرد. بدین شرح که واحد های فیزیکی-شیمیایی در پس تصفیه پساب-های حاصل از فرآیند MBR قرار می گیرند.

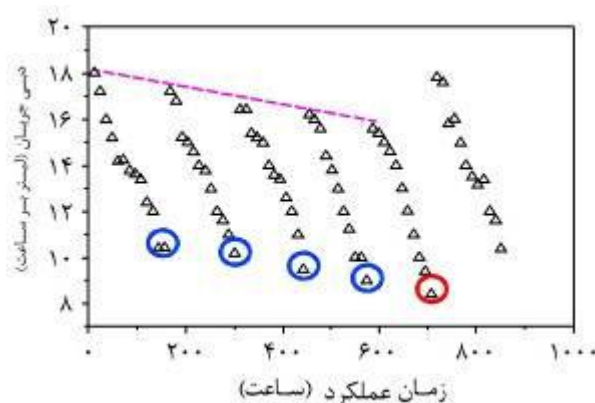
رسوب گذاری شدید غشاها، امری اجتناب ناپذیر در روش های بیولوژیکی- فیزیکی شیمیایی می باشد. برای رفع این مهم، از A/O - GAC در روش حاضر استفاده شده است. بنابراین، ترکیب روش های مذکور به ترتیبی که شکل (۷) نشان می-دهد، سبب دست یابی به یک واحد تصفیه شیرابه اقتصادی با کیفیت بالا می گردد.

گرفتگی غشاها در روش اسمزی، سبب وقوع پدیده هایی چون کاهش آب‌دهی، مصرف انرژی بیش تر (به دلیل افزایش فشار اسمزی)، کاهش بازدهی و نهایتاً منجر به شستشوی درجای غشاها می گردد که این خود امری پر هزینه است. به همین منظور، لوب و همکاران (۱۹۹۷) برای تخمین عمل‌کرد روش اسمزی، معادلات تاثیرات غلظت بر قطبش داخلی ICP<sup>۱</sup> را ارائه می دهند.

$$J_v = K_m \ln\left(\frac{A\pi_{draw} + B}{A\pi_{feed} + J_v + B}\right) \quad (۱)$$

$$J_v = K_m \ln\left(\frac{A\pi_{draw} + J_v + B}{A\pi_{feed} + B}\right) \quad (۲)$$

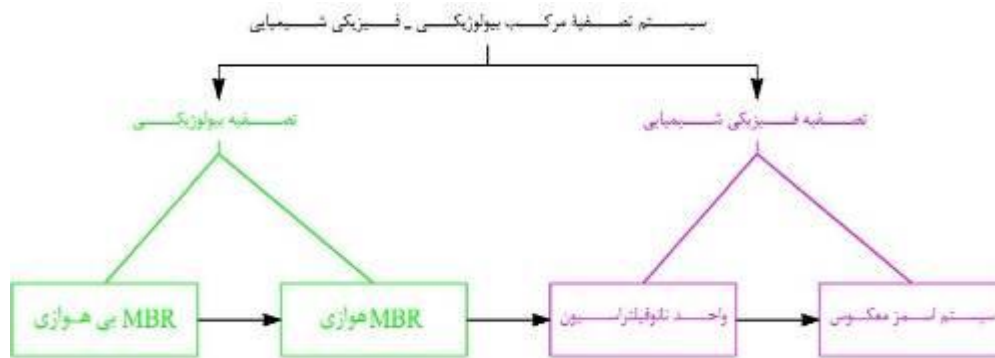
در روابط (۱) و (۲)،  $\pi_{draw}$ ،  $\pi_{feed}$ ،  $A$  و  $B$  به ترتیب فشار اسمزی محلول خارجی جریان ساز و منبع خوراک، نفوذپذیری آب و نمک از میان غشاها می باشند. هم چنین  $K_m$  ضریب جا به جایی جرم می باشد که به میزان تخلخل غشاها بستگی دارد. با توجه به این که ارتباط غشاها با منبع خوراک و محلول خارجی جریان ساز ارتباطی دو طرفه است، دو جهت به نام-های AL-DS<sup>۲</sup> و AL-FS<sup>۳</sup> نام‌گذاری گردیدند. شکل (۶) جریان آب را در جهت AL-FS در تصفیه بلند مدت دستگاه نشان می دهد.



شکل ۶- تغییرات جریان آب در جهت AI - FS در عمل‌کرد بلند مدت دستگاه اسمز مستقیم مقابل زمان  
Figure 6.Changes in water flow in the AI - FS direction of long-term performance forward osmosis against time

4- Anoxic/aerobic granular active carbon + MBR + Nanofiltration + Reverse osmosis

1- Internal Concentration Polarization  
2- Active Layer Facing The Draw Solution  
3- Active Layer Facing The Feed Solution



شکل ۷- دیاگرام واحدهای تشکیل دهنده سیستم تصفیه مرکب به منظور تصفیه شیرابه

Figure 7. Complex system units Diagram for leachate treatment

می توان تصفیه نمود. از این رو، منبع خوراک این سیستم مشخصاتی مشابه و نزدیک با شیرابه های قدیمی دارد. میزان ورودی شیرابه به دستگاه، ۱۰۰۰ متر مکعب در روز از سایت دفن پسماند شهری تایژو بوده که خصوصیات شیمیایی شیرابه منبع خوراک دستگاه در جدول (۶) نشان داده شده است.

به منظور بررسی عمل کرد تئوری فوق، به یک پایلوت آزمایشگاهی واقع در مرکز دفن پسماند شهری تایژو چین اشاره می گردد، گوانزو وانگ و همکاران (۲۰۱۴). هدف از پژوهش اخیر، تصفیه شیرابه با سن قدیمی می باشد، زیرا همان طور که در مقدمه اشاره شد، شیرابه ها با سن قدیمی تخریب پذیری زیستی کم و خاصیت اسیدی بالایی دارند. هم چنین این نوع شیرابه ها را تنها با روش های مرکب

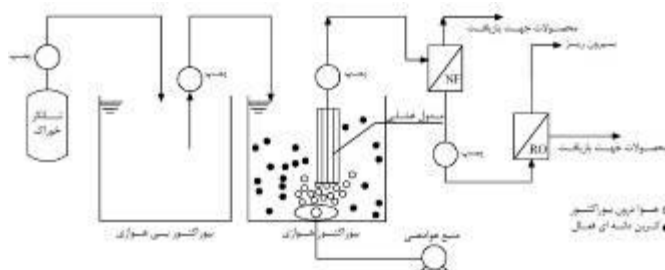
جدول ۱- خصوصیات شیمیایی شیرابه منبع خوراک سیستم تصفیه مرکب

Table 6. Chemical properties of complex treatment system feedstock leachate

متوسط غلظت (میلی گرم بر لیتر)	پارامترها
۴۵۰	BOD
۳۱۳۴/۸۸	COD
۴۳۴/۷۶	$\text{NH}_3 - \text{N}$
۱۰/۳۲-۱۵/۸۴	Na
۵۰/۳۰-۶۹/۷۰	K
۲/۵۸-۳/۹۳	Mg
۰/۰۲۸-۰/۰۴۸	Fe
۰/۰۹-۰/۱۶	Cu
۰/۱۲-۰/۲۰	Cd
۰/۰۹-۰/۱۶	Pb
۰/۱۲-۰/۲۰	Cr

برای تامین فشار کافی در دستگاه، از یک پمپ با فشار زیاد برای پمپاژ بیرون ریز MBR به مدل های غشایی NF استفاده می شود. این واحد، وظیفه فیلتراسیون اصلی را دارد. در نهایت بیرون ریز واحد NF به سیستم RO هدایت می شود. لازم به ذکر است که واحدهای NF و RO به ترتیب تحت فشارهای ۱/۴ و ۲/۸ مگاپاسکال قرار دارند. در مرحله آخر تصفیه، لجن مازاد باقی مانده از واحدهای RO، NF و MBR با یکدیگر آمیخته شده و به منبع خوراک دستگاه فرستاده می شوند. علت این بازگشت، پایداری جرم در دستگاه برای حفظ فشار اسمزی است. شکل (۸)، سیستم مرکب تصفیه بیولوژیکی و فیزیکی شیمیایی را به صورت شماتیک نشان می دهد.

برای نمایش تاثیر A/O – GAC بر روی غشاها به منظور جلوگیری از رسوب گذاری، دو مدل راکتور با شرایط یکسان، با این تفاوت که یکی از راکتورها دارای A/O – GAC می باشد در نظر گرفته شده است. حجم بیوراکتور های هوازی و بی هوازی برابر ۵۰ لیتر می باشد. هم چنین غشاهای بیوراکتوری مورد استفاده از جنس PVDF و به صورت الیاف هالوفایبر می باشند. اندازه چشمه این غشاها ۰/۲ میکرومتر و سطح مقطع موثر آن ها ۰/۲۵ متر مربع می باشد. شیرابه خام از یک تانکر ذخیره توسط یک پمپ دیافراگمی وارد بیوراکتور بدون اکسیژن می گردد. سپس پساب حاصل، توسط یک پمپ وارد بیوراکتور هوازی می شود. غشاها تحت فشار جریان ۶ لیتر بر ساعت به ازای هر متر مربع شار جریان داشته باشد قرار دارند. سیکل پمپاژ به منظور جلوگیری از آسیب رسیدن به پمپ ها، هر ۱۰ دقیقه یکبار با ۵ دقیقه استراحت پمپ انجام شود.



شکل ۸- شکل شماتیک دستگاه سیستم مرکب

Figure 8. Schematic form of complex system

جدول ۷- مقایسه کارایی تعدادی از روش های تجزیه بیولوژیکی شیرابه ها

Table 7. Comparison the performance of a number of methods leachate biodegradation

مشخصه ها	روش سنتی هوازی	روش سنتی بی هوازی	MBR هوازی	MBR بی هوازی
راندمان پاکسازی مواد ارگانیک	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد
کیفیت پساب خروجی	زیاد	متوسط رو به کم	عالی	زیاد
OLR <sup>۱</sup>	متوسط	زیاد	متوسط روبه بالا	زیاد
تولید لجن	زیاد	کم	متوسط روبه بالا	کم
FootPrint	زیاد	متوسط روبه بالا	کم	کم
نگهداری بیومس	متوسط رو به پایین	کم	کامل	کامل

نیاز مواد مغذی	زیاد	کم	زیاد	کم
نیاز قلبایی	کم	زیاد	متوسط روبه بالا	کم
انرژی مورد نیاز	زیاد	کم	زیاد	کم
حساسیت دما	کم	متوسط روبه پایین	متوسط روبه پایین	کم
زمان شروع	۲-۴ هفته	۲-۴ ماه	کمتر از ۱ هفته	کمتر از ۲ هفته
بازیابی انرژی زیستی	ندارد	دارد	ندارد	دارد
طرز تصفیه	کل	پیش تصفیه	کل	کل یا پیش تصفیه

### بحث و نتایج

در این بخش، نتایج به دست آمده در هریک از روش های اشاره شده بررسی خواهند شد. در پایان، براساس اطلاعات به دست آمده، روش های اخیر با یکدیگر مقایسه می شوند.

#### نتایج روش بیوراکتور غشایی بی هوازی

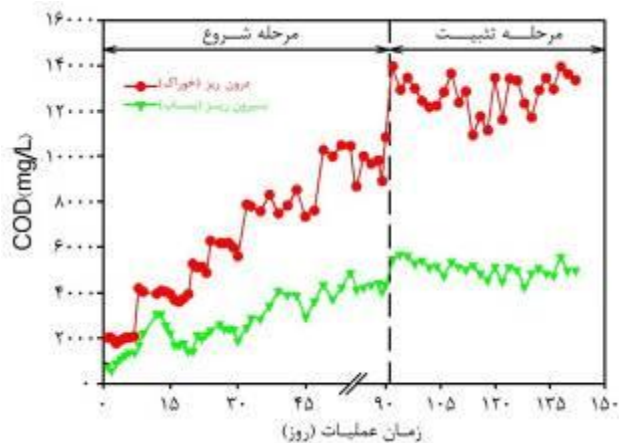
روش های بی هوازی و هوازی MBR، بر اساس تکنولوژی به کار گرفته شده و عمل کرد، به دو دسته سنتی و جدید تقسیم می شوند. در جدول (۷) کارایی روش های سنتی هوازی و بی هوازی و هم چنین روش های هوازی و بی هوازی بیوراکتور غشایی، تحت تغذیه شیرابه ورودی با شرایط یکسان ذکر شده است.

همانطور که جدول (۷) نشان می دهد روش های MBR بی هوازی، با صرف مدت زمان کمتری قادر به تصفیه شیرابه ها با میزان OLR زیاد هستند. علاوه بر این، میزان تولید کم تر لجن مازاد در این روش از دیگر مزایای آن می باشد. بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط هونگ جون لین و همکاران (۲۰۱۳) بر روی یک بیوراکتور غشایی بی هوازی، عدم تثبیت میزان پاک سازی COD و BOD در این روش مشاهده شد. به عبارت دیگر، بهتر است این روش به عنوان پیش تصفیه به کار گرفته شود.

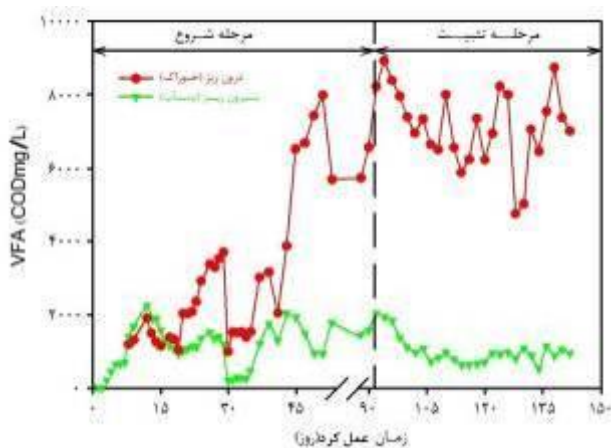
#### نتایج روش بیوراکتور غشایی بی هوازی پویا

بر اساس نتایج به دست آمده از پژوهش ژنگ فانگ زی و همکاران (۲۰۱۴) بر روی یک نمونه پایلوت بیوراکتور غشایی بی هوازی پویا در کشور چین، میزان پاک سازی COD این سیستم در حدود  $3/2 \pm 39/6$  درصد می باشد. در واقع در ۷

روز اول عملکرد، مقدار COD در بیرون ریز دستگاه  $2200 \frac{mg}{l}$  گزارش شده است. از طرفی دیگر، غلظت VFA در بیرون ریز به  $669/8 \frac{mg}{l}$  افزایش می یابد که این امر سبب کاهش pH می شود. در سایر مراحل عمل کرد دستگاه، مشخصات خوراک دستگاه با افزایش ۲۰ درصدی شیرابه ها تغییر می نماید. در این حالت که در دوره ۸ تا ۱۹ روز رخ می دهد، میزان پاک سازی COD کاهش می یابد. به طوری که در روز دوازدهم، این مقدار COD به حداقل مقدار  $22/4$  درصد می رسد. در نهایت، با افزایش دوباره مقدار شیرابه منبع خوراک سیستم از روز بیستم، تغییری در میزان پاک سازی COD مشاهده نمی شود. علت این پدیده مربوط به غلظت بالای مواد ارگانیک مقاوم موجود در شیرابه مرکز دفن پسماند شهری می باشد. در پساب نهایی خارج شده از دستگاه، غلظت COD  $330 \pm \frac{mg}{l}$  گزارش می شود که این مقدار پاک سازی COD در برابر غلظت اولیه  $750 \pm 13000 \frac{mg}{l}$  رضایت بخش است. هم چنین در نسبت  $0.5 = \frac{VFA}{COD}$  میزان پاک سازی COD بیش تر از VFA می باشد، چرا که ترکیبات میکروارگانیسم با وزن مولکولی کم، توانایی لازم در تجزیه بیولوژیکی را نداشته و باید از ترکیباتی با وزن مولکولی بیش تر استفاده شود. شکل (۹) و شکل (۱۰) به ترتیب مقدار پاک سازی COD و تغییرات VFA را در طی زمان نشان می دهد.



شکل ۹- تغییرات COD مخزن خوراک و مخزن بیرون ریز در دو مرحله شروع و تثبیت مقابل زمان  
Figure 9. Changes in feeder tank and outfluent COD In start and established stage against time



شکل ۱۰- منحنی تغییرات VFA مخزن خوراک و مخزن بیرون ریز در دو مرحله شروع و تثبیت عمل کرد دستگاه  
AnDMBR مقابل زمان

Figure 10. Changes in feeder tank and outfluent COD In start and established stage of AnDMBR against time

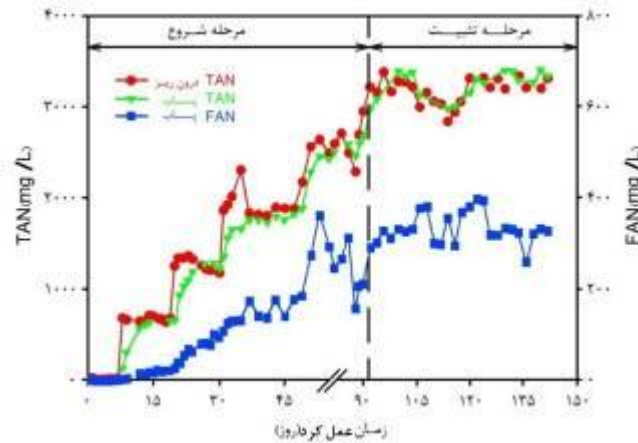
نتایج فوق به صراحت نشان می دهند از آن جا که مقدار COD موجود در بیرون ریز دستگاه بیش تر از حد مجاز است، لذا به واحد تصفیه دیگری نیاز است. به عبارت دیگر از روش AnDMBR می توان به عنوان یک واحد پیش تصفیه برای شیرابه های سخت و مقاوم استفاده نمود. هم چنین روش حاضر نسبت به روش های هوازی دارای مصرف انرژی پایین تری است (۳۲).

با افزایش غلظت  $TAN^1$  در درون ریز دستگاه از  $\frac{mg}{l} \pm 2/6$  به  $21/2$  تا  $3199/4 \pm 136/6 \frac{mg}{l}$ ، این غلظت در بیرون ریز به

شکل (۱۱)، تغییرات TAN و  $FAN^1$  را در مدت زمان عمل-کرد دستگاه نشان می دهد.

نتایج فوق به صراحت نشان می دهند از آن جا که مقدار COD موجود در بیرون ریز دستگاه بیش تر از حد مجاز است، لذا به واحد تصفیه دیگری نیاز است. به عبارت دیگر از روش AnDMBR می توان به عنوان یک واحد پیش تصفیه برای شیرابه های سخت و مقاوم استفاده نمود. هم چنین روش حاضر نسبت به روش های هوازی دارای مصرف انرژی پایین تری است (۳۲).

با افزایش غلظت  $TAN^1$  در درون ریز دستگاه از  $\frac{mg}{l} \pm 2/6$  به  $21/2$  تا  $3199/4 \pm 136/6 \frac{mg}{l}$ ، این غلظت در بیرون ریز به



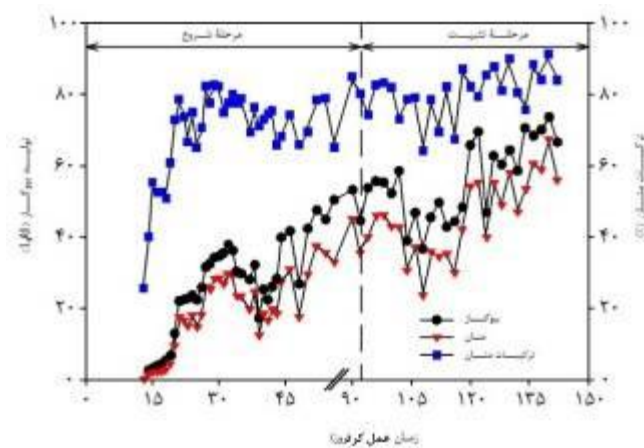
شکل ۱۱- تغییرات TAN و FAN مخزن خوراک و مخزن بیرون ریز در دو مرحله شروع و تثبیت عمل کرد دستگاه

### AnDMBR مقابل زمان

Figure 11. Changes in feeder tank and outfluent TAN and FAN In start and established stage of AnDMBR against time

متان به ازای افزایش مقدار شیرابه است. در واقع در مناطقی که هدف اصلی تولید سوخت های طبیعی است، استفاده از این روش بسیار مناسب می باشد.

همان طور که شکل (۱۲) نشان می دهد، مقدار تولید بیوگاز در دستگاه، با افزایش مقدار شیرابه در خوراک دستگاه بیش تر می شود. میزان متان تولید شده در این روش حدود ۷۰-۹۰ درصد می باشد که در مقایسه با نتایج تحقیقات قبلی بسیار مناسب است (۴۰). از مزیت دستگاه AnDMBR، تولید بالای

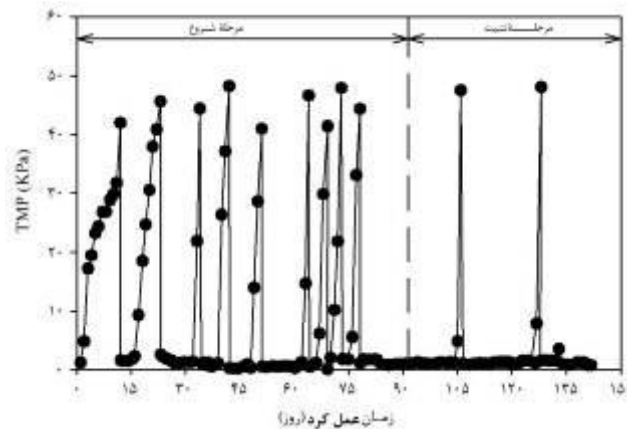


شکل ۱۲- منحنی تغییرات بیوگاز و متان تولیدی در دو مرحله شروع و تثبیت عمل کرد دستگاه AnDMBR مقابل زمان

Figure 12. Changes In produced Biogas and methane In start and established stage of AnDMBR against time

شکل (۱۳) مقادیر مختلف  $TMP^1$  را در مقابل فیلتراسیون غشاها نمایش می دهد. همان طور که مشاهده می شود بهترین فیلتراسیون زمانی رخ می دهد که متوسط مقدار TMP موجود در سیستم برابر ۴۰ کیلوپاسکال باشد.





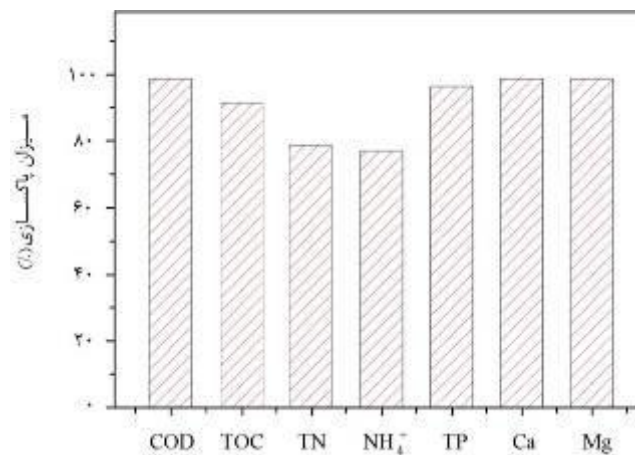
شکل ۱۳- نتایج تغییرات TMP بر روی عمل کرد فیلتراسیون غشاها در دو مرحله شروع و تثبیت عمل کرد دستگاه

### AnDMBR مقابل زمان

Figure 13. Results of TMP changes on membrane filtration performance at the start and fixing time AnDMBR performance

### نتایج روش سیستم غشای اسمزی مستقیم

شکل (۱۴)، پاکسازی ترکیبات آلاینده موجود در شیرابه مرکز دفن پسماند شهری را توسط روش اسمزی مستقیم، در عمل کرد بلند مدت نشان می دهد.



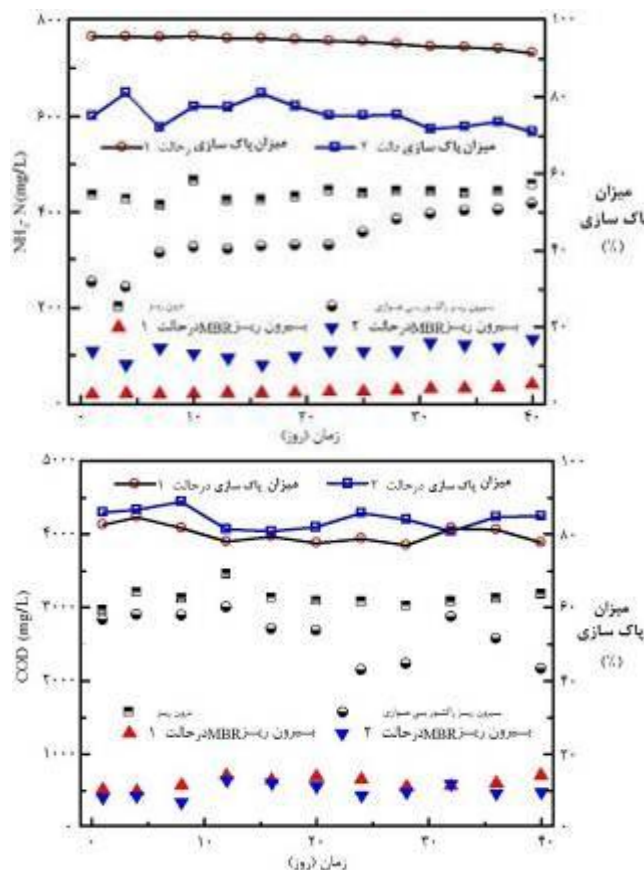
شکل ۱- میزان پاکسازی انواع مواد آلاینده در عمل کرد بلند مدت روش اسمزی مستقیم

Figure 14. The cleanup of pollutants in the long-term performance forward osmosis

### نتایج روش ترکیبی تصفیه بیولوژیکی - فیزیکی شیمیایی

شکل (۱۵) میزان پاکسازی COD و  $NH_3 - N$  را در مدت زمان عمل کرد سیستم تصفیه مرکب نشان می دهد. در این شکل، حالت ۲ و حالت ۱، به ترتیب بیوراکتور هوایی در غیاب و حضور کربن دانه ای فعال می باشند.

طبق نتایج آزمایش مربوط به تصفیه کوتاه مدت، ملاحظه شد که جریان آب در غشاها در حالت AL-FS، بیش تر از حالت AL-DS می باشد. بر این اساس، رسوب گذاری غشاها در حالت AL-DS سریع تر انجام می گردد. هم چنین میزان پاکسازی آلاینده ها، در حالت تصفیه طولانی مدت، بهتر از تصفیه کوتاه مدت می باشد.



شکل ۱۵- میزان پاک‌سازی COD و  $NH_3 - N$  در عملکرد سیستم تصفیه مرکب در حضور کربن دانه ای فعال و در غیاب آن

Figure 15. The COD and  $NH_3 - N$  cleaning in complex system performance in the presence of granular activated carbon and its absence

طبق پژوهش صورت گرفته، ادغام واحدهای بیوراکتور غشایی بی‌هوایی و هوایی، سبب افزایش پاک‌سازی COD در حدود ۸۱/۵ تا ۹۳/۲ می‌گردد. هم‌چنین نتایج به دست آمده در این آزمایش، تاثیر  $A/O - GAC$  را در افزایش پاک‌سازی COD نشان می‌دهد. در واقع  $A/O - GAC$  یک عامل کمک‌کننده به فعالیت میکروارگانیسم‌ها جهت تجزیه آلودگی‌های ارگانیک می‌باشد. از طرفی، اضافه کردن این عامل، تاثیری در پاک‌سازی  $NH_3 - N$  ندارد، زیرا برخی از میکروارگانیسم‌های طبیعی در آن، سبب جلوگیری از تجزیه نیتراتی می‌گردد. با این حال مقدار پاک‌سازی  $NH_3 - N$  در بیوراکتور هوایی در حدود ۹۰ درصد می‌باشد.

مقادیر COD و  $NH_3 - N$  در این سیستم متغیر می‌باشد، یعنی با اندکی تغییر در خوراک دستگاه، این مقادیر نیز تغییر

همان‌طور که مشاهده می‌شود، غلظت COD از  $\frac{3000}{l} mg$  به  $\frac{2500}{l} mg$  در بیوراکتور بی‌هوایی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، تغییرات پاک‌سازی COD در سیستم بی‌هوایی ۲۵ درصد است. مقدار کم پاک‌سازی COD در این سیستم، تجدید ناپذیر بودن شیرابه و عدم توانایی فعالیت میکروارگانیسم‌ها در محیط بی‌هوایی را نشان می‌دهد. علاوه بر این مشکل، غلظت  $NH_3 - N$  موجود از  $\frac{213}{l} mg$  به  $\frac{416}{l} mg$  افزایش می‌یابد. علت این مشکل در نوسان غلظت  $NH_3 - N$  در خوراک دستگاه و هم‌چنین فعالیت مخرب باکتری هاست. به همین دلیل تجزیه انجام شده توسط بیوراکتور غشایی بی‌هوایی کافی نمی‌باشد و این صرفاً به عنوان یک پیش‌تصفیه عمل می‌نماید.

های مختلف روش سیستم مرکب نشان داده شده است. هم چنین در این جدول، کیفیت پساب تصفیه شده در هر مرحله با استاندارد های موجود مقایسه شده اند.

می کنند. برای رفع این مشکل، از واحد های پس تصفیه NF و RO استفاده می گردند. با استفاده از این واحد های پس تصفیه، مقادیر COD و  $\text{NH}_3 - \text{N}$  به ترتیب در حدود  $380 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$  و  $32/9 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$  می باشد. در جدول (۸)، عملکرد واحد-

جدول ۸- خصوصیات شیمیایی شیرابه منبع خوراک سیستم تصفیه مرکب (تمامی واحدها بر حسب میلی گرم بر لیتر)

Figure 8. Chemical properties of the feedstock in complex treatment system (all units in milligrams per liter)

استاندارد*	استاندارد**	عمل کرد سیستم تصفیه مرکب			پارامترها
		واحد اسمز معکوس	واحد نانوفیلتراسیون	واحد MBR	
۶۰	۱۰۰	۱۲/۳۹	۲۷۶/۲۵	۵۷۹/۷	COD
۱۰	۲۵	۲/۶	۲۶/۵۵	۳۳	$\text{NH}_3 - \text{N}$
-	۰/۰۱	مشاهده نشد	مشاهده نشد	۰/۰۴۷	Cd
-	۰/۱	مشاهده نشد	مشاهده نشد	۰/۱۲	Pb
-	۰/۱	مشاهده نشد	مشاهده نشد	۰/۱۷	Cr
۲۵۰	-	۷۸/۶	۶۸۵/۰	۱۲۳۳/۹	$\text{Cl}^-$

\* استاندارد کنترل آلودگی مرکز دفن پسماند جامد، چین، GB 8978 – 1996

\*\* استاندارد کیفیت پساب تصفیه شده برای استفاده مجدد در مناطق شهری، چین، GB/T 19923 – 2005

### نتیجه گیری

استفاده از کربن دانه ای فعال در روش های اخیر، سبب کاهش رسوب گذاری در غشاها گردیده است. علاوه بر این، انعطاف پذیری برخی پایلوت ها بی هوازی، امکان استفاده از غشای روش های سنتی در بیوراکتور های بی هوازی را فراهم می نماید. این مزیت سبب کاهش هزینه به روز رسانی در مراکز دفن پسماند قدیمی می گردد.

اگر چه برخی غشاهای بیوراکتوری نوین به تنهایی قابلیت تجزیه پساب های مقاوم را ندارند؛ اما ادغام این روش ها با روش های فیزیکی شیمیایی نظیر FO و RO سبب افزایش کیفیت پساب خروجی می گردد. با این حال، به دلیل توانایی بالای غشاهای بیوراکتوری نوین در تصفیه و تجزیه آلاینده ها، استفاده از این پایلوت ها به شیرابه های مراکز دفن پسماند شهری محدود نمی شود و می توانند در تصفیه انواع فاضلاب- های صنعتی، پتروشیمی و صنایع غذایی به کار گرفته شوند.

کشور ایران از جمله مناطق نیمه خشک جهان می باشد. علاوه بر این، آب های زیر زمینی یکی از مهم ترین منابع تامین کننده آب شیرین در کشور محسوب می شوند. هم چنین شیرابه ها از جمله مواد آلوده کننده این منابع هستند. امروزه از میان انواع روش هایی که به منظور تصفیه و تجزیه شیرابه ها به کار می روند، روش های تجزیه بیولوژیکی دامنه وسیعی را به خود اختصاص داده اند، به طوری که در سطح بین المللی پژوهش های بسیار زیادی پیرامون آن ها انجام گرفته است. علاوه بر آن، بسیاری از سایت های دفن زباله در سطح جهان، در حال بهره برداری از این روش های جدید برای تصفیه و کنترل شیرابه ها هستند. با توجه به توانایی بالای تولید بیومس در غشاهای بیوراکتوری، می توان در مناطق محرومی از کشور که نیازمند سوخت های ارزان هستند از این روش ها استفاده نمود.

9. Ng AN, Kim AS. A mini-review of modeling studies on membrane bioreactor (MBR) treatment for municipal wastewaters. *Desalination*. 2007;212(1):261-81.
10. Lesjean B, Huisjes E. Survey of the European MBR market: trends and perspectives. *Desalination*. 2008; 231(1):71-81.
11. Chiemchaisri C, Chiemchaisri W, Nindee P, Chang C, Yamamoto K. Treatment performance and microbial characteristics in two-stage membrane bioreactor applied to partially stabilized leachate. *Water Science & Technology*. 2011;64(5):1064-72.
12. Li G, Wang W, Du Q. Applicability of nanofiltration for the advanced treatment of landfill leachate. *Journal of applied polymer science*. 2010;116(4):2343-7.
13. Robinson T. Membrane bioreactors: Nanotechnology improves landfill leachate quality. *Filtration & separation*. 2007;44(9):38-9.
14. Schwarzenbeck N, Leonhard K, Wilderer P. Treatment of landfill leachate-High tech or low tech? A case study. *Water Science & Technology*. 2004;48(11):277-84.
15. Puszczalo E, Bohdziewicz J, Świerczyńska A. The influence of percentage share of municipal landfill leachates in a mixture with synthetic wastewater on the effectiveness of a treatment process with use of membrane bioreactor. *Desalination and Water Treatment*. 2010;14(1-3):16-20.
16. Svojitka J, Wintgens T, Melin T. Treatment of landfill leachate in a bench scale MBR. *Desalination and Water Treatment*. 2009;9(1-3):136-41.

## References

1. Schiopu AM, Gavrilescu M. Options for the treatment and management of municipal landfill leachate: common and specific issues. *CLEAN-Soil, Air, Water*. 2010;38(12):1101-10.
2. Wiszniowski J, Robert D, Surmacz-Gorska J, Miksch K, Weber J. Landfill leachate treatment methods: A review. *Environmental Chemistry Letters*. 2006;4(1):51-61.
3. Baig S, Coulomb I, Courant P, Liechti P. Treatment of landfill leachates: Lapeyrouse and Satrod case studies. 1999.
4. Renou S, Givaudan J, Poulain S, Dirassouyan F, Moulin P. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of hazardous materials*. 2008;150(3):468-93.
5. Bohdziewicz J, Kwarciak A. The application of hybrid system UASB reactor-RO in landfill leachate treatment. *Desalination*. 2008;222(1):128-34.
6. Wang LK, Menon R. Treatment of industrial effluents, municipal wastes, and potable water by membrane bioreactors. *Membrane and Desalination Technologies: Springer*; 2011. p. 201-36.
7. Yang W, Cicek N, Ilg J. State-of-the-art of membrane bioreactors: Worldwide research and commercial applications in North America. *Journal of membrane science*. 2006; 270 (1): 201-11.
8. Cicek N. A review of membrane bioreactors and their potential application in the treatment of agricultural wastewater. *Canadian Biosystems Engineering*. 2003;45:6.37-6.

- Environmental technology. 1997; 18(6):569-80.
25. Campagna M, Çakmakçı M, Yaman FB, Özkaya B. Molecular weight distribution of a full-scale landfill leachate treatment by membrane bioreactor and nanofiltration membrane. Waste management. 2013; 33(4):866-70.
  26. Ersu C, Ong S. Treatment of wastewater containing phenol using a tubular ceramic membrane bioreactor. Environmental technology. 2008; 29(2):225-34.
  27. Lin H, Chen J, Wang F, Ding L, Hong H. Feasibility evaluation of submerged anaerobic membrane bioreactor for municipal secondary wastewater treatment. Desalination. 2011; 280(1):120-6.
  28. An Y, Wang Z, Wu Z, Yang D, Zhou Q. Characterization of membrane foulants in an anaerobic non-woven fabric membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. Chemical Engineering Journal. 2009; 155(3):709-15.
  29. Walker M, Banks C, Heaven S. Development of a coarse membrane bioreactor for two-stage anaerobic digestion of biodegradable municipal solid waste.
  30. Ye M, Zhang H, Wei Q, Lei H, Yang F, Zhang X. Study on the suitable thickness of a PAC-precoated dynamic membrane coupled with a bioreactor for municipal wastewater treatment. Desalination. 2006; 194(1): 108-20.
  31. Ma J, Wang Z, Zou X, Feng J, Wu Z. Microbial communities in an anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for municipal
  17. Lin H, Peng W, Zhang M, Chen J, Hong H, Zhang Y. A review on anaerobic membrane bioreactors: applications, membrane fouling and future perspectives. Desalination. 2013;314:169-88.
  18. Grethlein HE. Anaerobic digestion and membrane separation of domestic wastewater. Journal (Water Pollution Control Federation). 1978:754-63.
  19. Li A, Kothari D, Corrado J, editors. Application of membrane anaerobic reactor system for the treatment of industrial wastewaters. Proceedings of the Industrial Waste Conference, Purdue University (USA); 1984.
  20. Vallero M, Lettinga G, Lens P. Long-term adaptation of methanol-fed thermophilic (55 C) sulfate-reducing reactors to NaCl. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. 2003;30(6):375-82.
  21. Willetts J, Ashbolt N, Moosbrugger R, Aslam M. The use of a thermophilic anaerobic system for pretreatment of textile dye wastewater. Waste Minimisation and End of Pipe Treatment in Chemical and Petrochemical Industries. 2000; 42(5):309-16.
  22. Le-Clech P, Chen V, Fane TA. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. Journal of Membrane Science. 2006;284(1):17-53.
  23. Brockmann M, Seyfried C. Sludge activity and cross-flow microfiltration—a non-beneficial relationship. Water Science and Technology. 1996;34(9):205-13.
  24. Ghyoot W, Verstraete W. Coupling membrane filtration to anaerobic primary sludge digestion.

36. Mahmoudkhani R, Hassani A, Torabian A, Borghei S. Study on high-strength anaerobic landfill leachate treatability by membrane bioreactor coupled with reverse osmosis. *International Journal of Environmental Research*. 2011; 6(1):129-38.
37. Cath TY, Childress AE, Elimelech M. Forward osmosis: principles, applications, and recent developments. *Journal of membrane science*. 2006; 281(1):70-87.
38. Zhao S, Zou L, Tang CY, Mulcahy D. Recent developments in forward osmosis: opportunities and challenges. *Journal of Membrane Science*. 2012;396:1-21.
39. Cho YH, Han J, Han S, Guiver MD, Park HB. Polyamide thin-film composite membranes based on carboxylated polysulfone microporous support membranes for forward osmosis. *Journal of Membrane Science*. 2013;445:220-7.
40. Nedwell D, Reynolds P. Treatment of landfill leachate by methanogenic and sulphate-reducing digestion. *Water Research*. 1996;30(1):21-8.
- wastewater treatment: Comparison of bulk sludge and cake layer. *Process Biochemistry*. 2013;48(3):510-6.
32. Xie Z, Wang Z, Wang Q, Zhu C, Wu Z. An anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for landfill leachate treatment: Performance and microbial community identification. *Bioresource technology*. 2014; 161:29-39.
33. Liu H, Yang C, Pu W, Zhang J. Formation mechanism and structure of dynamic membrane in the dynamic membrane bioreactor. *Chemical Engineering Journal*. 2009; 148(2): 290-5.
34. Hasar H, Unsal SA, Ipek U, Karatas S, Cinar O, Yaman C, et al. Stripping/flocculation/membrane bioreactor/reverse osmosis treatment of municipal landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 171(1):309-17.
35. Insel G, Dagdar M, Dogruel S, Dizge N, Cokgor EU, Keskinler B. Biodegradation characteristics and size fractionation of landfill leachate for integrated membrane treatment. *Journal of hazardous materials*. 2013; 260:825-32.