

استفاده از بیوراکتور غشایی جانبی برای حذف فلزات سنگین از پساب

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۷

کد مقاله: ۷۲۵۴۹

ساناز خدایاری^۱

چکیده

با پیشرفت صنعت در دهه‌های اخیر، وجود آلاینده‌های فلزات سنگین در پساب‌های صنعتی و وارد شدن آن‌ها به محیط زیست، یکی از اصلی‌ترین مشکلات آلودگی آب و سلامت انسان شده‌است. در این زمینه، برای جداسازی یون‌های فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی روش‌های مختلفی مطرح شده‌است. در این تحقیق استفاده از بیوراکتور غشایی جانبی برای حذف فلزات سنگین از پساب مورد بررسی قرار گرفت. با گذشت زمان میزان COD پساب روند کاهش می‌یابد. کمترین و بیشترین مقدار COD در شرایط بالا در زمان ۶۰ دقیقه با مقدار ۳۰۷۲ میلی‌گرم بر لیتر و خوراک ورودی با میزان ۳۵۸۹ میلی‌گرم بر لیتر حاصل شد که مقدار ۱۴/۵ درصد کاهش پارامتر COD نسبت به خوراک ورودی را داریم. بیشترین مقدار TSS مربوط به پساب ورودی با مقدار ۳۷۹ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین مقدار در زمان ۶۰ دقیقه با مقدار ۱۹۱ میلی‌گرم بر لیتر بدست آمده‌است. بیشترین مقدار DO مربوط به خوراک ورودی با میزان ۴/۴ میلی‌گرم بر لیتر و همچنین کمترین مقدار DO در مدت ۶۰ دقیقه با میزان ۰/۹۵ میلی‌گرم بر لیتر را بدست آمد که نسبت به خوراک ورودی ۷۸٪ کاهش DO را داریم. در زمان‌های متفاوت میزان NTU روند کاهشی دارد. در شرایط مذکور بیشترین مقدار NTU مربوط به پساب ورودی با مقدار ۳۹۰ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین مقدار در زمان ۶۰ دقیقه استفاده می‌گردد با مقدار ۱۸۷ میلی‌گرم بر لیتر بدست آمده‌است. بیشترین درصد پس‌زنی فلز سنگین Cu (II) در زمان ۴۵ دقیقه با مقدار ۷۲,۴۴٪ بدست آمد. بیشترین درصد پس‌زنی فلز سنگین Pb (II) در زمان ۶۰ دقیقه با مقدار ۸۹,۶۵٪ بدست آمد.

واژگان کلیدی: غشا، بیوراکتور غشایی جانبی، فلزات سنگین، پساب

۱- گروه مهندس HSE، واحد گچساران، دانشگاه آزاد اسلامی، گچساران، ایران (نویسنده مسئول)

sanazkhodayari145@gmail.com

حذف مواد آلاینده از فاضلاب به کمک فرآیندهای بسیار متنوعی به انجام می‌رسد که بر این اساس فرآیندهای تصفیه فاضلاب را به سه دسته اصلی فرآیندهای فیزیکی، فرآیندهای شیمیایی و فرآیندهای بیولوژیکی تقسیم بندی می‌نمایند [۱]. تصفیه پساب‌های شهری و صنعتی عموماً به روش بیولوژیکی و با کمک لجن فعال انجام می‌گیرد. بدین ترتیب آلاینده‌های محلول موجود در فاضلاب تصفیه شده و جمعیت لجن سوسپانسیونی در داخل سیستم افزایش پیدا می‌کند. در نهایت، جداسازی لجن از جریان تصفیه شده به کمک نیروی گرانشی در تانک ته‌نشینی اتفاق می‌افتد [۲]. مشکلات عمده این روش تصفیه؛ فضای بسیار زیاد مورد نیاز در این سیستم‌ها به دلیل وجود تانک ته‌نشینی، تبخیر حجم زیادی از آب تصفیه شده در تانک‌های رو باز و همچنین کیفیت پایین جریان تصفیه شده از معایب جدی سیستم‌های تصفیه با لجن فعال است [۳]. با روی کار آمدن بیوراکتور غشایی و جایگزینی تانک ته‌نشینی با فیلتراسیون غشایی، این مشکلات تا حد زیادی حل شده است. در واقع سیستم بیوراکتور غشایی به عنوان یک فناوری نوین و تولید جریان تصفیه شده با کیفیت بسیار بالا، تا به امروز توجه افراد و گروه‌های مختلفی را به خود جلب کرده است [۴]. با این حال مشکل عمده این سیستم‌ها، هزینه بالای عملیاتی مربوط به نگهداری و تعویض غشاهای موجود در آن است. همانگونه که گفته شد عمده هزینه‌ها در سیستم‌های بیوراکتور غشایی، مربوط به نگهداری و شستشوی غشای آن است. لذا به نظر می‌رسد اصلاح سطح غشا می‌تواند مشکل گرفتگی آن را رفع کرده و با کم کردن تعداد دفعات شستشو، به منظور جلوگیری از کاهش فلاکس عبوردهی، باعث کاهش در هزینه‌ها شود [۵-۸]. حضور فلزات سنگین و شبه‌فلزات در محیط‌زیست یک نگرانی بزرگ به حساب می‌آید، چرا که این مواد از جمله آلاینده‌های پایدار بوده و هرگز به ترکیبات بی‌ضرر تجزیه و تبدیل نمی‌شوند و با تجمع در اندام‌های زنده منجر به بیماری و اختلال می‌شوند. مسمومیت ناشی از حضور سرب، آرسنیک، جیوه، روی، مس و آلومینیوم عبارتی است: استفرغ، تشنج، فلج، آتاکسی، هموگلوبینوری، اختلالات دستگاه گوارش، اسهال، استوماتیت، ترمور، افسردگی و ذات‌الریه [۹].

۲- روش تحقیق

۲-۱- بررسی عملکرد غشا با استفاده از سیستم بیوراکتور غشایی

یک بیوراکتور غشایی از نوع جانبی شامل محفظه مخزن هوادهی و مخزن پساب پتروشیمی که مواد منعقد کننده با غلظت‌های مختلف در آن قرار می‌گیرد، ماژول غشایی، توزیع کننده هوا برای هوا دهی سیستم و یک پمپ برای ایجاد مکش از غشا می‌باشد. مساحت غشا ۱۴/۸۲ سانتی‌متر مربع می‌باشد. این فرآیند در شرایط عملیاتی فشار ۸ بار و دبی ۴ لیتر بر دقیقه و دمای محیط درجه سانتی‌گراد انجام شد. لذا برای بدست آوردن شار آب عبوری از غشاها از معادله (۱) و (۲) استفاده شود.

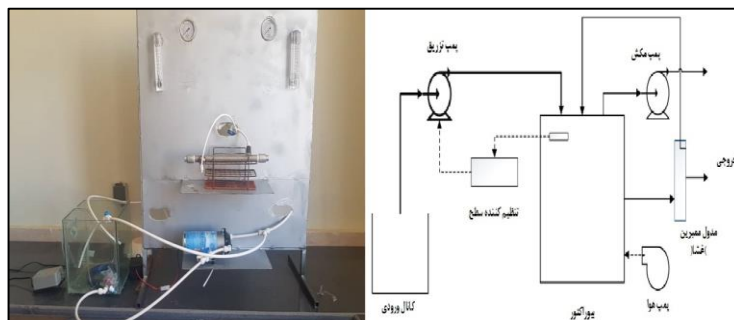
$$J = \frac{\Delta V}{A_m \cdot \Delta t} \quad (1)$$

$$A = \frac{J}{\Delta P} \quad (2)$$

که در روابط بالا A_m مساحت مؤثر غشا، ΔV حجم آب نفوذ کرده در غشا، Δt زمان و ΔP اختلاف فشار می‌باشد. همچنین برای میزان دفع فلز سنگین (Rejection) از رابطه (۳) استفاده شود.

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (4)$$

که در این رابطه C_p و C_f به ترتیب غلظت فلز سنگین نفوذ کرده و غلظت فلز سنگین در خوراک است. شمایی از بیوراکتور غشایی جانبی بکار رفته در این پژوهش شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱): شمایی از بیوراکتور غشایی جانبی بکار رفته در این پژوهش.

جدول (۱): مشخصات پساب پتروشیمی مورد استفاده

پارامتر	مقدار
COD (mg/L)	۳۵۸۹
Tss (mg/L)	۳۴۹
pH	۷/۱
DO (mg/L)	۴/۳۵
NTU (mg/L)	۳۹۵
Cu (II) (mg/L)	۸/۲۵
Pb (II) (mg/L)	۱۴/۳۲

پساب مورد نظر از پساب مجتمع پتروشیمی پردیس تهیه گردید. مشخصات پساب تهیه شده در جدول (۱) آورده شده است. ابتدا پساب همراه با منعقدکننده آلوم با غلظت ۵۰ mg/L به مخزن سیستم بیوراکتور وارد می‌شود و آزمایش‌های مربوطه در فشار ۵ bar و زمان‌های مختلف انجام می‌گیرد و پارامترهای مربوطه اندازه‌گیری می‌شود. که این پارامترها عبارتند از:

(۱) اندازه‌گیری COD^۱

(۲) اندازه‌گیری TSS^۲

(۳) اندازه‌گیری DO^۳

(۴) اندازه‌گیری NTU^۴

(۵) اندازه‌گیری MLSS^۵

الف- اندازه‌گیری COD. آنالیز تعیین میزان اکسیژن خواهی شیمیایی یکی از پارامترهای اندازه‌گیری آلودگی آب و فاضلاب و معرفی برای میزان آلودگی‌های آلی نمونه‌ها است. میزان COD در طراحی سیستم‌های تصفیه آب آشامیدنی بسیار مهم است. آلودگی‌های آب و فاضلاب عموماً به دلیل عوامل و ذرات خارجی است، که میزان آن‌ها در مشخص نمودن میزان آلودگی‌های آب موثر است. محاسبه میزان هر کدام از این آلاینده‌ها به صورت جداگانه بسیار دشوار است. در نتیجه مناسب‌تر است تا میزان این ذرات را به طور غیرمستقیم محاسبه کرد. یکی از روش‌های تعیین غیر مستقیم آلاینده‌ها، محاسبه مقدار اکسیژن مورد نیاز آن‌ها برای اکسید شدن است. یکی از روش‌های تشخیص، تعیین مقدار اکسیژن مورد نیاز برای اکسیداسیون آلاینده‌ها می‌باشد. برای اکسیداسیون هر ترکیبی به میزانی اکسیژن نیاز است. این نیاز شیمیایی COD نامیده می‌شود. در نتیجه هر چه میزان آلاینده‌ها بیشتر باشد مقدار اکسیژن لازم نیز بیشتر است. بیشتر کاربردهای آنالیز COD مربوط به محاسبه مقدار آلاینده‌های موجود در آب‌های سطحی همانند آب دریاچه‌ها، پساب‌ها، رودخانه‌ها و فاضلاب است.

ب- اندازه‌گیری TSS: کل مواد جامد معلق در آب که به اختصار TSS می‌نامند در واقع ذرات جذب شده توسط یک فیلتر می‌باشد. این ذرات ممکن است بزرگ یا بسیار ریز و در حد یک میکرون باشند، همچنین این ذرات ممکن است شامل شن و ماسه، چوب و یا انواع میکروب و باکتری‌ها باشند. برای بدست آوردن مقدار TSS آب ابتدا آب را از یک فیلتر عبور می‌دهند و سپس ذرات باقی مانده بر روی این فیلتر را جمع‌آوری، خشک و وزن می‌کنند و مقدار TSS را بدست می‌آورند. واحد مجموع جامدات معلق در آب بر حسب ppm یا mg/L بیان می‌شود.

ج- اندازه‌گیری DO: اکسیژن غیر مرکب یا اکسیژن آزاد (O₂) اکسیژنی است که با هیچ عنصر دیگر پیوند ندارد. و اکسیژن محلول، وجود این مولکول‌های آزاد O₂ در آب است. مولکول پیوندی اکسیژن در آب (H₂O) در یک ترکیب قرار دارد و به عنوان DO حساب نمی‌شود. می‌توان تصور کرد که مولکول‌های اکسیژن آزاد در آب همانطور که نمک یا شکر هنگام همزن انجام می‌دهند، در آب حل می‌شوند. برای محاسبه غلظت اکسیژن محلول از اشباع هوا، شناخت دما و شوری نمونه لازم است. فشار بارومتریک قبلاً در نظر گرفته شده است زیرا فشار جزئی اکسیژن به درصد اشباع هوا کمک می‌کند. سپس در قانون هنری می‌توان از شوری و دما استفاده کرد تا غلظت DO در ۱۰۰٪ اشباع هوا ۱۰ باشد. با این حال، استفاده از نمودار حلالیت اکسیژن آسان‌تر است. این نمودارها غلظت DO را در ۱۰۰٪ اشباع هوا در دماهای مختلف و شوری نشان می‌دهد. سپس این مقدار با اندازه‌گیری درصد اشباع هوا برای محاسبه غلظت DO ضرب می‌شود.

د- اندازه‌گیری NTU: کدورت پدیده‌ای است که میزان شفافیت آب را مشخص می‌کند و به عنوان یک خاصیت ظاهری آب محسوب می‌گردد. کدورت باعث پراکندگی یا جذب نور در حین عبور آن بر روی یک خط مستقیم در آب می‌شود. هر یک از ذرات موجود در آب بر حسب شکل، اندازه و تراکم آن‌ها در آب جذب یا پراکنده ساختن بخشی از نور تابیده شده به آن، میزان نور عبور کرده را تقلیل می‌دهند. هرچه شدت نور عبور کرده بیشتر باشد، ظاهر آب شفاف‌تر و زلال‌تر به نظر می‌آید و هرچه میزان و تراکم عامل‌های خارجی، اعم از آلی و معدنی (گل و لای، خاک رس، سیلت، باکتری‌ها و ویروس‌ها، میکروارگانیسم‌ها، رشته‌های گیاهی ترکیبات آلی رنگی محلول، ذرات سیاه مثل کربن فعال و اکسیدهای فلزی) در آب فزون‌تر باشد، میزان نور جذب یا منحرف‌شده بیشتر و در نتیجه کدورت آب بیشتر است. در روش اولیه اندازه‌گیری کدورت، قدرت عبور نور را از میان آب با قدرت پراکنده سازی و شکسته شدن آن مقایسه می‌نمایند که این اندازه‌گیری اساس روش استاندارد تعیین کدورت آب به وسیله کدورت

1 - Chemical Oxygen Demand

2 - Total suspended solids

3 - Dissolved Oxygen

4 - Nephelometric Turbidity Unit

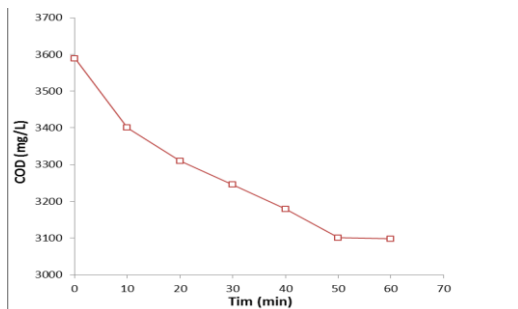
5 - Mixed liquor suspended solids

سنج است. امروزه داده‌های بدست آمده از کدورت سنج بر حسب واحدهای فرمازین^۱ یا نوپلمتری که براساس اصول پراکندگی نور است، بیان می‌شوند. اندازه گیری کدورت بر اساس تکنولوژی مادون قرمز انجام می‌گردد که امکان اندازه گیری سریع میزان کدورت محلول را در محل تست برای شما فراهم می‌سازد.

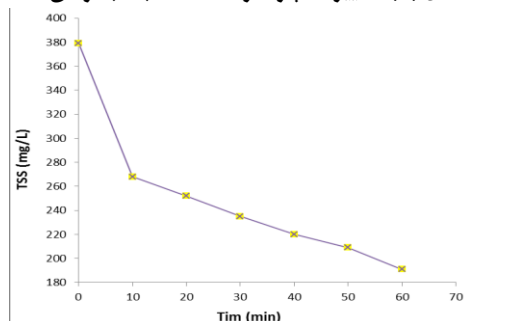
۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج عملکرد غشاهای ساخته شده

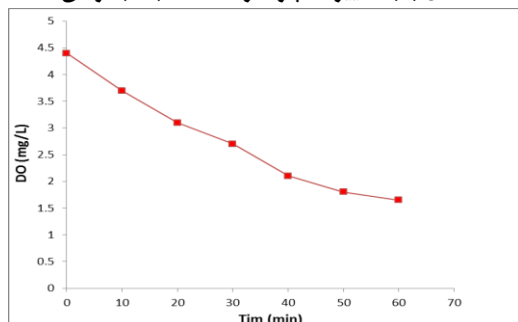
شکل (۲) تغییرات پارامتر COD نسبت به زمان در فشار ۸ بار، دبی ۴ لیتر بر دقیقه و دمای محیط را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با گذشت زمان میزان COD پساب پتروشیمی روند کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین پارامترهای سنجش آلودگی آب است. این پارامتر میزان مواد خارجی که وارد آب شده و باعث آلودگی آن می‌شوند را اندازه گیری می‌کند. لذا هرچه مقدار میزان مواد خارجی بیشتر باشد، آلودگی آب نیز بیشتر است. در نتیجه اندازه‌گیری مقدار مواد خارجی پساب پتروشیمی می‌تواند کلید اصلی در تعیین مقدار آلودگی پساب باشد. با توجه به شکل زیر با گذشت ۵۰ دقیقه از انجام هوادهی میزان COD روند کاهش محسوسی ندارد که می‌تواند مربوط تأثیر سریع هوادهی می‌باشد. کمترین و بیشترین مقدار COD در شرایط بالا به ترتیب در زمان ۶۰ دقیقه با مقدار ۳۱۵۲ میلی‌گرم بر لیتر و خوراک ورودی با میزان ۳۵۸۹ میلی‌گرم بر لیتر حاصل شد که مقدار ۱۵/۲ درصد کاهش پارامتر COD نسبت به خوراک ورودی را داریم.



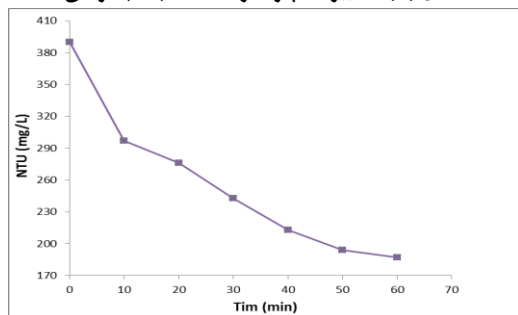
شکل (۲): تغییرات پارامتر COD نسبت به زمان



شکل (۳): تغییرات پارامتر TSS نسبت به زمان



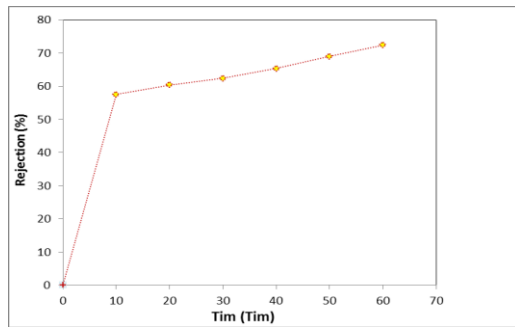
شکل (۴): تغییرات پارامتر DO نسبت به زمان



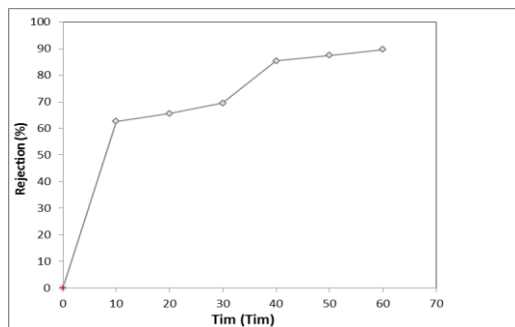
شکل (۵): تغییرات پارامتر NTU نسبت به زمان

شکل (۳) تغییرات پارامتر TSS نسبت به زمان در فشار ۸ بار، دبی ۴ لیتر بر دقیقه و دمای محیط را نشان می‌دهد. TSS یکی از پارامترهای مهم در سنجش آب و پساب‌ها می‌باشد. هرچه عدد TSS بالاتر باشد بدین معنا است که آب یا فاضلاب حاوی مواد جامد معلق بسیاری است که باعث آلودگی می‌شود. میزان TSS روند کاهشی دارد. در شرایط مذکور بیشترین مقدار TSS مربوط به پساب ورودی با مقدار ۳۴۹ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین مقدار در زمان ۶۰ دقیقه با مقدار ۱۸۵ میلی‌گرم بر لیتر بدست آمده است.

شکل (۴) تغییرات DO در زمان‌های مختلف در فشار ۸ بار، دبی ۴ لیتر بر دقیقه و دمای محیط را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با گذشت زمان فرآیند هوادهی پساب پتروشیمی میزان DO روند کاهشی دارد که می‌تواند به دلیل حضور منعقدکننده سولفات آلومینیم باشد که باعث جذب اکسیژن محلول می‌گردد و باعث می‌شود که میزان DO روند کاهشی محسوسی داشته باشد. بیشترین مقدار DO مربوط به خوراک ورودی با میزان ۴/۴ میلی‌گرم بر لیتر و همچنین کمترین مقدار DO در مدت ۶۰ دقیقه با میزان ۰/۹۵ میلی‌گرم بر لیتر را بدست آمد که نسبت به خوراک ورودی ۷۸٪ کاهش DO را داریم.



شکل (۵): عملکرد بیوراکتور غشایی برای پس‌زنی فلز سنگین Cu (II) موجود در پساب پتروشیمی در زمان‌های متفاوت



شکل (۶): عملکرد بیوراکتور غشایی برای پس‌زنی فلز سنگین Cu (II) موجود در پساب پتروشیمی در زمان‌های متفاوت

۴. نتیجه‌گیری

از جدیدترین فناوری‌هایی که در زمینه تصفیه آب و پساب توسط محققان و سازمان‌های محیط زیست دنیا مورد توجه قرار گرفته است بیوراکتورهای غشایی (MBR) می‌باشد. این فناوری اولین بار در حدود ۴۰ سال پیش مورد استفاده قرار گرفته و امروزه به عنوان یکی از روش‌های مؤثر، جدید و کارآمد برای تصفیه آب و پساب مورد استقبال محققان و صنایع قرار گرفته است. بیشترین مقدار TSS مربوط به پساب ورودی با مقدار ۳۴۹ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین مقدار در زمان ۶۰ دقیقه با مقدار ۱۸۵ میلی‌گرم بر لیتر بدست آمده است. بیشترین مقدار DO مربوط به خوراک ورودی با میزان ۴/۴ میلی‌گرم بر لیتر و همچنین کمترین مقدار DO در مدت ۶۰ دقیقه با میزان ۰/۹۵ میلی‌گرم بر لیتر را بدست آمد که نسبت به خوراک ورودی ۷۸٪ کاهش DO را داریم. در مختلف در زمان‌های متفاوت میزان NTU روند کاهشی دارد. در شرایط مذکور بیشترین مقدار NTU مربوط به پساب ورودی با مقدار ۳۹۰ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین مقدار مربوط به حالتی که زمان ۶۰ دقیقه استفاده می‌گردد با مقدار ۱۸۷ میلی‌گرم بر لیتر بدست آمده است. با گذشت زمان عملکرد بیوراکتور برای پس‌زنی فلز سنگین Cu (II) می‌گذارد. بیشترین درصد پس‌زنی فلز سنگین Cu (II) در زمان ۴۵ دقیقه با مقدار ۷۲/۴۴٪ بدست آمد. با گذشت زمان عملکرد بیوراکتور غشایی برای پس‌زنی فلز سنگین Pb (II) بهتر می‌شود. بیشترین درصد پس‌زنی فلز سنگین Pb (II) در زمان ۶۰ دقیقه با مقدار ۸۹/۶۵٪ بدست آمد.

شکل (۵) تغییرات NTU در زمان‌های مختلف در فشار ۸ بار، دبی ۴ لیتر بر دقیقه و دمای محیط را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با گذشت زمان انجام فرآیند هوادهی پساب پتروشیمی پارامتر NTU محلول روند کاهشی دارد که این روند در زمان‌های اولیه فرآیند با شیب زیادی صورت می‌پذیرد. لذا با توجه به شکل (۵) مختلف در زمان‌های متفاوت میزان NTU روند کاهشی دارد. در شرایط مذکور بیشترین مقدار NTU مربوط به پساب ورودی با مقدار ۳۹۰ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین مقدار مربوط به حالتی که زمان ۶۰ دقیقه استفاده می‌گردد با مقدار ۱۸۷ میلی‌گرم بر لیتر بدست آمده است.

شکل (۶) عملکرد غشاهای متفاوت برای پس‌زنی فلز سنگین Cu (II) موجود در پساب پتروشیمی در زمان‌های متفاوت، فشار ۸ بار، دبی ۴ لیتر بر دقیقه و دمای محیط را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با گذشت زمان عملکرد بیوراکتور برای پس‌زنی فلز سنگین Cu (II) می‌گذارد. بیشترین درصد پس‌زنی فلز سنگین Cu (II) در زمان ۴۵ دقیقه با مقدار ۷۲/۴۴٪ بدست آمد.

شکل (۷) عملکرد بیوراکتور غشایی برای پس‌زنی فلز سنگین Pb (II) موجود در پساب پتروشیمی در زمان‌های متفاوت، فشار ۸ بار، دبی ۴ لیتر بر دقیقه و دمای محیط را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با گذشت زمان عملکرد بیوراکتور غشایی برای پس‌زنی فلز سنگین Pb (II) بهتر می‌شود. بیشترین درصد پس‌زنی فلز سنگین Pb (II) در زمان ۶۰ دقیقه با مقدار ۸۹/۶۵٪ بدست آمد.

- [1] Cao, X., Ma, J., Shi, X. and Ren, Z. (2006). Effect of TiO_2 nanoparticle size on the performance of PVDF membrane. *Applied Surface Science*, 253(4), 2003-2010.
- [2] Cath, T. Y., Childress, A. E. and Elimelech, M. (2006). Forward osmosis: principles, applications, and recent developments. *Journal of membrane science*, 281(1), 70-87.
- [2] Cath, T. Y., Hancock, N. T., Lundin, C. D., Hoppe-Jones, C. and Drewes, J. E. (2010). A multi-barrier osmotic dilution process for simultaneous desalination and purification of impaired water. *Journal of Membrane Science*, 362(1), 417-426.
- [3] Celik, E., Park, H., Choi, H. and Choi, H. (2011). Carbon nanotube blended polyethersulfone membranes for fouling control in water treatment. *Water research*, 45(1), 274-282.
- [4] Crittenden JC, Rhodes TR, Hand DW, Howe KJ, Tchobanoglous G. *Water Treatment: Principles and design*. 2nd ed. John Wiley & Sons Inc; 2005.
- [5] S.S. Madaeni, E. Enayati, V. Vatanpour, Separation of nitrogen and oxygen gases by polymeric membrane embedded with magnetic nano-particle, *Polym. Adv. Technol.* 22 (2011) 2556–2563.
- [6] P. Jian, H. Yahui, W. Yang, L. Linlin, Preparation of polysulfone- Fe_3O_4 composite ultrafiltration membrane and its behavior in magnetic field, *J. Membr. Sci.* 284 (2006) 9–16.
- [7] Y. Mansourpanah, S.S. Madaeni, A. Rahimpour, M. Adeli, M.Y. Hashemi, M.R. Moradian, Fabrication new PES-based mixed matrix nanocomposite membranes using polycaprolactone modified carbon nanotubes as the additive: property changes and morphological studies, *Desalination* 277 (2011) 171–177.
- [8] S.J. Miller, W.J. Koros, D.Q. Vu, Mixed matrix membrane technology: enhancing gas separations with polymer/molecular sieve composites, in: Z.G.J.C. Ruren Xu, Y. Wenfu (Eds.) *Studies in Surface Science and Catalysis*, Elsevier, 2007, pp. 1590-1596.
- [9] Abudalo, R., Bogatsu, Y., Ryan, J., Harvey, R., Metge, D. and Elimelech, M. (2005). Effect of ferric oxyhydroxide grain coatings on the transport of bacteriophage PRD1 and *Cryptosporidium parvum* oocysts in saturated porous media. *Environmental science & technology*, 39(17), 6412-6419.