

جداسازی توده‌های میکروبی در راکتورهای زیست فیلمی بستر متحرک به وسیله‌ی صافی‌های دست ساز

الهام اشرفی*⁺، سید مهدی برقعی

تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

علی قرایی

خراسان رضوی، سرخس، پالایشگاه گاز شهید هاشمی‌نژاد، واحد HSE

چکیده: یکی از عیب‌های راکتورهای زیستی بستر متحرک، خروج توده‌های میکروبی، همراه پساب تصفیه شده‌ی خروجی از سامانه است که وجود مخزن ته نشینی بعد از راکتور را ضروری می‌کند. به طور معمول برای رفع مشکل‌های ناشی از نصب ته نشین کننده‌ها، از سامانه‌های غشایی استفاده می‌شود اما از عیب‌های عمده این سامانه‌ها، هزینه زیاد غشاهای صنعتی است. هدف از این مطالعه، نصب صافی‌های دست ساز به جای غشای صنعتی، درون راکتورهای زیستی بستر متحرک، برای جلوگیری از خروج توده‌های میکروبی و حذف مخزن ته نشینی و مقایسه آن با راکتور زیستی بستر متحرک بدون صافی است که افزون بر این که کار غشا را انجام می‌دهد، مشکل‌های ناشی از هزینه زیاد غشاهای صنعتی را نداشته و اقتصادی تر است. صافی‌ها از پارچه و الیاف ساخته شده و طی سه مرحله تکمیل تر شدند. تعداد صافی‌هایی که مورد آزمایش قرار گرفتند به ترتیب، سه، دو و یک عدد بودند و در زمان‌های ماند ۴۸، ۲۴ و ۱۸ ساعت با COD برابر با ۱۰۰۰ mg/L و ۳۰۰۰ mg/L و ۵۰۰۰ mg/L مورد آزمایش قرار گرفتند. سه صافی، غلظت جامدهای معلق در مایع خروجی را به ۱۲ mg/L رسانید که توانست جایگزین مخزن ته‌نشینی شود، دو صافی هم این غلظت را به ۳۰۰ mg/L در خروجی رسانید که می‌توانست جایگزین ته نشین کننده‌ها شود اما تک صافی، تفاوت زیادی با راکتور زیست فیلمی بستر متحرک بدون صافی نداشت و توانست جایگزین مخزن ته نشینی شود. بیشترین بازده حذف در راکتور صافی دار ۹۵٪ و در راکتور بدون صافی ۹۲٪ بوده است.

واژه‌های کلیدی: راکتور زیستی بستر متحرک، سامانه‌های غشایی، صافی دست‌ساز، جداسازی توده‌های میکروبی، مخزن ته نشینی.

KEY WORDS: Moving bed biofilm reactors, Membrane systems, Innovative filters, Biomass separation, Settling tank.

مقدمه

بر اساس تشکیل زیست فیلم بر روی آکنه^(۱) های پلاستیکی کوچک ساخته می‌شوند. MBBR در طول دهه گذشته در مقیاس‌های صنعتی

راکتورهای زیست فیلمی با بستر متحرک (KMT MBBR)^(۱) از جمله سامانه‌هایی هستند که فضای کمی را اشغال می‌نمایند و

*عهدہ دار مکاتبات

+E-mail: elham.ashrafi1985@gmail.com

(۱) Moving bed biofilm reactor

(۲) Packing

این فرایند، رسوب گیری غشا به دلیل رسوب جامدهای زیستی به صورت یک لایه کیک روی سطح غشا است که این امر باعث کاهش شار خروجی از غشا می‌شود، این رسوب گیری باعث شست و شوی مکرر غشا [۷] و یا تعویض آن شده که موجب افزایش هزینه های عملیاتی می‌شود [۸].

هدف از این پژوهش، حذف مخزن ته نشینی، با استفاده از سامانه غشایی می‌باشد، طراحی مخزن ته نشینی و نگهداری آن مشکل و پر هزینه است، در نتیجه برای کم کردن هزینه ها و مشکل‌های ناشی از مخزن‌های ته نشینی از سامانه‌های غشایی^(۶) استفاده می‌کنند، البته با این تفاوت که به جای غشاء، از صافی‌های دست‌ساز، برای کاهش هزینه های ناشی از غشا استفاده شده است.

بخش تجربی

راکتورهای زیستی

در این پژوهش از دو راکتور، به حجم مؤثر ۲۶ لیتر از جنس پلکسی گلاس، یکی به اندازه‌های $35 \times 30 \times 30$ سانتی متر مکعب و دیگری به اندازه‌های $30 \times 50 \times 20$ سانتی متر مکعب، استفاده شده است. یکی از راکتورها دارای صافی و دیگری بدون صافی و دارای ته نشین کننده‌ی استوانه‌ای از جنس پلکسی گلاس به قطر ۱۵ سانتی متر و ارتفاع ۲۱ سانتی متر بودند. برای راه اندازی سامانه، در حدود ۱۶۰ لیتر از جریان برگشتی حوض لجن فعال تصفیه خانه شهرک غرب به عنوان میکروارگانیسم‌های اولیه استفاده شد. میزان آکنه‌های مورد استفاده، ۴۰ درصد حجم مؤثر هر کدام از راکتورها بود، آکنه‌ها از نوع کلدنس از جنس پلی اتیلن با دانسیته ۰/۹۶ گرم بر سانتی متر مکعب و سطح مؤثر ۵۰۰ مترمربع بر متر مکعب بوده است ویژگی‌های آکنه‌های استفاده شده در جدول ۱ نشان داده شده است [۹]:

در شکل ۱ نمای از آکنه های استفاده شده در این پژوهش نشان داده شده است.

شکل ۲ نمودار جریانی راکتور بدون صافی را نشان می‌دهد.

ساخت صافی‌های دست ساز

سه لوله به جنس پلی اتیلن به قطر ۰/۲۵ اینچ و طول ۱۲ سانتی متر تهیه شدند و در سطح جانبی این لوله‌ها سوراخ‌هایی

و آزمایشگاهی مورد استفاده و بررسی قرار گرفته است. در پژوهشی از MBBR برای تصفیه هوازی گرمادوست پساب فرایند تهیه خمیر کاغذ استفاده شده که بازده حذف ۹۵ - ۸۵ برای COD^(۱) محلول داشته است، برای تصفیه پساب صنایع چاپ در مقیاس طرح آزمایشگاهی، ۷۵ - ۶۵ درصد COD و ۹۵ - ۸۵ درصد BOD^(۲) در زمان ماند هیدرولیکی ۵ - ۴ ساعت حذف شده است [۱، ۲]. دستیابی به بازده ۸۰ درصد در طرح‌های آزمایشگاهی برای تصفیه پساب صنایع لبنی و بازده کمتری بین ۷۰ - ۵۰ درصد برای پساب فراوری و بسته بندی گوشت گزارش شده است. برای تصفیه پساب خروجی از کشتارگاه نیز در مقیاس صنعتی بازده ۹۰ درصد و در مورد دیگر حدود ۶۰ درصد به دست آمده است [۳]. از جمله عیب‌های سامانه‌های MBBR، خروج مقدار زیادی از توده‌های میکروبی از داخل راکتور همراه با جریان پساب خروجی از آن است که وجود ته نشین کننده در خروجی از این راکتورهای زیستی را ضروری می‌کند. مشکل بعدی این است که تجهیزات ته نشین کننده، فضای زیادی را اشغال می‌کنند به همین دلیل استفاده از فرایندهای غشایی طی دهه اخیر پیشرفت زیادی داشته است چون افزون بر این که مایع خروجی از راکتورهای زیستی غشایی کیفیت خیلی بهتری نسبت به مایع خروجی از ته نشین کننده‌ها دارد، راکتورهای زیستی غشایی فضای کمتری را اشغال می‌کنند و مشکل‌های ناشی از طراحی و نگهداری ته نشین کننده‌ها را ندارند. راکتورهای غشادار، دارای برتری‌هایی نیز می‌باشند؛ از جمله: نگهداری جامدهای کل^(۳) در هر غلظتی از بیو مس (بالا رفتن میزان غلظت جامدها در داخل راکتور)، تولید لجن کمتر (مانند طولانی جامدهای داخل راکتور و افزایش زمان ماند لجن یا عمر لجن در داخل راکتور) و همچنین ایجاد جریان خروجی از راکتور با کیفیت بالاتر [۴]. میزان بالای غلظت توده های معلق داخل راکتور^(۴) می‌تواند پساب‌های قوی را نیز با موفقیت تصفیه نماید، همچنین عمر بالای لجن^(۵) به تجزیه ترکیب‌های پیچیده کمک می‌کند [۵]. کاربرد فناوری غشا برای تصفیه پساب در طول دهه اخیر به دلیل برتری‌های گفته شده گسترش یافته است [۶]، البته هزینه بالا و رسوب گیری غشاها که نیاز به تمیز کردن و حتی تعویض غشا را ضروری می‌کند در استفاده از آن‌ها محدودیت ایجاد می‌کند. محدودیت اصلی

(۱) Chemical oxygen demand

(۲) Biological oxygen demand

(۳) Total solid

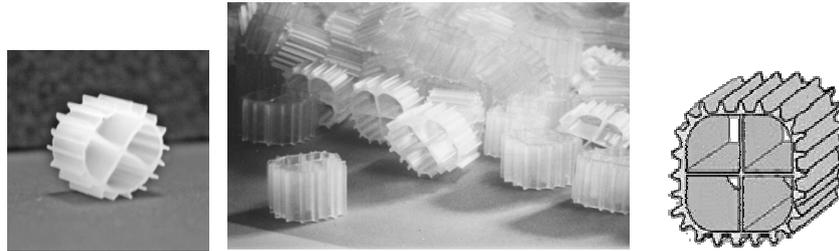
(۴) Mixed Liquor Suspended Solid (MLSS)

(۵) Solid retention time

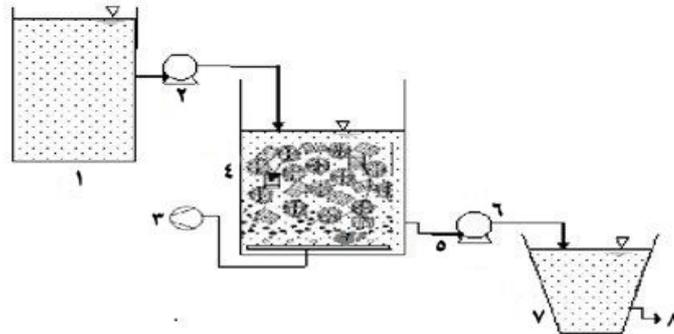
(۶) Membrane Bio Reactor (MBR)

جدول ۱- ویژگی‌های آکنه‌های به کار رفته در پژوهش.

۷۳۹	سطح ویژه کل (m^2/m^3)	۱۲۲۴	سطح کل یک آکنه ($mm^2/carrier$)
۳۰۰	سطح ویژه قابل رشد برای فیلم زیستی (m^2/m^3)	۴۹۰	سطح مؤثر یک آکنه ($mm^2/carrier$)
0.2 ± 0.05	ضخامت دیواره های داخلی (mm)	۱۰۲۴	تعداد آکنه ها در یک لیتر
0.5 ± 0.05	ضخامت دیواره های خارجی (mm)	۴۱۰	تعداد آکنه ها در یک لیتر با پرشدگی ۴۰٪
0.17 ± 0.045	متوسط وزن یک آکنه (g)	۰/۹۶	دانسیته



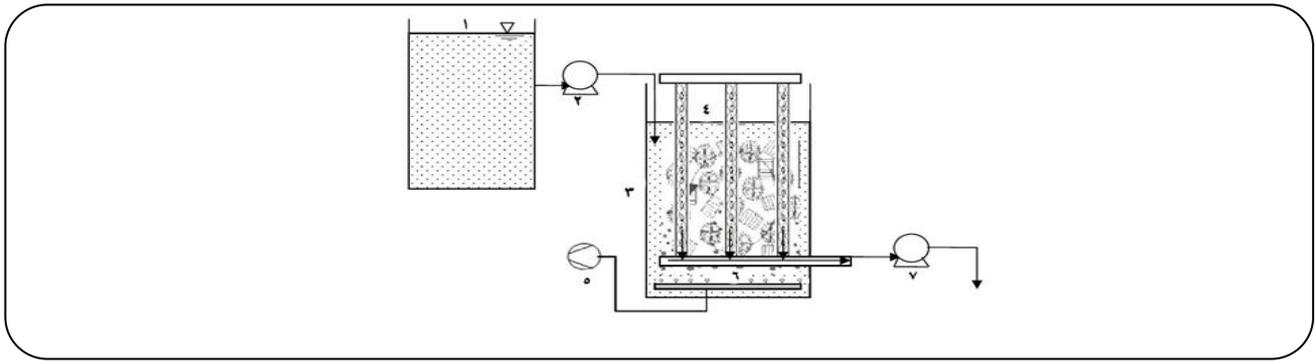
شکل ۱- نمایی از آکنه‌های استفاده شده در پژوهش.



شکل ۲- نمودار جریان سامانه MBBR معمولی. ۱- مخزن خوراک به حجم ۱۲۰ لیتر، ۲- پمپ، ۳- کمپرسور هوا، ۴- راکتور زیستی، ۵- شیر خروجی راکتور زیستی، ۶- پمپ پریستالتیک، ۷- حوض ته‌نشینی، ۸- جریان خروجی از حوض ته‌نشینی

برای تأمین هوادهی سامانه، لوله دیگری با جنس پلی اتیلن هم اندازه با لوله‌ای که به صورت افقی درون راکتور قرار گرفته انتخاب شد و روی سطح جانبی آن سوراخ‌هایی با قطر ۱/۷ میلی‌متر ایجاد شد شلنگ متصل به پمپ هوادهی درون این لوله قرار گرفت و لوله به صورت افقی به طور دقیق زیر دستگاه صافی که ساخته شده بود داخل راکتور قرار داده شد که هم هوای مورد نیاز سامانه را تأمین کند و هم با جریان هوا روی صافی‌ها، صافی‌ها را تمیز کند و گرفتگی احتمالی صافی‌ها را برطرف نماید.

به قطر ۱ میلی‌متر ایجاد شد، فاصله سوراخ‌ها از هم به تقریب در حدود ۲ میلی‌متر بوده و تعداد سوراخ‌های ایجاد شده در حدود ۴۵ عدد بود، روی سوراخ‌ها با توری پلاستیکی پوشانده شد (توری دو دور پیچیده شد) قطر سوراخ‌های توری در حدود ۰/۵ میلی‌متر بود، لوله‌ها به صورت عمودی در قسمت انتهایی به لوله دیگری به جنس پلی اتیلن با قطر ۰/۵ اینچ که به صورت افقی قرار داشت متصل شدند (اتصال طوری بود که مواد داخل این سه لوله در لوله ۰/۵ اینچی وارد شود). این دستگاه درون یکی از راکتورها قرار گرفت.



شکل ۳- شمای سامانه MBBR به همراه صافی‌ها. ۱- مخزن خوراک، ۲- پمپ ورودی، ۳- راکتور زیستی، ۴- صافی‌های دست ساز، ۵- پمپ هوا، ۶- لوله هوادهی، ۷- شیر خروجی.



شکل ۴- الف) نمای کلی راکتور زیستی و صافی‌های داخل آن، ب) نمای کلی راکتور زیستی MBBR معمولی.

و حجم مخزن مربوطه محاسبه می‌شود. به طور معمول برای رشد بهتر میکروارگانیسم‌ها، برخی از نمک‌ها نیز به خوراک اضافه می‌شود. اجزای خوراک سنتزی به کار رفته در این پژوهش در جدول ۲ آمده است.

یک عدد شیر نیز در قسمت پایین راکتور زیستی به منظور تخلیه مخزن تعبیه شد که متصل به لوله افقی داخل راکتور بود. شکل ۳ شمای سامانه را نشان می‌دهد. شکل ۴ راکتور صافی دار و راکتور MBBR معمولی را نشان می‌دهد.

انواع آزمایش‌های انجام شده

در این پژوهش از آزمایش COD (به روش تیتروسی)، آزمایش SS^(۱) (میزان غلظت جامدهای معلق موجود در مایع داخل راکتور)، آزمایش TSS^(۲) (میزان کل جامدهای معلق موجود در جریان خروجی از راکتور)، آزمایش VSS^(۳) (درصد میزان مواد آلی و معدنی لجن)، آزمایش SVI^(۴) که کیفیت لجن موجود در راکتور و همچنین در خروجی را مشخص می‌کند، استفاده شد. اندازه‌گیری دما و pH و DO^(۵) هم در فاصله‌های منظم انجام می‌شدند.

مواد مورد استفاده و روش تهیه پساب ورودی

به منظور تأمین و تهیه پسابی مصنوعی و یکنواخت، از ملاس چغندر قند به عنوان منبع کربن استفاده شد. از اوره به عنوان منبع نیترژن و از دی‌پتاسیم هیدروژن فسفات (K_2HPO_4) به عنوان منبع فسفر استفاده شده است. نکته چشمگیر در تهیه خوراک، دستیابی به نسبت بهینه COD/N/P برابر ۱۰۰/۵/۱ است. میزان COD و این نسبت با توجه به دانستن COD هر گرم ملاس و درصد ازت و فسفر در اوره و دی‌پتاسیم فسفات هیدروژن

(۱) Suspended solid

(۲) Total suspended solid

(۳) Volatile suspended solid

(۴) Sludge volume index

(۵) Dissolved oxygen

جدول ۲- اجزای خوراک تهیه شده به کار رفته در پژوهش [۱۰].

نام ماده شیمیایی	فرمول شیمیایی
ملاس	-
اوره	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$
دی پتاسیم فسفات هیدروژن	K_2HPO_4
منیزیم سولفات	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
آهن سولفات	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
مس سولفات	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
منگنز سولفات	$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
سدیم کلرید	NaCl
روی کلرید	ZnCl_2
کلسیم کلرید	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
منگنز کلرید	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

در بار آلی $1 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ (زمان ماند ۲۴ ساعت، $\text{COD}=100 \text{ mg/L}$ ، شار خروجی از صافی‌ها برابر با $1857 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$) میزان غلظت جامدهای خروجی در راکتور صافی‌دار با این که نسبت به راکتور بدون صافی کمتر بود ولی به نسبت مقدار بالایی داشت، به همین دلیل صافی‌های ساخته شده مورد بررسی قرار گرفتند.

ارتقای ساختمان صافی‌های دست ساز

با توجه به این که صافی‌ها دست ساز بوده، استفاده از هر گونه مواد موجود برای بهبود کیفیت صافی‌ها مجاز بود بنابراین از روی توری، ابتدا الیاف نخی دور لوله‌ها پیچیده شد چنان که کل سطح لوله‌ها را پوشاند. صافی‌های جدید دوباره در بار آلی $1 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ امتحان شدند، نتیجه‌ها نشان دادند که میزان غلظت جامدهای معلق در خروجی نسبت به حالت قبل کمتر شد ولی هنوز مقدار قابل قبولی نداشت که بتواند جایگزین مخزن ته‌نشینی شود، به همین دلیل از روی الیاف پیچیده شده، پارچه نخی دو دور پیچانده شد و صافی‌ها در بار آلی $1 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ دوباره مورد آزمایش قرار گرفتند. مقایسه میزان غلظت جامدهای معلق در سه حالت صافی‌ها در نمودار شکل ۶ آورده شده است.

عملکرد صافی‌ها طبق منحنی شکل ۶ بهبود یافت، برای بررسی اثر تغییر بارهای آلی و هیدرولیکی گوناگون، صافی‌های تکمیل شده در بارهای آلی $1/3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ (زمان ماند ۲۴ ساعت، $\text{COD}=1000 \text{ mg/L}$ ، شار خروجی از صافی‌ها برابر با $2471 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$ و $3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ (زمان ماند ۲۴ ساعت،

شایان گفتن است که کلیه آزمایش‌های انجام شده بر اساس کتاب "استاندارد متد آزمایش‌های آب و پساب" بوده است [۱۱].

کارکرد راکتورهای زیستی به صورت ناپیوسته^(۱)

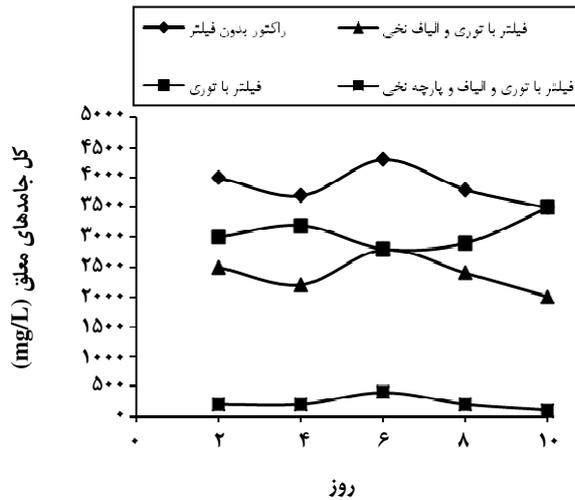
برای سازگاری میکرو ارگانیسم‌ها با شرایط جدید و افزایش میزان SS (برای راکتور با فیلتر یا غشا میزان SS بالاتری نسبت به فرایند لجن فعال مورد نیاز است برای همین میزان SS افزایش داده شد)، به مدت دو ماه راکتورها به صورت ناپیوسته عمل کردند و در طول این مدت مواد مغذی (ترکیب ملاس و اوره و فسفات پتاسیم با نسبت $100/5/1$) طوری که میزان COD خوراک ورودی 1000 mg/L باشد وارد راکتورها می‌شد همچنین سامانه هوادهی می‌شد تا میکرو ارگانیسم‌ها بتوانند با شرایط سازگار شده و رشد نمایند.

نتیجه‌ها و بحث

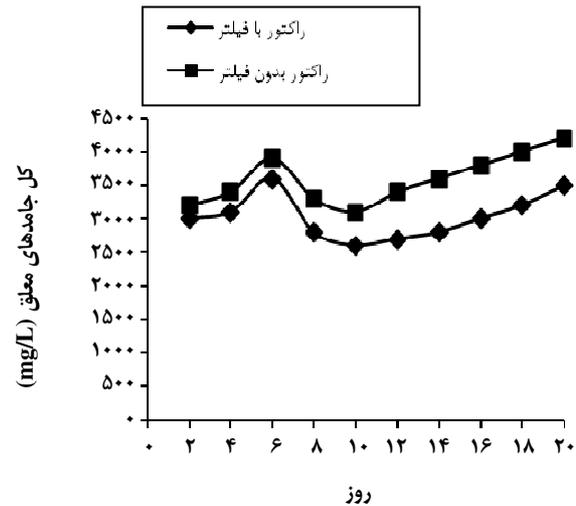
آزمایش‌ها روی سه صافی

سه صافی ساخته شده ابتدا با در بار آلی $0.5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ (زمان ماند ۴۸ ساعت، $\text{COD}=1000 \text{ mg/L}$ ، شار خروجی از صافی‌ها برابر با $929 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$) مورد بهره برداری قرار گرفتند که به دلیل زمان ماند بالا و شدت جریان کم، تفاوت زیادی بین درصد حذف COD و میزان غلظت توده‌های میکروبی معلق در خروجی بین راکتور صافی‌دار و بدون صافی وجود نداشت. شکل ۵ منحنی TSS دو راکتور را در این مرحله نشان می‌دهد.

(۱) Batch



شکل ۶- منحنی مقایسه عملکرد سه نوع فیلتر در جداسازی کل جامدهای معلق (TSS) و ایجاد مایع خروجی شفاف در بار آلی $1 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$.



شکل ۵- نمودار میزان کل جامدهای معلق (TSS) در دو راکتور در بار آلی $0.5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$.

طبق آزمایش‌های COD انجام شده، مشخص شد که بازده حذف در راکتور فیلتردار بالاتر بوده که دلیل آن زیاد بودن میزان جامدهای معلق در داخل راکتور صافی‌دار می‌باشد (صافی‌ها توده‌های میکروبی معلق را گرفته و اجازه خروج آن‌ها را نمی‌دهند به همین دلیل میزان SS داخل راکتور افزایش یافته که همین عامل باعث افزایش بازده حذف COD شده است). شکل‌های ۱۰ و ۱۱ منحنی SS و COD را نشان می‌دهند.

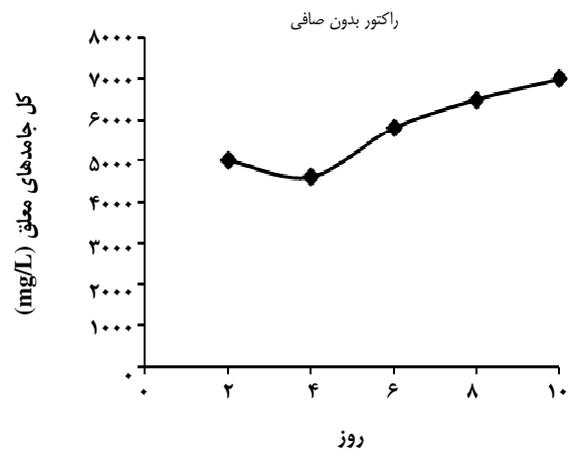
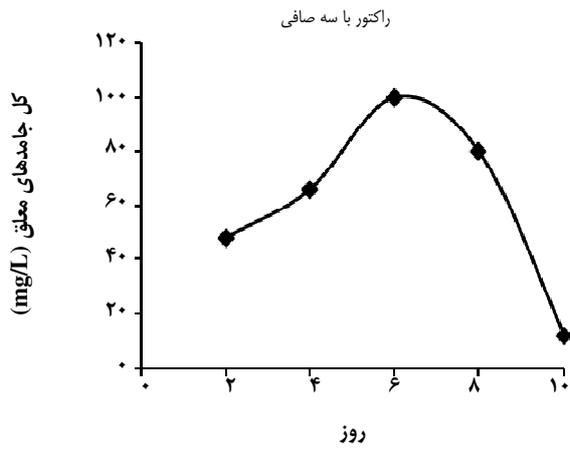
بازده حذف برای راکتور صافی‌دار برابر با ۹۵٪ و برای راکتور بدون صافی ۹۲٪ به دست آمد که در راکتور صافی‌دار به دلیل زیاد بودن غلظت جامدهای معلق داخل راکتور، بالاتر از راکتور بدون صافی است. بار آلی $5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ نیز بررسی و دیده شد صافی‌ها در این بار آلی دچار گرفتگی و انسداد شدند که برای رفع گرفتگی صافی‌ها، از آب برای عمل شست و شوی معکوس^(۱) استفاده شد. سه صافی میزان TSS مایع خروجی را تا حد قابل قبول (12 mg/L) رساند و توانست جایگزین ته نشین کننده شود. آزمایش‌های انجام شده نشان داد لجن داخل ته نشین کننده، ته نشینی ضعیفی داشت و کیفیت مایع خروجی از راکتور صافی‌دار خیلی بهتر از مایع خروجی از ته نشین کننده بود (تست VSS و SVI برای نمونه داخل راکتور انجام شد میزان SVI برابر با ۱۲۰ شد یعنی لجن داخل راکتور قابلیت ته نشینی خوبی داشت و در تست VSS نیز مشخص شد که لجن داخل راکتور دارای ۹۰٪ مواد آلی و ۱۰٪ مواد معدنی می‌باشد). با افزایش بار آلی، میزان مواد جامد معلق داخل راکتور صافی‌دار

و $\text{COD} = 3000 \text{ mg/L}$ ، شار خروجی از صافی‌ها برابر با $1857 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$ و $4 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ (زمان ماند ۱۸ ساعت، $\text{COD} = 3000 \text{ mg/L}$ ، شار خروجی از صافی‌ها برابر با $2471 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$) بررسی شدند و نتیجه‌های به دست آمده از بررسی راکتور صافی‌دار و بدون صافی در شکل ۷ و ۸ و ۹ آمده است. میزان pH در حدود $6.8 - 7.5$ و دما در حدود $28 - 35$ درجه سلسیوس بوده است، همچنین میزان DO نیز در حدود $4.8 - 7 \text{ mg/L}$ بوده است.

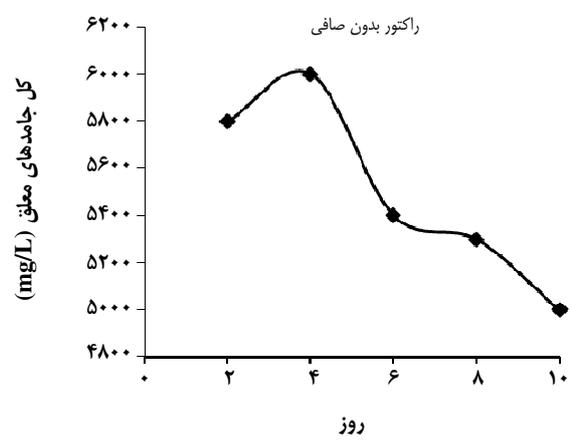
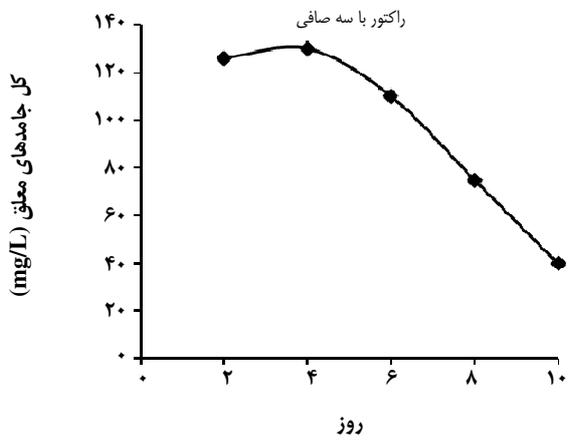
از آن جایی که صافی‌ها دست ساز بودند و از مواد طبیعی برای ساخت آنها استفاده شده بود، میزان ریزی سوراخ‌ها و قطر منافذ مشخص نبود برای این که بتوان تخمینی از اندازه ذره‌های موجود در راکتور و کارکرد صافی‌ها داشت از غربال‌های مش ۶۰ و ۱۰۰ و ۲۰۰ استفاده شد و مقداری از محتویات راکتور از این سه غربال عبور داده شد روی هر سه غربال، ذره‌هایی باقی ماند که می‌توان گفت از هر سه اندازه، ذره‌هایی داخل راکتور حضور داشتند، همین کار برای خروجی از صافی‌ها هم انجام داده شد ولی روی هیچ یک از غربال‌ها ذره‌هایی باقی نماند و نتیجه گرفته شد که صافی‌ها ذره‌ها با اندازه مش ۲۰۰ را هم جدا می‌کنند.

با توجه به نمودارها به طور کامل مشخص است که میزان غلظت توده‌های میکروبی معلق خروجی در راکتور صافی‌دار خیلی کمتر از راکتور بدون صافی می‌باشد می‌توان نتیجه گرفت وقتی از سه المان صافی استفاده می‌شود، این سه المان می‌توانند غلظت جامدهای معلق خروجی را کم کرده و جایگزین ته نشین کننده شوند.

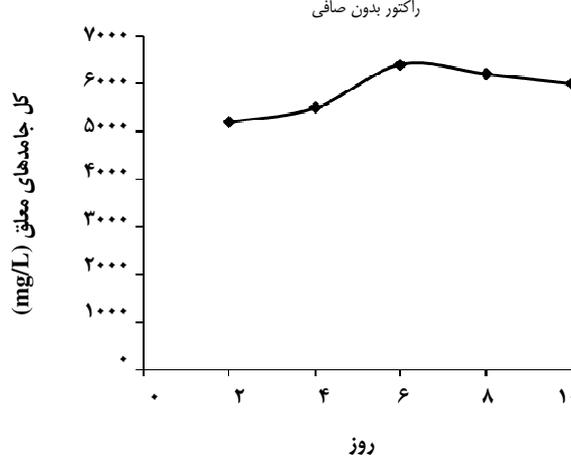
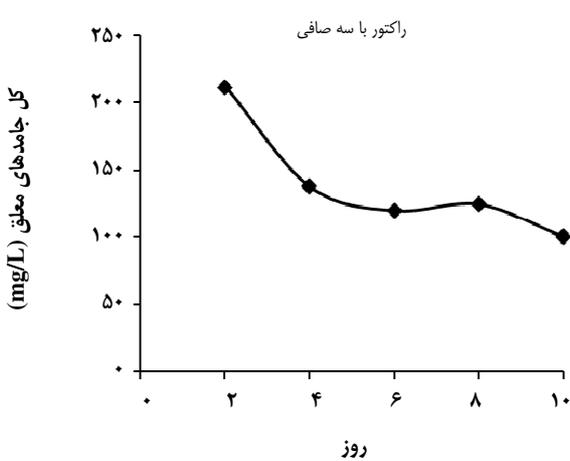
(۱) Backwash



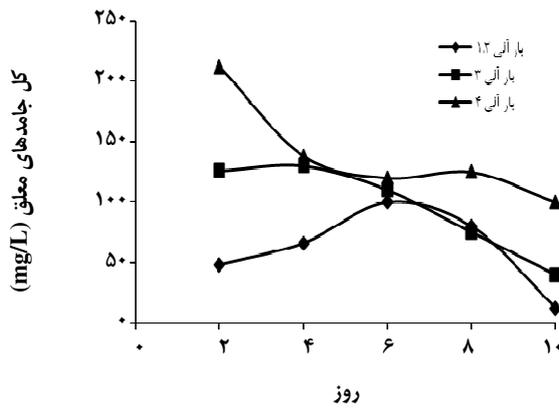
شکل ۷- منحنی کل جامدهای معلق (TSS) در بار آلی $۱.۳ \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$.



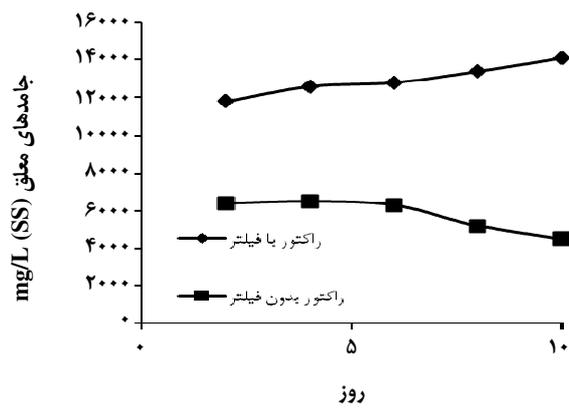
شکل ۸- منحنی کل جامدهای معلق (TSS) در بار آلی $۳ \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$.



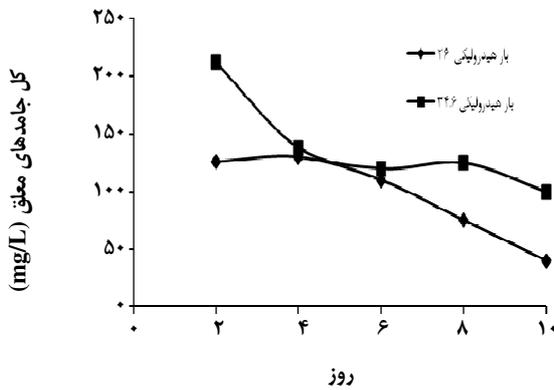
شکل ۹- منحنی کل جامدهای معلق (TSS) در بار آلی $۴ \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$.



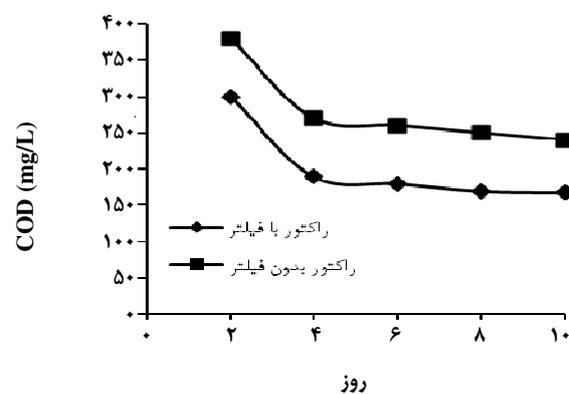
شکل ۱۲- منحنی کل جامدهای معلق (TSS) راکتور با سه صافی در بارهای آلی گوناگون.



شکل ۱۰- نمودار مربوط به مقادیر MLSS در دو راکتور در بار آلی $۴ \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$.



شکل ۱۳- منحنی کل جامدهای معلق (TSS) راکتور با سه صافی در بارهای هیدرولیکی گوناگون.



شکل ۱۱- نمودار مربوط به میزان COD در دو راکتور در بار آلی $۴ \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$.

با افزایش بار آلی، غلظت توده‌های میکروبی (هم معلق و هم زیست فیلم) در داخل راکتور افزایش می‌یابد با افزایش توده‌های میکروبی، میزان توده‌های میکروبی همراه مایع خروجی از راکتور بیشتر می‌شود. در راکتور صافی‌دار هم با افزایش میزان بار آلی، TSS خروجی از راکتور افزایش می‌یابد. (با افزایش میزان بار آلی، غلظت توده‌های میکروبی معلق و زیست فیلم در داخل راکتور زیاد شده و میزان TSS خروجی از صافی‌ها هم افزایش می‌یابد.) در عملکرد صافی‌ها، بار هیدرولیکی مهم است. آزمایش‌ها در دو بار هیدرولیکی ۲۶ L/day و ۳۴۶ L/day و در دو شار $۱۸۵۷ \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$ و $۲۴۷۱ \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$ انجام گرفت.

با توجه به نمودار ۱۳، می‌توان گفت که با افزایش بار هیدرولیکی میزان TSS در راکتور صافی‌دار افزایش می‌یابد،

خیلی بالاتر رفته (به ۱۷۳۰۰ mg/L رسیده است) و این به دلیل ورود خوراک با بار آلی بالا بوده است که همین بالا رفتن غلظت مواد جامد در داخل راکتور باعث گرفتگی صافی‌ها شد که صافی‌ها با آب تمیز شست و شوی معکوس شدند. بیشترین بار آلی که می‌توانست وارد سامانه شود تا با گرفتگی صافی‌ها مواجه نشد کمتر از $۵ \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ بوده است. چون غلظت مواد جامد در داخل راکتور بسیار زیاد شده بود و هوادهی برای سامانه کافی نبود و مقداری از لجن‌ها در ته ظرف بی‌هوای شده بودند افزون بر شست و شوی وارون، مقداری از لجن‌های داخل راکتور نیز خارج شد.

طبق شکل ۱۲ و ۱۳ می‌توان گفت با افزایش بار آلی و بار هیدرولیکی، میزان TSS خروجی نیز افزایش می‌یابد.

کمتر بوده است. اما مقدار قابل قبول برای این که بتواند جایگزین ته نشین شونده شود نداشت. یک صافی نتوانست میزان TSS خروجی را تا حد قابل قبولی کاهش دهد.

با توجه به شکل ۱۹ می‌توان گفت بازده راکتور با یک صافی تفاوت زیادی با راکتور بدون صافی ندارد سامانه‌ها بعد از ۲ روز به پایداری رسیدند و در این مدت، بازده حذف برای راکتور بدون صافی ۹۱.۳٪ و برای راکتور تک صافی ۹۱.۵٪ به دست آمد. بار آلی $3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ بر سامانه‌ها اعمال شد اما راکتور تک صافی تحمل این بار آلی را نداشت و صافی گرفته شد و نتیجه‌های به دست آمده از اعمال این بار آلی روی سامانه بررسی نشد. راکتور MBBR با یک صافی، تفاوت زیادی با راکتور MBBR معمولی نداشت میزان SS در هر دو به هم نزدیک بوده است و بازده حذف COD هم در هر دو به هم نزدیک بوده است. فقط میزان TSS در راکتور تک صافی کمتر از راکتور بدون صافی بوده است. راکتور با یک صافی نتوانست مقدار TSS را تا حد قابل قبول کاهش دهد و نمی‌تواند جایگزین ته نشین کننده شود. مایع خروجی از راکتور تک صافی از نظر شفافیت مانند مایع خروجی از ته نشین کننده بود. میزان ته نشینی لجن موجود در مایع خروجی از راکتور تک صافی مانند ته نشینی لجن موجود در ته نشین کننده بود هر دو لجن ته نشینی بسیار بدی داشتند و دیر ته نشین می‌شدند.

نتیجه‌گیری

نتیجه‌گیری کلی که از عملکرد راکتور MBBR با صافی‌ها می‌توان داشت عبارت است از:

- می‌توان با صافی‌های دست ساز و پارچه ای، از خروج مواد جامد داخل راکتور بستر متحرک جلوگیری به عمل آورد و به این ترتیب، به مایع زلال و شفاف در خروجی دست یافت که در مقایسه با غشا هزینه ی کمتری دارد و هم این که نیاز به وجود مخزن ته نشینی در خروجی راکتور از بین می‌رود و مواد جامد، داخل راکتور مانده و خارج نمی‌شوند.

این صافی‌های دست‌ساز، بعد از سه مرحله تکامل نتیجه دلخواه را به دست آوردند، در این حالت غلظت مواد جامد در خروجی به صورت چشمگیری کاهش یافت و نتیجه‌های دلخواه به دست آمد، به طوری که بالاترین مقدار غلظت مواد جامد معلق در راکتور که با SS نشان داده می‌شود به 17300 mg/L رسید و کمترین مقدار غلظت مواد جامد معلق خروجی که با TSS نشان داده می‌شود به مقدار 12 mg/L رسید.

هرچه شدت جریان افزایش یابد میزان جامدهایی هم که همراه خود می‌آورد افزایش می‌یابد.

آزمایش‌ها روی دو صافی

مرحله بعد، بررسی عملکرد دو صافی نسبت به سه صافی بود. هدف، بررسی عامل سطح مؤثر بر کارکرد صافی‌ها است. راکتور با دو صافی در بارهای آلی $1 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ و $1/3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ و $3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ آزمایش شد و نتیجه‌های به دست آمده از مقایسه عملکرد آن با زمانی که سه صافی در سامانه وجود داشت در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ آمده است.

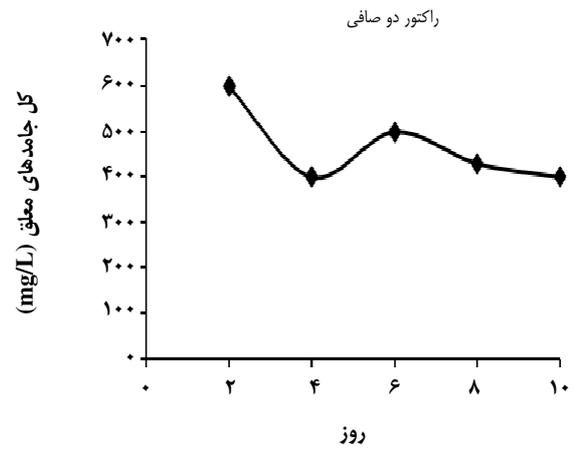
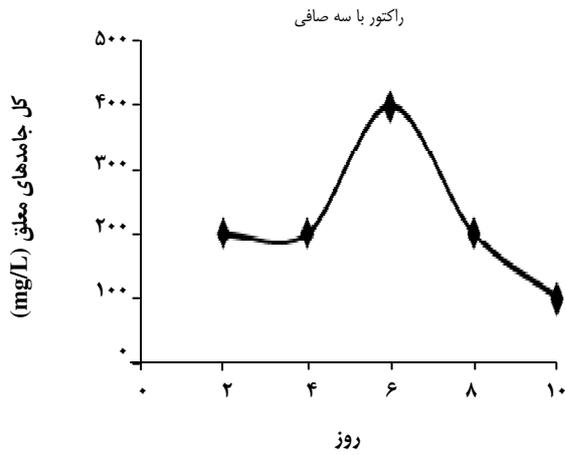
با توجه به نمودارها می‌توان دریافت که میزان غلظت مواد جامد معلق در خروجی از دو صافی، بیش تر از میزان آن در سه صافی است که علت این امر کاهش سطح مؤثر صافی‌ها به دلیل کاهش تعدادشان می‌باشد که باعث ضعیف تر شدن عملکرد صافی‌ها می‌شود (صافی‌های پارچه‌ای از نوع صافی‌های سطحی می‌باشند که توده‌های میکروبی را در سطح جدا می‌کنند که با کاهش سطح، بازده جداسازی کاهش می‌یابد).

دو صافی در بار آلی $4 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ دچار گرفتگی شدند و شست و شوی معکوس انجام شد. در این مدت دما بین $25 - 30$ درجه سلسیوس و pH بین $7/1 - 8/3$ متغیر بودند. آزمون SVI برای نمونه درون راکتور صافی‌دار انجام شد و میزان آن برابر با ۱۱۴ به دست آمد که نشان می‌دهد لجن قابلیت ته نشینی بالایی دارد و همچنین تست VSS نیز نشان داد که لجن داخل راکتور دارای ۹۲٪ مواد آلی و ۸٪ مواد معدنی می‌باشد. دو صافی تا حدی می‌تواند جایگزین مخزن ته نشینی شود چون غلظت جامدهای معلق درون راکتور تا حدی کم می‌باشد.

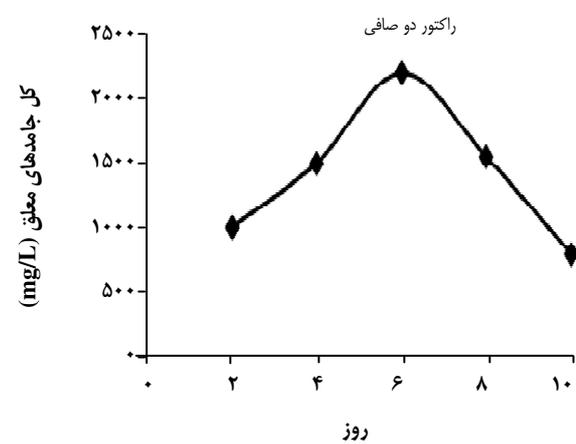
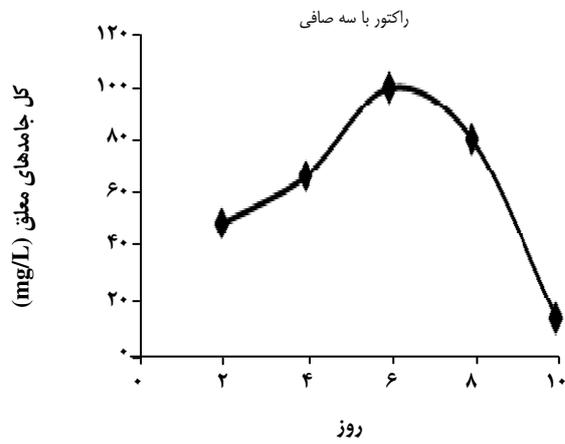
آزمایش‌ها روی یک صافی

در مرحله بعد فقط یک صافی مورد آزمایش قرار گرفت تا عملکرد یک صافی مشخص و با راکتور بدون صافی مقایسه شده و این موضوع که آیا یک صافی می‌تواند جایگزین مخزن ته نشین شونده شود یا خیر بررسی شود. راکتور تک صافی در بارهای آلی $1 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ و $1/3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ آزمایش شد و نتیجه‌ها در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ آمده است.

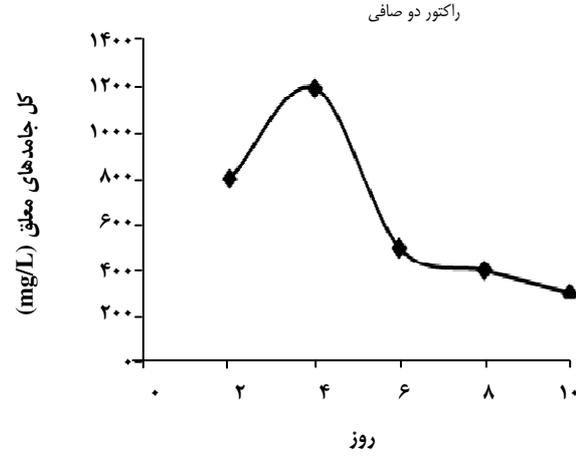
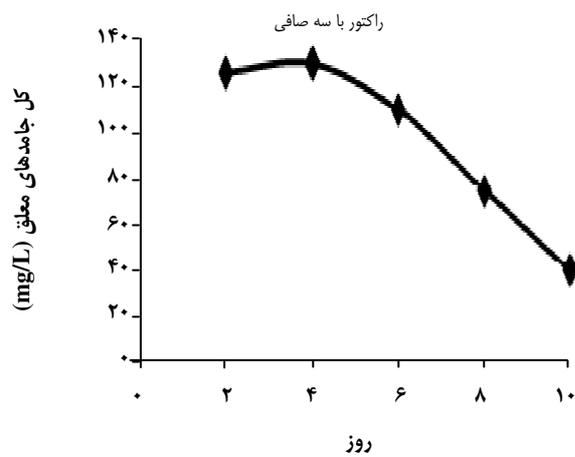
با این که میزان TSS در راکتور تک صافی، نسبت به دو صافی و سه صافی خیلی بالاتر بود (به دلیل نداشتن توانایی گرفتن همه ذره‌ها) اما نسبت به راکتور بدون صافی مقدارش



شکل ۱۴- منحنی کل جامدهای معلق (TSS) در بارآلی $۰.۱ \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$.



شکل ۱۵ - منحنی کل جامدهای معلق (TSS) در بارآلی $۰.۳ \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$.



شکل ۱۶- منحنی کل جامدهای معلق (TSS) در بارآلی $۰.۳ \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$.

غلظت TSS در مایع خروجی از راکتورها مشخص می‌سازد که راکتور با صافی نیازی به ته نشینی ندارد ولی خروجی از راکتور بدون صافی نیاز به ته نشینی دارد. سه صافی به راحتی می‌تواند جایگزین ته نشین شونده شود.

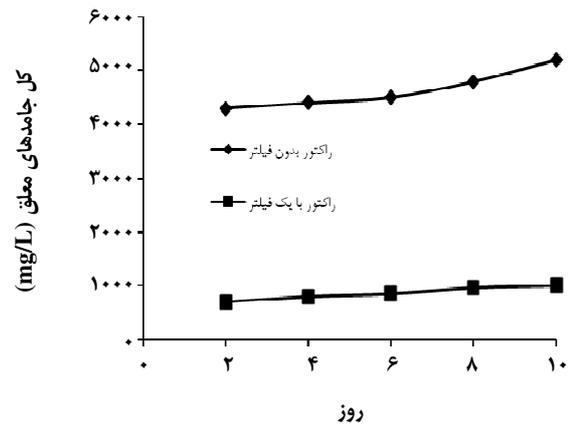
● راکتور MBBR با سه صافی، در هر بار آلی، بازده حذف بالاتری نسبت به راکتور MBBR معمولی داشت. این مطلب را می‌توان این گونه توجیه نمود: به دلیل این که صافی‌ها از خروج بیومس از راکتور جلوگیری می‌کردند و میزان SS در درون راکتور افزایش می‌یافت و این باعث می‌شد حذف بهتر صورت بگیرد و بازده حذف بالاتر رود و میزان COD خروجی کاهش یابد. آزمایش‌هایی که روی صافی‌ها به تنهایی صورت گرفت نشان داد که این صافی‌ها هیچ گونه حذفی انجام نمی‌دهند و بالاتر بودن بازده حذف نسبت به راکتور MBBR بدون صافی تنها به دلیل بالاتر بودن میزان SS (غلظت توده‌های میکروبی معلق در زیست فیلم) درون راکتور بوده است. بالاترین بازده در بار آلی $3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ به دست آمد.

● گرفتگی صافی‌ها در بار آلی $5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ به وجود آمد و همچنین غلظت مواد جامد درون راکتور بسیار بالا رفت که برای باز شدن صافی‌ها شست و شوی وارون با آب تمیز انجام شد همچنین افزون بر شست و شوی معکوس مقداری از لجن درون راکتور تخلیه گشت چون تجمع بیومس داخل راکتور به حدی زیاد بود که هوادهی کافی نبود و قسمت‌هایی از راکتور بی هوایی شده بود. پس بهتر است برای جلوگیری از مواجه شدن با پدیده گرفتگی فیلترها، سامانه در بارهای آلی کمتر از $5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ کار کند.

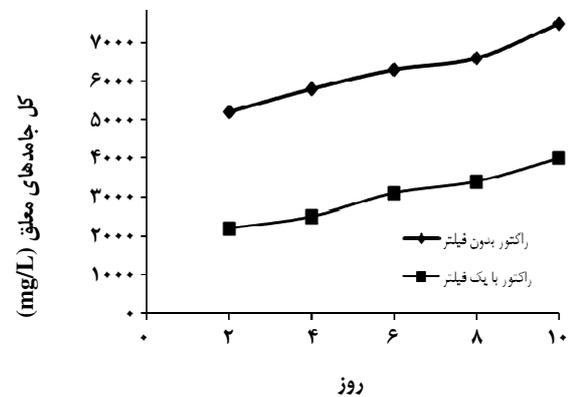
● این سه صافی، ذره‌های هم اندازه با غربال مش ۲۰۰ را جدا می‌کردند.

● مشکلی که این صافی‌ها داشتند، این بود که به دلیل دست‌ساز بودنشان، اندازه حفره‌ها و اندازه سوراخ‌های پارچه استفاده شده مشخص نبود و نمی‌شد دقیق گفت چه اندازه‌ای از ذره‌ها را جدا می‌کنند.

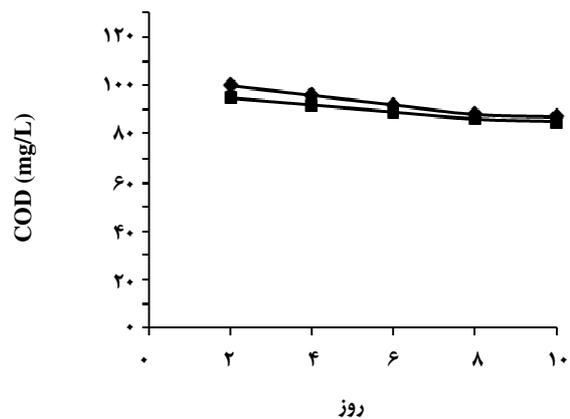
● مشکل دیگر این صافی‌های دست‌ساز، این بود که به دلیل استفاده از الیاف نخی در ساختمان آنها، بعد از گذشت مدت زمانی پوسیده شده و کارایی خود را از دست می‌دادند در نتیجه باید تعویض می‌شدند. پس باید مدام به وضعیت صافی‌ها رسیدگی شود تا به موقع تعویض صورت گیرد. و در هر بار بازدید از صافی‌ها راکتور کلاً تخلیه می‌شد و این خود یکی دیگر از مشکل‌ها بوده است.



شکل ۱۷- منحنی کل جامدهای معلق (TSS) در بار آلی $1 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$.



شکل ۱۸- منحنی کل جامدهای معلق (TSS) در بار آلی $1.3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$.



شکل ۱۹- نمودار مربوط به میزان اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) در راکتور بدون فیلتر و راکتور تک فیلتره در بار آلی $1.3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$.

بالاتری داشتند و نتیجه‌های بهتری به دست آمد. در واقع می‌توان گفت دو صافی هم می‌تواند تا حدی جانشین مخزن ته نشینی شود و توده‌های میکروبی را داخل راکتور حفظ نماید.

- بیشترین مقدار SS در راکتور با یک صافی برابر با 9640 mg/L و کمترین مقدار TSS آن برابر با 700 mg/L بوده است.
- مایع خروجی از راکتور تک صافی از نظر شفافیت مانند مایع خروجی از ته نشین کننده بود.

- میزان ته نشینی لجن موجود در مایع خروجی از راکتور تک صافی مانند ته نشینی لجن موجود در ته نشین کننده بود. هر دو لجن ته نشینی بسیار بدی داشتند و دیر ته نشین می شدند.
- به منظور جداسازی توده‌های میکروبی از جریان خروجی راکتور MBBR و حذف مخزن ته نشینی ثانویه، بهتر است از یک صافی استفاده نشود چون یک صافی عملکرد ضعیفی داشته و نمی‌توان برای حذف مخزن ته نشینی از آن استفاده کرد.

- به دلیل کاهش تعداد صافی‌ها، توانایی صافی در جدا کردن توده‌های میکروبی از جریان خروجی از راکتور کاهش یافت و میزان SS داخل راکتور کمتر افزایش می‌یافت. بیشترین میزان SS برابر با 1000 mg/L بوده است.

- دو صافی در مقایسه با سه صافی، ذره‌های ریزتر را نمی‌توانستند جدا کنند و ذره‌های ریز تر از غربال با مش ۱۰۰ را از خود عبور می‌دادند.

- به دلیل عدم توانایی در گرفتن ذره‌های ریزتر، میزان غلظت توده‌های میکروبی در خروجی از راکتور افزایش یافت. کمترین مقدار غلظت توده‌های میکروبی (TSS) در خروجی از راکتور برابر با 300 mg/L بوده است.

- با این که کیفیت خروجی از نظر شفافیت و زلال بودن با کاهش تعداد صافی‌ها کاهش یافت اما همچنان دو صافی نسبت به زمانی که راکتور MBBR بدون صافی استفاده می‌شد بازده

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۹

مراجع

- [1] Metcalf, Eddy, Inc., "Wastewater Engineering Treatment, Disposal, Reuse", 3rd ed, McGraw-Hill (1991).
- [2] Bernard J. Dutka., "Membrane Filtration, Applications, Techniques, and Problems", ISBN: 0-8247-1164-5, (1981).
- [۳] آیتی، ب، دلنواز، م، گنجی دوست، ح،، سینتیک واکنش تصفیه فاضلاب حاوی آنیلین در راکتور بیو فیلمی با بستر متحرک "مجله سلامت و محیط، فصلنامه علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایران، (۱) ۲، ص. ۷۶ (۱۳۸۸).
- [4] Satywali Y., Balakrishnan M., Treatment of Distillery Effluent in a Membrane Bioreactor (MBR) Equipped with Mesh Filter, *Separation and purification Technology*, **63**, p. 278 (2008).
- [5] Chang I.S., Lee C.H., Membrane Filtration Characteristics in Membrane Coupled Activated Sludge System - The Effects of Physiological States of Activated Sludge on Membrane Fouling, *Desalination*, **120**, p. 221 (1998).
- [6] In - Soung Chang., Su - Na Kim., Wastewater Treatment Using Membrane Filtration - Effect of Bio solids Concentration on Cake Resistance, *Process Biochemistry*, **40**, p. 1307 (2005).
- [7] Kuo-Jen Hwang., Chih-Sheng Chan., Kuo-Lun Tung., Effect of Backwash on the Performance of Submerged Membrane Filtration, *Journal of Membrane Science*, **330**, p. 349 (2009).
- [8] Le-Clech P., Chen V., Tnony A.G.Fane., Fouling in Membrane Bioreactors Used in Wastewater Treatment, *Journal of Membrane Science*, **284**, p. 17 (2006).

[9] Borghei, S.M., Hosseini, S.H., The Treatment of Phenolic Wastewater a Moving Bed Reactor, *process Biochemistry*, **39**, p. 1171 (2004).

[۱۰] حسنیه فولادی قلعه ، بررسی کارایی بیوراکتور غشایی غوطه ور در حذف مقادیر کم ترکیبات آلوده کننده مقاوم (سموم و آفت کش) ، پایان نامه کارشناسی ارشد ، گروه محیط زیست ، دانشکده مهندسی شیمی و

نفت ، دانشگاه صنعتی شریف ، سال ۱۳۸۸

[11] APHA, AWWA and WPCF ., "Standard Method for the Examination Water and Waste water", 19th Edition, Washington, USA. (1995).