مقایسه عملکرد سامانه تلفیقی راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک مجهز به جدا کننده غشایی، با راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک معمولی (MBBR)

بهاره مشتاق*+، سید مهدی برقعی، الهام اشرفی، جلیل شادبهر
تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانکشده مهندسی شیمی و نفت، صندوق پستی ۹۴۶۵ ـ ۱۱۳۶۵

چکیده: در این پژوهش کارایی سامانه تلفیقی راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک مجهز به جدا کننده غشایی، با راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک معمولی مقایسه شد. آزمایش‌ها بر روی دو راکتور با مدیای KMT با حجم مؤثر ۳۰ لیتر، یکی با غشا و دیگری بدون غشا انجام شد. حجم مدیا ۴۰ درصد بوده و از یک غشای میکروفیلتراسیون از نوع الیاف تو خالی استفاده شد. به منظور رشد فیلم زیستی بر روی حامل ها، راکتورها به مدت دو ماه به صورت ناپیوسته مورد بهره برداری قرار گرفتند. پساب مصنوعی مورد استفاده مخلوطی از ملاس و برخی نمک ها به عنوان منبع مغذی بود که در سه مقدار COD متفاوت (۵۰۰ ، ۱۰۰۰و ۲۰۰۰ میلی گرم در لیتر) و در سه زمان ماند گوناگون (۱۰، ۱۵و ۲۰ ساعت) و در نتیجه در بار آلی ۴٫۸ - ۰٫۶ کیلوگرم بر متر مکعب در روز بر راکتورها اعمال می‌شد. بازده حذف COD برای خروجی غشا ۹۸-۹۲ درصد، برای فرایند زیستی داخل راکتور ۹۶-۸۹ درصد و برای راکتور زیستی بستر متحرک معمولی ۹۶-۸۷ درصد به دست آمد. میزان SS یا توده میکروبی معلق نیز از ۴۰۰۰ میلی گرم در لیتر به ۹۲۳۰ میلی گرم در لیتر برای راکتور دارای غشا و ۲۴۵۰ میلی گرم در لیتر برای راکتور زیستی بستر متحرک معمولی رسید.

واژه‌های کلیدی: راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک، راکتور زیستی غشایی، غشای الیاف توخالی، حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی.

KEY WORDS: *Moving bed biofilm reactor, Membrane bioreactor, Hollow fiber membrane, COD removal.*

مقدمه

فناوری راکتور زیستی غشایی[۱] که ترکیبی از فرایند زیستی به‌همراه جداسازی غشایی می‌باشد، یکی از سامانه‌های نو در تصفیه پساب‌ها است که در سال‌های اخیر استفاده از آن بسیار رواج یافته است. در این سامانه‌ها غشا[۲] جایگزین مخزن ته‌نشینی ثانویه در فرایند لجن فعال متعارف شده است. با توجه به کیفیت بسیار بالای پساب خروجی و همچنین مطرح شدن مسئله استفاده دوباره از خروجی تصفیه شده در چرخه فرایند، استفاده از این سامانه در حال افزایش است و پژوهشگران با بررسی مسایل گوناگون پیرامون آن،

*عهده دار مکاتبات
+E-mail: baharemoshtagh@gmail.com

(۱) Membrane BiorRactor (MBR)
(۲) Membrane

استفاده از این سامانه پیشرفته را توصیه می‌کنند. در نسل اول راکتورهای زیستی غشایی (دهه ۷۰ و۸۰ میلادی) از غشا در واحد دیگری بیرون از راکتور لجن فعال استفاده می‌شد. این سامانه‌ها به پمپ‌های قوی نیاز داشتند و انرژی مورد نیاز برای رساندن پساب به غشا خیلی بالا بود. درنتیجه این روش رشد زیادی در سامانه‌های تصفیه پساب نداشت. در دهه بعدی (دهه ۸۰ و۹۰ میلادی) ظهور غشاهای غوطه‌ور در سامانه‌های لجن فعال هزینه فرایندهای غشایی را کاهش داد [۱].

براساس شکل هندسی غشا، مدول[۱]های گوناگونی تهیه شده است مانند مدول‌های صفحه‌ای[۲]، مدول‌های پیچشی (حلزونی)، مدول‌های لوله‌ای[۳] و مدول‌های الیاف توخالی[۴]. با استفاده از مدول‌های غشایی برای کارهای صنعتی و نیمه صنعتی، سطح زیادی از غشا در حجم کمی قرار می‌گیرد. فضای کم اشغال شده توسط سامانه‌های غشایی یکی از برتری‌های این گونه فرایندها است [۲]. امروزه شکل‌های گوناگونی برای فرایندهای غشایی وجود دارد. استفاده از غشا در سامانه‌های لجن فعال برتری‌هایی دارد که استفاده از آنها را تجاری کرده است از جمله اشغال فضای کمتر، حذف کامل مواد جامد، کارکرد در غلظت مواد جامد زیستی معلق بالاتر و در نتیجه افزایش عمر لجن و تولید لجن بسیار کم [۳]، ولی مشکل گرفتگی[۵] آنها بازده سامانه و میزان تراوایی غشا را کاهش داده و از عمر غشا می‌کاهد. بنابراین بهبود بخشیدن به روش‌های تمیز کردن غشا و جلوگیری از گرفتگی غشا، نکته مهمی در طراحی و پیشرفت سامانه‌های غشایی است.

استفاده از راکتورهای زیست فیلمی به همراه جداسازی غشایی مواد معلق ممکن است اثر گرفتگی غشا را کاهش دهد. راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک (MBBR)[۶] گزینه‌ای مناسب می‌باشد که برتری‌های سامانه‌های زیست فیلمی را داشته و قادر به تحمل بار آلی زیادی می‌باشد.

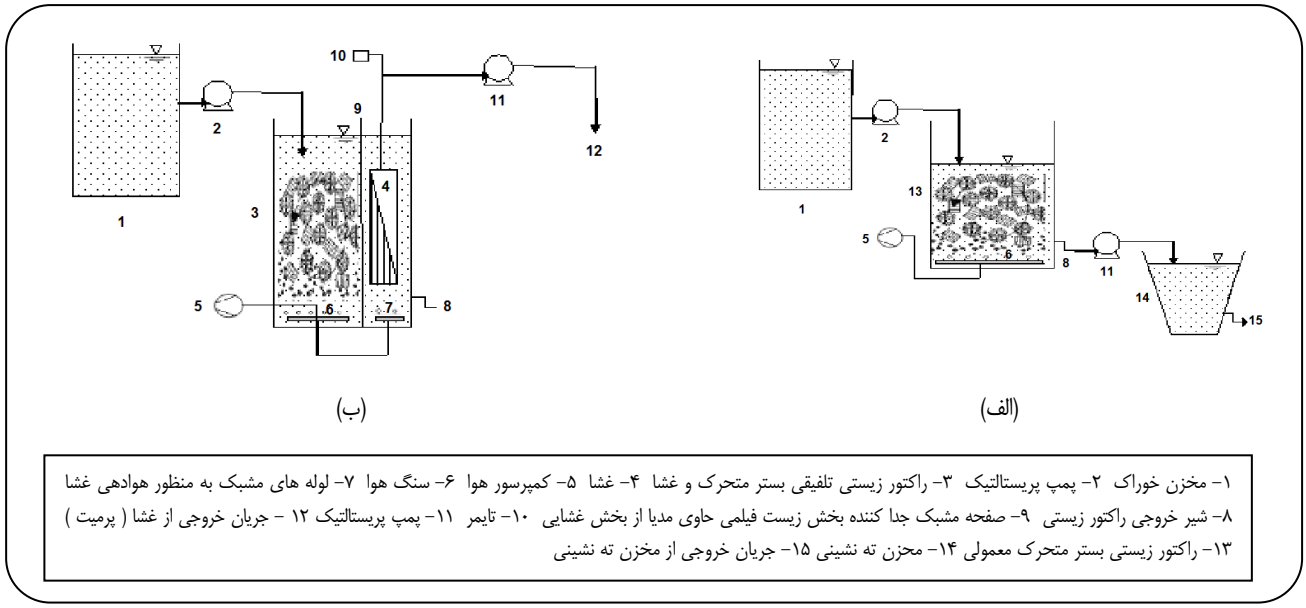
ایده اولیه این سامانه توسط شرکت کالدنس[۷] با همکاری موسسه تحقیقات سینتف[۸] نروژ در سال ۱۹۸۷ ارایه شد و تاکنون واحدهای MBBR به منظورهای گوناگونی از جمله تصفیه پساب شهری، تصفیه پساب صنایع غذایی و تصفیه پساب صنایع کاغذسازی ساخته شده است [۵ ، ۴]. این فرایند که اساس آن تشکیل زیست فیلم می‌باشد، ترکیبی از یک فرایند لجن فعال و سامانه‌های زیست فیلمی است با این تفاوت که دیگر هیچ کدام از معایب این سامانه‌ها در فرایند جدید وجود ندارد [۶]. این سامانه‌ها فضای کمی را اشغال می‌کنند و در آنها با افزودن حامل‌های[۹] پلی‌اتیلنی و یا پلی پروپیلنی استوانه‌ای شکل (با وزن مخصوص ۰/۹۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب) به مخازن هوازی یا غیرهوازی، پایه مناسبی برای رشد زیست فیلمی تأمین می‌شود. این حامل‌ها استوانه‌هایی کوچک با قطر در حدود ۱۰ میلی متر و ارتفاع ۷ میلی متر هستند و پره‌هایی در داخل و خارج آنها تعبیه شده است [۷]. برای چرخش این پرکن‌ها از هواده‌ها (در سامانه‌های هوازی) یا همزن‌ها (در سامانه‌های بی‌هوازی) استفاده می‌شود. راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک به هیچگونه گردش لجن فعال یا شستشوی دوباره نیاز ندارد و از یک ته‌نشین‌کننده پایانی برای ته‌نشینی مواد جامد جدا شده استفاده می‌شود. ویژگی‌های منحصر به فرد راکتورهای زیست فیلمی با بستر متحرک عبارتند از تحمل در برابر تغییر میزان بارگذاری، فشردگی راکتورها، انعطاف‌پذیری در طراحی فرایند، زمان ماند پایین، حساسیت کم نسبت به دماهای پایین و تحمل در برابر تغییر دما، افت هیدرولیکی کم، جمع نشدن لجن و آسانی نگهداری و رژیم هیدرولیکی به طور کامل مخلوط [۸].

بنابراین راکتورهای زیست فیلمی با بستر متحرک گزینه‌های مناسب می‌باشند ولی لجن خروجی از آنها قابلیت ته نشینی کمی دارد. بنابراین این سامانه‌ها نیاز به مخزن‌های ته نشینی پیشرفته و سطح حوض ته نشینی زیادی دارند [۹]. ترکیب این دو روش می‌تواند معایب هر کدام از آنها را جبران کند و استفاده از آنها را در صنعت افزایش دهد. ویژگی این روش نیاز نداشتن به حوض ته‌نشینی و خروجی با کیفیت بالا است. در این پژوهش کارایی سامانه تلفیقی راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک مجهز به جدا کننده غشایی با راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک معمولی مقایسه شد.

بخش تجربی

شکل ۱ نمودار جریانی سامانه را به همراه تجهیزهای مربوطه نشان می‌دهد.

(۱) Module
(۲) Plate
(۳) Tubular
(۴) Hollow fiber
(۵) Fouling
(۶) Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)
(۷) Kaldnes
(۸) Sinteff
(۹) Packing/Carrier



شکل ۱ـ (لف) نمودار جریانی سیستم تلفیقی MBBR و MBR (ب) نمودار جریانی سیستم MBBR معمولی.

در این پژوهش از دو راکتور به شکل مکعب مستطیل استفاده شد. یکی از راکتورها از جنس شیشه و به اندازه‌ی ۲۵ ×۲۵ ×۷۰ سانتی‌متر و دیگری از جنس پلکسی گلاس به اندازه‌ی ۲۰ ×۵۰ ×۴۰ سانتی‌متر بود که هر دو با حجم مؤثر ۳۰ لیتر مورد استفاده قرار گرفتند. در قسمت پایین راکتورها یک شیر به منظور نمونه‌گیری و تخلیه قرار داده شد.

به منظور تأمین هوادهی سامانه از یک کمپرسور هوا استفاده شد. در کف راکتورها از هوا پخش‌کن به منظور حرکت مداوم حامل‌ها و تأمین اکسیژن محلول استفاده شد. در زیر غشا از یک لوله پلی‌اتیلنی به قطر ۰/۲۵ اینچ که روی سطح جانبی آن سوراخ‌هایی با قطر ۲ میلی متر و به فاصله ۲ سانتی‌متر از هم ا یجاد شده بود استفاده شد تا با ایجاد تلاطم در سطح غشا از گرفتگی آن تا حد زیادی جلوگیری کند.

در این سامانه از دو عدد پمپ پریستالتیک نیز استفاده شد. یکی از پمپ‌ها به عنوان پمپ خروجی و دیگری برای انتقال خوراک به داخل راکتور زیستی مورد استفاده قرار گرفت.

مدیای شناور مورد استفاده در این پژوهش از نوع کالدنس بوده است که از شرایط مناسب‌تری نسبت به سایر مدیاها برخوردار هست. درواقع از این حامل‌ها به منظور ایجاد سطح مناسب برای رشد توده میکروبی استفاده می‌شود. این حامل‌ها به شکل استوانه‌های کوچکی از جنس پلی اتیلن با دانسیته ۰/۹۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب هستند که دو دیواره به شکل به‌علاوه (+) در داخل آن‌ها قرار دارد و دندانه‌هایی به ضخامت ۰/۲ میلی متر در دیواره‌های خارجی آنها وجود دارند.

میزان پرشدگی راکتورها ۴۰ درصد حجم مؤثرشان و سطح ویژه قابل رشد برای زیست فیلم ۷۰۰ متر مربع بر متر مکعب بود. یکی از راکتورها برای بررسی عملکرد سامانه تلفیقی MBBR و MBR به کار رفت و دیگری به منظور عملکرد سامانه MBBR بدون MBR برای مقایسه عملکرد غشا مورد استفاده قرار گرفت.

برای برخورد نکردن مدیاها با الیاف غشا و جلوگیری از پاره شدن آنها، راکتور به‌وسیله یک صفحه از جنس پلکسی گلاس که روی آن سوراخ‌هایی کوچکتر از اندازه مدیاها ایجاد شده بود به دو قسمت تقسیم شد.

غشای مورد استفاده دراین پژوهش از نوع الیاف توخالی و غوطه‌ور بوده که ساخت شرکت Zena کشور چک است. غشا از جنس پلی پروپیلن بوده و اندازه منافذ آن ۰/۱ تا ۰/۲ میکرون بود و بنابراین در محدوده میکروفیلتراسیون عمل می‌کرد. قطر داخلی الیاف برابر با ۰/۲۴ میلی متر، قطر خارجی الیاف ۰/۳۱ میلی متر، طول الیاف برابر با ۸۰ سانتی‌متر و سطح غشای به کار برده شده ۰/۸ متر مربع بود. غشای مورد استفاده به شکل U شکل در راکتور قرار گرفت. به منظور کاهش گرفتگی غشا از یک تایمر طوری استفاده شد که پمپ خروجی بعد از هر ۱۰ دقیقه، ۰/۵ دقیقه از کار بایستد.

شکل ۲ـ نمایی از راکتور و غشا.

شکل ۲ نمایی از راکتور و غشای مورد استفاده را نشان می‌دهد.

به منظور تأمین و تهیه پسابی مصنوعی و یکنواخت از ملاس چغندر قند به عنوان منبع کربن استفاده شد. از اوره به عنوان منبع نیتروژن و از فسفات دی‌پتاسیم هیدروژن(K_2HPO_4) به عنوان منبع فسفر استفاده شد. نکته چشمگیر در تهیه خوراک، دستیابی به نسبت بهینه COD/N/P برابر ۱۰۰/۵/۱ است. برای رشد بهتر میکروارگانیسم‌ها برخی از نمک‌ها نیز به خوراک افزوده می‌شد.

شایان گفتن است که کلیه آزمایش های انجام شده در این پژوهش بر اساس کتاب "استاندارد متد آزمایش های آب و پساب" بوده است [۱۰].

به منظور تأمین میکروارگانیسم‌های اولیه از لجن جریان برگشتی حوض هوادهی لجن فعال تصفیه‌خانه شهرک غرب تهران استفاده شد به طوری که نیمی از راکتورها با لجن پر شده و سپس راکتور با آب پرگشته و هوادهی آغاز شد. هوادهی به گونه‌ای تنظیم شد که مدیاها به آرامی در داخل راکتور شروع به گردش کنند. سپس خوراک به همراه مواد معدنی دیگر با COD برابر ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر به راکتور زیستی افزوده شد و عملیات ناپیوسته راکتورها آغاز شد. هدف از این دوره رشد زیست فیلم بر روی مدیا و بالا رفتن میزان مواد معلق جامد بود. در طول دوره ۲ ماهه که سامانه به صورت ناپیوسته عمل می‌کرد شرایط دما، pH و مقدار اکسیژن محلول کنترل می‌شدند تا شرایط مناسبی برای رشد میکروارگانیسم‌ها فراهم آید. دمای سامانه در بازه‌ی ۲۴-۲۶°C و pH نیز در بازه ۸-۶٫۵ قرار داشت و میزان اکسیژن محلول در بازه‌ی ۳-۲ میلی گرم بر لیتر کنترل می‌شد. pH سامانه با استفاده از pH متر Sartorius Professional Meter PP-20 اندازه‌گیری می‌شد.

محتویات داخل راکتورها از نظر میزان مواد جامد زیستی و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی اندازه‌گیری می‌شد تا درصد حذف ملاس و میزان فعالیت میکروارگانیسم‌ها و افزایش SS بررسی شود. در ابتدا میزان غلظت جامدهای معلق داخل راکتورها در حدود ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر بود. هر پنج روز یک بار تست COD و SS انجام شده و بازده حذف به‌دست می‌آمد. به منظور اندازه‌گیری COD ابتدا نمونه با دستگاه سانتریفوژ Andreas Hettich Tuttlingen Germany جداسازی و سپس با استفاده از کاغذ صافی، صاف شد و سپس از دستگاه ECO 16 Thermoreactor VEP Scientifica استفاده شد و به منظور اندازه‌گیری SS از پمپ خلأ Edwards, ES150TA و آون W .C.Heraeushanau استفاده شد.

در ابتدای کار مدیاها به مقدار زیادی به سطح می‌آمدند ولی به تدریج و با تشکیل فیلم زیستی، حالت سیال شدن در مدیاها دیده شد. پس از هشت هفته فیلم زیستی روی مدیاها قابل دیدن بود. مقدار SS به حدود ۴۰۰۰ میلی گرم بر لیتر و بازده حذف COD از ۶۵ درصد به ۹۶ درصد رسید و سپس مرحله عملیات پیوسته آغاز شد.

در طول دوره عملیات پیوسته، خوراک با CODهای گوناگون و مشخص شده در هر روز در مخزن‌های ۱۲۰ لیتری ویژه‌ای خوراک تهیه می‌شد و براساس زمان ماند با شدت جریان مشخص وارد راکتورها می‌شد و جریان پرمیت[۱] از راکتور دارای غشا و جریان خروجی از راکتور دیگر خارج می‌شدند. به منظور سازگاری میکروارگانیسم‌ها با پساب ورودی زمان نمونه‌گیری چند برابر زمان ماند هیدرولیکی در نظر گرفته شد. در طول این دوره نیز شرایط محیطی شامل دما، pH و میزان اکسیژن محلول در محدوده قابل قبول برای فعالیت‌های زیستی کنترل می‌شد.

عملیات پیوسته با سه COD گوناگون (۱۰۰۰، ۵۰۰و ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و در سه زمان ماند گوناگون (۱۵، ۱۰و ۲۰ ساعت) و بنابراین در بار آلی بین ۰٫۶ تا ۴٫۸ کیلوگرم بر متر مکعب در روز انجام شد.

شار وارد بر غشا در زمان ماند ۱۰ ساعت ۳٫۷۵ لیتر بر متر مربع در ساعت (LMH)، در زمان ماند ۱۵ ساعت ۲٫۵ لیتر بر متر مربع در ساعت و در زمان ماند ۲۰ ساعت ۱٫۸۵۷ لیتر بر متر مربع در ساعت تنظیم شد.

(۱) Permeate

با توجه به اینکه سامانه باید در شرایط پایدار عمل کند، شدت جریان ورودی و خروجی (پرمیت) چنان تنظیم می‌شد که میزان ورودی و خروجی با هم برابر بوده و تجمع در سامانه وجود نداشته باشد. سپس COD و SS جریان خروجی و درون راکتور هر روز اندازه‌گیری می‌شد و پس از رسیدن به مقدار ثابت که نشان‌دهنده‌ی پایدار شدن سامانه می‌باشد مرحله بعدی آزمایش انجام می‌گرفت.

نتیجه‌ها و بحث

ویژگی‌های تغییر SS (مواد معلق و شناور در پساب) و COD راکتورها در طول دوره راه‌اندازی به شرح نمودارهای ۳ و ۴ می‌باشد.

همان‌گونه که دیده می‌شود مقدار SS به‌حدود ۴۰۰۰ میلی گرم بر لیتر و بازده حذف COD از ۶۵ درصد به ۹۶ درصد رسیده و سپس مرحله عملیات پیوسته آغاز شده است.

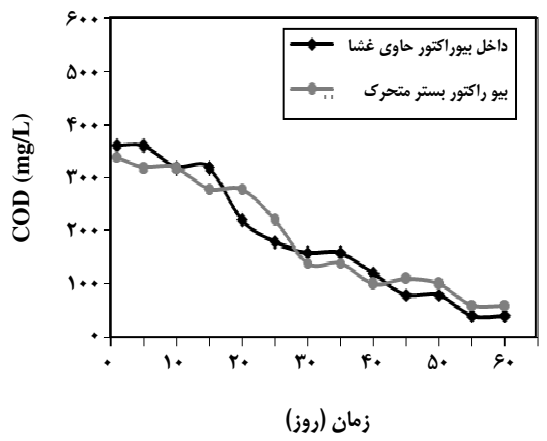
در روزهای اول شروع به کار غشا مقدار کمی توده میکروبی جامد (SS) در خروجی غشا دیده شد اما پس از چند روز میزان مواد جامد خروجی به صفر رسید که شاید علت آن پاره بودن برخی از الیاف غشا در ابتدای کار باشد که در ادامه دچار گرفتگی شدند.

بنابراین در سامانه تلفیقی با غشا، جامد معلقی خارج نمی‌شود که یکی از برتری‌های این سامانه‌هاست زیرا خروجی با کیفیت بالایی را فراهم می‌کند و این امر، شرایط استفاده دوباره از پساب را فراهم می‌کند و دیگر نیازی به استفاده از ته نشین کننده‌های پیشرفته وجود نخواهد داشت.

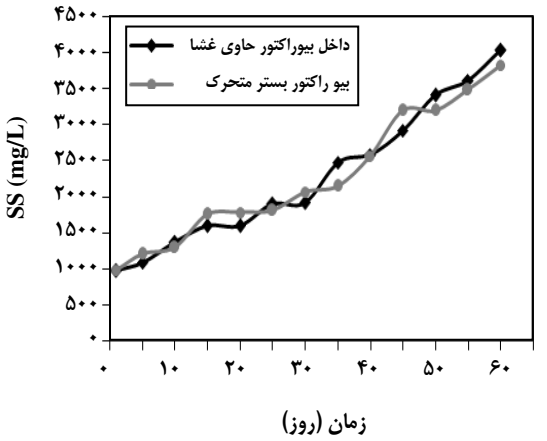
آزمایش‌ها در سه COD و زمان ماند گوناگون و بنابراین در ۹ مرحله انجام شد. نتیجه‌های این ۹ مرحله در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل تغییر COD خروجی از غشا، COD داخل راکتور زیستی دارای غشا و COD داخل راکتور زیستی بستر متحرک معمولی بر حسب زمان نشان داده شده است.

همان‌گونه که دیده می‌شود در هر زمان مانـد، COD خروجـی با گذر زمان کاهش پیدا می‌کند تا به یک حالت پایا برسـد. بـازده حذف COD برای خروجی غشا ۹۸-۹۲ درصد، برای فرایند زیستی داخـل راکتـور ۹۶-۸۹ درصـد و بـرای راکتـور زیسـت فیلمـی با بستر متحرک معمولی ۹۶-۸۷ درصد به دست آمد.

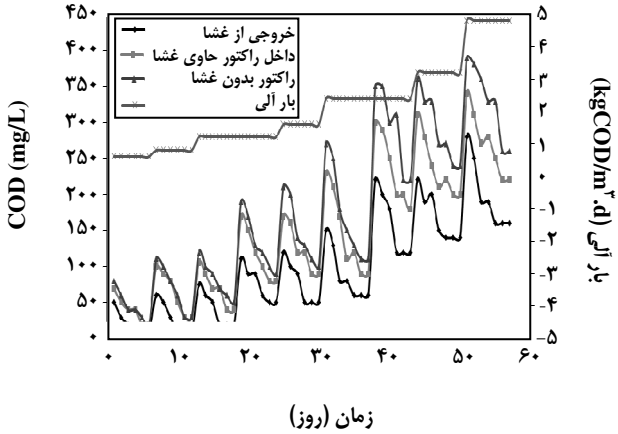
COD خروجی از غشا به طور میانگین حدود ۶۰ میلی گرم بر لیتر از COD داخل راکتور دارای غشا کمتر بوده و بازده حذف آن



شکل ۳ـ تغییر COD بر حسب زمان در مرحله ناپیوسته.



شکل ۴ـ تغییر SS بر حسب زمان در مرحله ناپیوسته.



شکل ۵ـ تغییر COD و بار آلی بر حسب زمان.

حدود ۳/۴۵ درصد بیشتر به دست آمده که این امر نشان دهنده قابلیت غشا در کاهش COD می‌باشد. بازده حذف COD در راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک معمولی به طور میانگین در حدود ۱/۷۸ درصد کمتر از داخل راکتور دارای غشا بوده است و این اختلاف با افزایش بار آلی زیادتر شده است.

تغییر مقدار توده میکروبی (SS) درون دو راکتور و تغییر بار آلی بر حسب زمان در شکل ۶ نشان داده شده است.

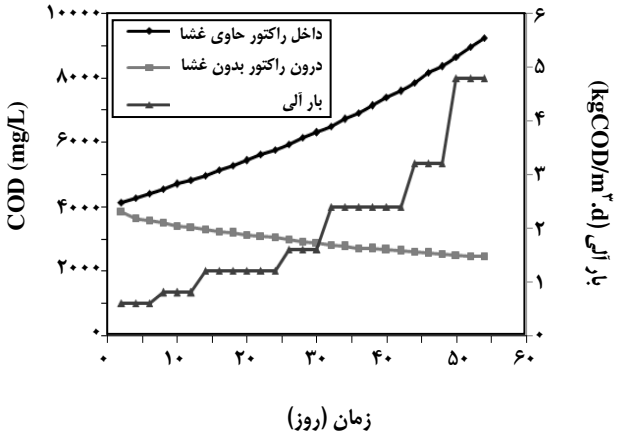
در هر بار آلی، میزان توده میکروبی معلق جامد درون راکتور بدون غشا مقدار کمی کاهش یافته ولی در راکتور دارای غشا این میزان افزایش پیدا کرده است زیرا غشا مانع خروج زیست توده شده است. با افزایش بار آلی، توده میکروبی تولید شده در راکتور دارای غشا افزایش یافته و در نتیجه اختلاف غلظت SS دو راکتور افزایش یافته است. این توده میکروبی به تصفیه زیستی کمک کرده و در نتیجه، حذف در راکتور دارای غشا بهتر انجام شده است.

میزان SS از ۴۰۰۰ میلی گرم بر لیتر به ۹۲۳۰ میلی گرم بر لیتر راکتور زیستی دارای غشا و ۲۴۵۰ میلی گرم بر لیتر برای راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک معمولی رسیده است.

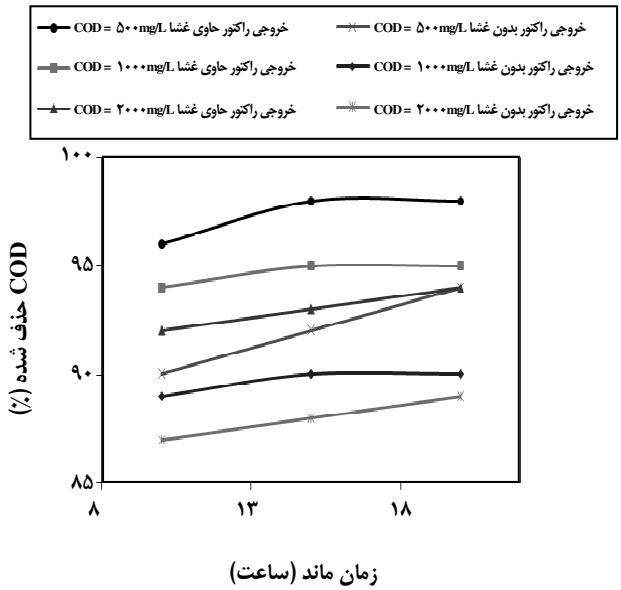
به منظور بررسی اثر CODهای ورودی گوناگون، در شکل ۷ روند تغییر بازده حذف COD بر حسب زمان ماند در COD های ورودی گوناگون آورده شده است.

در راکتور دارای غشا در COD ورودی برابر با ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر، بازده از ۹۶ درصد به ۹۸ درصد ، در COD ورودی برابر با ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر، بازده از ۹۴ درصد به ۹۵ درصد و در COD ورودی برابر با ۲۰۰۰ میلی گرم بر لیتر، بازده از ۹۲ درصد به ۹۴ درصد رسیده است. در راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک معمولی نیز در COD ورودی برابر با ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر، بازده از ۹۰ درصد به ۹۴ درصد، در COD ورودی برابر با ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر، بازده از ۸۹ درصد به ۹۰ درصد و در COD ورودی برابر با ۲۰۰۰ میلی گرم بر لیتر، بازده از ۸۷ درصد به ۸۹ درصد رسیده است.

بنابراین در هر COD ورودی، بازده حذف COD با افزایش زمان ماند، افزایش پیدا کرده است زیرا میکروارگانیسم ها زمان بیشتری برای انجام فعالیت های خود داشته‌اند. ولی درجه حساسیت نسبت به زمان ماند کم است به طوری که با افزایش زمان ماند از ۱۰ ساعت به ۲۰ ساعت، میانگین درصد حذف COD تنها به میزان ۱/۶۷ درصد افزایش یافته است.



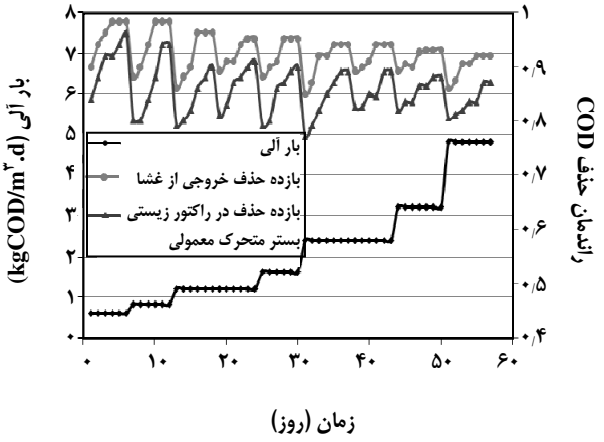
شکل ۶ ـ تغییرهای SS و بار آلی بر حسب زمان.



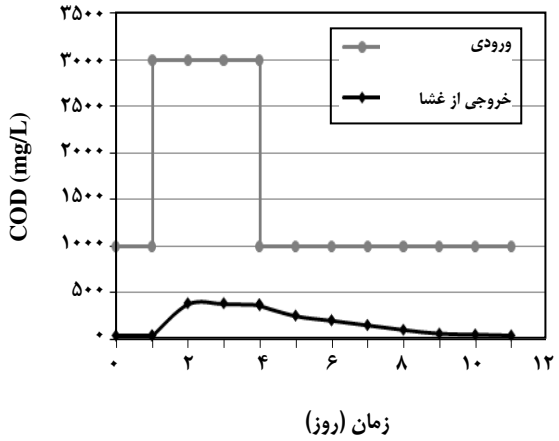
شکل ۷ـ روند تغییرهای بازدهان حذف COD بر حسب زمان ماند در COD های ورودی گوناگون.

در شکل ۸ روند تغییر بار آلی ورودی و بازده حذف COD بر حسب زمان نشان داده شده است.

همان گونه که دیده می‌شود با افزایش بار آلی ورودی در طول زمان، بازده حذف COD در حالت پایدار کاهش پیدا کرده است به طوری که در راکتور زیستی دارای غشا بازده حذف از ۹۸ درصد در بار آلی ۰/۶ کیلوگرم بر متر مکعب در روز به ۹۲ درصد در بار آلی ۴/۸ کیلوگرم بر متر مکعب در روز رسیده و در راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک معمولی نیز بازده حذف از ۹۶ درصد در بار آلی



شکل ۸ ـ روند تغییر بار آلی ورودی و بازده حذف COD بر حسب زمان.



شکل ۹ ـ تغییر COD بر حسب زمان در شرایط تغییر ناگهانی بار.

۰/۶ کیلوگرم بر متر مکعب در روز به ۸۷ درصد در بار آلی ۴/۸ کیلوگرم بر متر مکعب در روز رسیده است.

از آن جا که یک سامانه تصفیه مناسب باید افزون بر کارکرد مناسب و بهینه در شرایط عادی، قابلیت تحمل تغییر بارهای ناگهانی را نیز داشته باشد، در این پژوهش برای بررسی اثر تغییر غلظت ناگهانی، COD ورودی به طور ناگهانی برای مدت ۳ ساعت از ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر به ۳۰۰۰ میلی گرم بر لیتر افزایش یافت و عملکرد سامانه تلفیقی راکتور زیستی بستر متحرک مجهز به جداکننده غشایی در زمان ماند ۱۰ ساعت بررسی شد. به عبارت دیگر بار آلی به طور ناگهانی از ۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب در روز به ۳/۶ کیلوگرم بر متر مکعب در روز رسید. نمودار تغییر COD بر حسب زمان در شکل ۹ آمده است.

همان‌گونه که از شکل مشخص است سامانه پس از ۷ ساعت به حالت پایدار رسیده است و بازده حذف از ۹۶ درصد به ۸۷/۳۴ درصد کاهش پیدا کرده و دوباره به ۹۶ درصد رسیده است. بنابراین اگرچه درصد حذف ۸/۶۶ درصد کاهش یافته ولی سامانه دوباره با شرایط پیش آمده هماهنگ شده است و این امر نشان می‌دهد که سامانه پایداری خوبی در برابر تغییرهای ناگهانی بار وارد بر آن داشته است. این موضوع یکی از برتری‌های استفاده از این فرایند برای پساب‌هایی است که کیفیت و کمیت آنها در طول روز متغیر است.

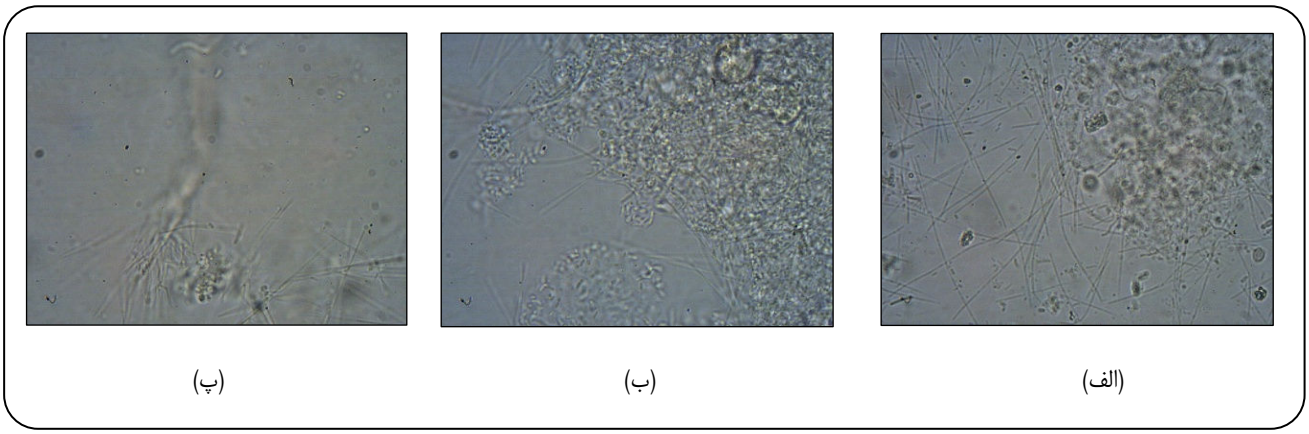
در سامانه دارای غشا، $\frac{SS\ \text{چسبیده}}{SS\ \text{معلق}}$ در حدود ۰/۲۵ تا ۰/۴ قرار داشت

در حالی که در راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک معمولی این نسبت در حدود ۰/۲۵ تا ۱/۵ به دست آمد. همان‌گونه که مشخص است، در راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک تلفیقی با غشا، توده میکروبی معلق در راکتور نیز نقش مهمی را در تصفیه زیستی بازی می‌کند در حالی که در راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک معمولی سهم توده میکروبی معلق در تصفیه کمتر می‌باشد.

یکی دیگر از آزمایش های انجام شده، اندازه‌گیری نسبت VSS به SS می‌باشد که نشان دهنده نسبت مواد آلی و فرار جامد به کل مواد معلق جامد درون راکتور است. زیست توده فعال در راکتور شامل کل میکرارگانیسم‌های زنده موجود در راکتور است و به طور معمول برحسب VSS بیان می‌شود. در ابتدای کار این نسبت در حدود ۰/۶۲ بوده است ولی سرانجام این میزان به ۰/۷۶ رسیده که نشان دهنده افزایش قابلیت تصفیه زیستی می‌باشد.

در شکل ۱۰ میکروارگانیسم‌های مربوط به راکتورها و زیست فیلم با هم مقایسه شده است.

در راکتورها، مخلوطی از میکروارگانیسم‌ها، شامل میکروارگانیسم‌های رشته‌ای، کروی، و میله‌ای دیده شده‌اند. یکی از مشکل‌های راکتورهای زیست فیلمی با بستر متحرک که در مقاله‌ها به آن اشاره شده است، تولید لجن با ویژگی‌های ته‌نشینی اندک است که علت آن می‌تواند غالب بودن میکروارگانیسم‌های رشته‌ای در زیست فیلم باشد. همان‌گونه که از شکل‌ها پیداست در زیست فیلم مقدار زیادی از باکتری های رشته‌ای قابل دیدن است. در راکتور بدون غشا وجود باکتری‌های رشته‌ای کمتر از راکتور دارای غشا بوده است که علت این امر می‌تواند وجود مقدار زیادی زیست فیلم کنده شده در راکتور دارای غشا باشد زیرا خروج لجن مازاد در این راکتور بسیار کمتر بوده است.



شکل ۱۰ـ (الف) نمایی از میکروارگانیسم‌های رشد یافته درون راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک معمولی (ب) نمایی از میکروارگانیسم‌های رشد یافته درون راکتور زیستی حاوی غشا (پ) نمایی از میکروارگانیسم‌های رشد یافته بر روی زیست فیلم.

در این پژوهش شاخص حجمی لجن (SVI) بین ۲۰۰–۹۰ بود که نشان می‌دهد لجن راکتورهای زیستی قابلیت ته نشینی خوبی ندارد. در بار آلی کمتر، قابلیت ته نشینی بهتر بوده و لجن بهتری تولید شده است زیرا باکتری های رشته ای کمتری تولید شده است.

همچنین در این پژوهش دیده شد که با افزایش زمان ماند و COD ورودی، فعالیت متابولیکی میکروارگانیسم‌ها و SS تولیدی افزایش یافته است. با افزایش زمان ماند، مقدار توده میکروبی افزایش یافته، اندازه ذره‌های کوچک‌تر شده و لخته‌ها شکسته شده‌اند. بنابراین میزان گرفتگی غشا افزایش پیدا کرده است که البته گرفتگی غشا در حد کمی بوده و مشکلی در عملکرد سامانه به وجود نیاورده است. در مدت زمان پژوهش، پس از هر دوره آزمایش پیوسته که حدود یک هفته به طول انجامید، از روش شست و شوی معکوس برای تمیز کردن غشا استفاده شد. با این روش آب از قسمت خروجی غشا به طرف ورودی آن جریان پیدا می‌کرد و این عامل باعث می‌شد که ذره‌های باقی مانده در درون و یا بر روی سطح غشا تا حدی شسته شده و از محیط عمل خارج شوند.

نتیجه گیری

نتیجه‌های به دست آمده از این پژوهش عبارتند از :

- تلفیق راکتورهای زیست فیلمی بستر متحرک و راکتورهای غشایی، مشکل‌های ناشی از هر کدام از آن‌ها را بهبود بخشیده و قابلیت کارکرد در بار آلی ۴٫۸ - ۰٫۶ کیلوگرم بر متر مکعب در روز را به منظور تصفیه پساب دارا می‌باشد.
- به طور کلی بازده حذف COD در راکتور دارای غشا در حدود ۱٫۷۸ درصد بیشتر از راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک معمولی به دست آمد.
- میزان توده میکروبی معلق جامد درون راکتور بدون غشا مقدار کمی کاهش یافته ولی در راکتور دارای غشا این میزان افزایش پیدا کرده است زیرا غشا مانع خروج زیست توده شده است. با افزایش بار آلی، توده میکروبی تولید شده در راکتور دارای غشا افزایش یافته و در نتیجه اختلاف غلظت SS دو راکتور افزایش پیدا کرده است. این توده میکروبی به تصفیه زیستی کمک کرده و در نتیجه حذف در راکتور دارای غشا بهتر صورت گرفته است.
- در هر دو راکتور در همه زمان ماندها با افزایش COD ورودی، بازده حذف کاهش پیدا کرده است.
- در هر دو راکتور در هر COD ورودی، بازده COD با افزایش زمان ماند، افزایش یافته است.
- در هر دو راکتور با افزایش بار آلی، بازده حذف COD کاهش پیدا کرده است.
- به‌طور کلی بیشترین بازده حذف در بار آلی ۰٫۶ کیلوگرم بر متر مکعب در روز (COD برابر ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر و زمان ماند ۲۰ ساعت) رخ داد. این میزان در راکتور دارای غشا ۹۸ درصد بود و COD خروجی به ۱۰ میلی گرم بر لیتر رسید. در راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک معمولی نیز بیشترین حذف ۹۶ درصد بود و COD خروجی به ۲۰ میلی گرم بر لیتر رسید.
- به علت رشد زیاد باکتری‌های رشته‌ای، لجن راکتورهای زیستی قابلیت ته نشینی خوبی نداشت.

• در سامانه تلفیقی با غشا، جامد معلقی خارج نمی‌شود که یکی از برتری‌های این سامانه‌هاست زیرا خروجی با کیفیت بالایی را فراهم می‌کند و این امر شرایط استفاده دوباره از پساب را فراهم می‌کند و دیگر نیازی به استفاده از ته نشین کننده‌های پیشرفته وجود نخواهد داشت. بنابراین این سامانه در شرایطی که مشکل کمبود فضا و نیاز به استفاده دوباره از آب با کیفیت به نسبت بالا وجود دارد، توصیه می‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۳۰

مراجع

[1] Davies W.J., Le M.S., Heath C.R., Intensified Activated Sludge Pprocess with Submerged Membrane Microfiltration, *Water Sci. Technol.*, **38** (4–5), p. 421(1998).

[2] Simon Judd," The MBR Book, Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment", Elsevier, Oxford, (2006).

[3] Stephenson T., Judd S., Jefferson B., Brindle K., "Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment", IWA Publishing, UK, (2000).

[4] Odegard H., Rusten B., Westrum T., A New Moving Bed Biofilm Reactor - Application and Results, *Wat. Sci. Tech.*, **29** (10-11), p. 157 (1994).

[5] Aygun A., Nas B., Berktay A., Influence of High Organic Loading Rates on COD Removal and Sludge Production in Moving Bed Biofilm Reactor, *Environmental Engineering Science*, **25** (9), p.1311 (2008).

[6] Rusten B., Upgrading to Nitrogen Removal with KMT Moving Bed Biofilm Reactor, *Wat. Sci. Tech.*, **29** (12), p. 185 (1994).

[7] Metcalf & Eddy "Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, and Reuse" Revised by George Tchobanoglouse, McGrow-Hill, Fourth edition, (2003).

[8] Rusten B., McCoy M., Proctor R., Siljudalen J.G., The Innovative Moving Bed Biofilm Reactor/Solids Contact Reaeration Process for Secondary Treatment of Municipal Wastewater, *Water Environment Research*, **70** (5), p. 1083 (1998).

[9] Borghei S.M., Hosseini S.H., The Treatment of Phenolic Waste Water Using a Moving Bed Biofilm Reactor, *Process Biochemistry*, **39**, p. 1177 (2004)

[10] APHA, AWWA and WPCF, "Standard Method for the Examination Water and Waste Water", Washington DC, American Public Health Association, USA (1998).