

مطالعه قابلیت سامانه راکتور ایرلیفت ناپیوسته پشت سرهم در تصفیه فاضلاب نفتی

شبنم تقی پور، بیتا آیتی *

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۳/۱۷ - تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۵/۲۸)

چکیده

آلودگی آب‌ها به هیدروکربن‌های نفتی و ترکیبات خطرناک موجود در آن، تهدیدی شایان توجه برای محیط زیست و سلامت انسان است. با توجه به بالابودن میزان این ترکیبات، خواص فیزیکی متنوع آن‌ها و پرهزینه بودن فناوری‌های تصفیه فیزیکوشیمیایی، به روشی اقتصادی و زیست محیطی مانند زیست پالایی برای تصفیه این آلاینده‌ها نیاز است. در این زمینه، از سامانه اس بی آر به همراه گرانول‌های هوازی با سیکل شش ساعته استفاده شد. در ۱۲۰ روز راهبری سامانه، مقدار اکسیژن مورد نیاز واکنش شیمیایی و هیدروکربن‌های نفتی کل معادل به ترتیب تا ۵۰۰ میلی گرم در لیتر و ۱۱۵ میلی گرم در لیتر افزایش داده شدند. پس از تشکیل گرانول، راندمان حذف به طور معناداری افزایش یافت، به گونه‌ای که در مرحله افزایش بار، راندمان حذف اکسیژن مورد نیاز واکنش شیمیایی و تی پی اچ معادل، هیچ گاه کمتر از ۸۷/۳ درصد و ۸۸ درصد نبود. گرانول‌های ایجاد شده از نظر ظاهری قهوه‌ای رنگ و از نظر اندازه، در محدوده ۵-۱۳ میلی متر بودند. میزان گرانول سازی و رطوبت گرانول‌ها به ترتیب برابر ۹۷/۶ درصد و ۹۲ درصد بود و سرعت سقوط آن‌ها در محدوده ۳-۳/۳۲ سانتی متر در ثانیه بود که بالاتر از سرعت ته نشینی فلوک‌هاست. نتایج نشان داد گرانوله شدن یک فناوری بسیار کارآمد و انعطاف پذیر برای تصفیه آلاینده‌ها در مقیاس کامل است و سبب بهبود مشخصات سامانه و کاهش چشمگیر مدت زمان ته نشینی می شود که تأثیر بسزایی در کاهش سیکل تصفیه آلاینده‌ها دارد.

واژه‌های کلیدی: اکسیژن مورد نیاز شیمیایی، زیست محیطی، راکتور ایرلیفت ناپیوسته پشت سرهم، گرانول هوازی، هیدروکربن‌های نفتی.

۱. مقدمه و هدف

زیست محیطی مانند زیست پالایی برای حذف آلاینده‌های نفتی بوده‌اند. از مزایای این روش می توان به قابلیت بازیافت نفت و فلزات با ارزش موجود در پساب، کاهش سمیت و حجم زائدات اشاره کرد [۲].

در دهه گذشته، نتایج تحقیقات فراوانی نشان داده‌اند که فناوری لجن گرانوله هوازی، دستاوردی جدید در تصفیه بیولوژیکی فاضلاب بوده است. تعریف کلی گرانول هوازی در اولین کارگاه مونیخ در سال ۲۰۰۴ به صورت زیر بیان شد: دانه‌هایی که تشکیل گرانول‌های هوازی لجن فعال را می‌دهند، با عنوان دانه‌هایی با منشأ میکروبی شناخته می‌شوند که با کاهش

استفاده از آب برای استخراج و پالایش نفت خام در پالایشگاه‌های نفت و به تبع آن تولید حجم بالای فاضلاب سبب می‌شود به فرایندهای کارآمدی در تصفیه آب و فاضلاب نیاز باشد [۱]. پساب نفتی اغلب از طریق فناوری‌های تصفیه فیزیکوشیمیایی از جمله پیرولیز، سانتریفوژ از طریق سیکلوترون‌ها و امولسیون سازی با الکتروود قبل از دفن، شناورسازی کف و اکسیداسیون حرارتی تصفیه می‌شود. با این حال، فناوری‌های تصفیه فیزیکوشیمیایی بسیار پرهزینه است. محققان همواره در پی یافتن روشی مقرون به صرفه و

حاصل در این پژوهش، $2/47$ میلی‌متر بود. مقدار متوسط فسفر حذف‌شده تا روز ۲۵ برابر $75/2$ درصد، از روز ۲۵ تا ۱۰۰ (در سیکل شش ساعته) برابر $32/9$ درصد و از روز ۱۰۰ تا ۱۴۱ (در سیکل هشت ساعته) برابر $42/6$ درصد و متوسط مقدار نیتروژن حذف‌شده برابر 74 درصد بوده است [۱۱].

لنگ و همکاران، پایداری لجن گرانوله هوازی را برای تصفیه لجن شهری آبیگری‌شده در مقیاس آزمایشگاهی آزمایش کردند. پس از ۸۴ روز راهبری سامانه، گرانول‌ها به رنگ زرد-قهوه‌ای، متراکم و کروی‌شکل بودند و اندازه متوسط آن‌ها $1/9$ میلی‌متر بود. غلظت اولیه سی او دی، آمونیوم، کل نیتروژن و کل فسفر به ترتیب برابر $566/3$ ، $67/4$ ، $75/56$ و $1/89$ میلی‌گرم بر لیتر بود. در این تحقیق، راندمان حذف سی او دی، آمونیوم، کل نیتروژن و کل فسفر در زمان ماند شش ساعت به ترتیب برابر 95 ، 99 ، 96 و 88 درصد بود [۱۲].

وی و همکاران، کارایی گرانول‌های هوازی موجود در سامانه اس بی آر را برای حذف هم‌زمان نیتروژن و فسفر از فاضلاب آزمایش کردند. به‌منظور دستیابی به پارامترهای بهینه برای افزایش حذف هم‌زمان فسفر و نیتروژن، نسبت سی او دی به نیتروژن از ۶ تا ۱۰ تغییر یافت که نتیجه آن افزایش میزان حذف نیتروژن و فسفر بود. در نسبت سی او دی به نیتروژن برابر ۹، کل نیتروژن و فسفر حذف‌شده در زمان ماند شش ساعت، به ترتیب برابر $89/8$ و $77/5$ درصد بود. در این شرایط، میزان کل نیتروژن و فسفر خروجی به ترتیب برابر $29/92$ و $4/1$ میلی‌گرم بر لیتر بود [۱۳].

سیروس رضایی، راندمان حذف سی او دی فاضلاب را در سامانه اس بی آر از طریق گرانول‌های هوازی با منبع کربنی گلوکز در سیکل چهار ساعته بررسی کرد. میزان بارگذاری تا 1500 میلی‌گرم بر لیتر افزایش داده شد. راندمان حذف در این تحقیق بیش از 95 درصد بود. قطر گرانول‌های تشکیل شده در محدوده $0/5 - 5$ میلی‌متر قرار داشت [۱۴].

رضایی با استفاده از سامانه اس بی آر، تصفیه ام تی بی ای را انجام داده است. در این تحقیق که 150 روز به طول انجامید، مدت زمان سیکل چهار ساعت در نظر گرفته شد و مقدار سی او دی تا 900 میلی‌گرم بر لیتر افزایش داده شد. راندمان حذف سی او دی در این تحقیق برابر $64/2$ درصد بود. قطر گرانول‌های تشکیل‌شده در محدوده $3 - 6$ میلی‌متر قرار داشت [۱۵].

براساس نتایج تحقیقات انجام‌گرفته، می‌توان به توانایی بالای بیوگرانول‌ها در تصفیه فاضلاب پی برد؛ بنابراین، بررسی

نیروی برشی هیدرودینامیکی لخته نمی‌شوند و سرعت ته‌نشینی آن‌ها به‌طور شایان توجهی سریع‌تر از لخته‌های لجن فعال است [۳].

از مزایای لجن گرانوله نسبت به لجن فعال، ساختار منظم و فشرده هیدرولیکی [۴]، توانایی بیشتر در آزدایی لجن [۵]، ته‌نشینی بسیار عالی [۶]، نگهداری بالای بیومس و مقاومت بالا در برابر تغییرات بار آلودگی و شوک [۷] و مقاومت بالا در برابر تغییرات شرایط محیطی از جمله دما و پی اچ^۱ [۸] است و از مزایای گرانول هوازی می‌توان به حذف مؤثر مواد مغذی (فسفر و ازت)، قابلیت تحمل میزان بار آلی بالا، تحمل نوسانات بالای مواد سمی و زمان ماند بالا اشاره کرد [۹].

سامانه راکتور ایرلیفت ناپیوسته پشت‌سره (اس بی آر)^۲، نوعی راکتور بسته متوالی است که محتویات آن با استفاده از هوا بالا می‌رود و وجود یک بالابرنده^۳ داخلی و پایین‌آورنده^۴ سبب حرکت چرخشی لجن درون راکتور می‌شود. هر سیکل راکتور بسته متوالی به‌طور معمول از یک دوره فراوانی مواد آلی (که با استفاده از پارامتر اکسیژن مورد نیاز واکنش شیمیایی (سی او دی)^۵ اندازه‌گیری می‌شود) و پس از آن یک دوره قحطی (فعالیت درونی یا تخریب ترکیبات داخلی ذخیره‌شده) تشکیل شده است. محققان معتقدند رژیم قحطی-فراوانی دلیل اساسی گرانول‌سازی هوازی در این سامانه است [۱۰]. استفاده از راکتور بسته در این سامانه موجب می‌شود که غلظت بالایی از سوپسترا در آغاز هر سیکل وارد سامانه شود. از ویژگی‌های منحصربه‌فرد راکتور بسته متوالی نسبت به راکتور لجن فعال با جریان پیوسته، نحوه عملکرد آن در هر سیکل است. راکتور بسته متوالی که به‌همراه گرانول‌ها برای انجام دادن عمل تصفیه فاضلاب به‌کار برده می‌شود، با عنوان راکتور ایرلیفت گرانولی ناپیوسته پشت‌سره (جی اس بی آر)^۶ نیز نامیده می‌شود [۳].

در ادامه، به نمونه‌ای از کاربرد این سامانه و نتایج آن اشاره می‌شود.

لی و همکاران، میزان حذف فسفر معدنی و نیتروژن (به‌صورت نیتريت) از فاضلاب را با استفاده از سامانه جی اس بی آر بررسی کردند. غلظت اولیه فسفر و آمونیوم به ترتیب 35 و 30 میلی‌گرم بر لیتر بود. متوسط قطر گرانول‌های

1. pH
2. Sequencing Batch Airlift Reactor (SBAR)
3. Riser
4. Down-comer
5. Chemical Oxygen Demand (COD)
6. Granular Sequencing Batch Airlift Reactor (GSBAR)

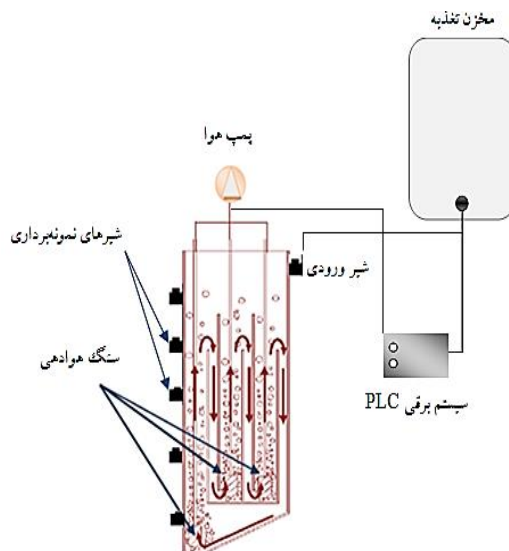
پلکسی گلاس با ضخامت ۳ میلی متر و حجم مفید ۳/۶ لیتر بود. ارتفاع پایلوت ۵۶ سانتی متر بود و ابعاد بالابرنده و پایین آورنده به ترتیب ۴×۴ و ۴×۱/۵ سانتی متر بود. دوره کار راکتور چهار سیکل شش ساعته در نظر گرفته شد که شامل ۲ دقیقه خوراک دهی، ۳۱۲ دقیقه هوادهی و واکنش، ۲۴ دقیقه ته نشینی، ۷ دقیقه تخلیه و ۱۵ دقیقه سکون بود. شماتیک سامانه استفاده شده در این تحقیق در شکل ۱ می آید.

قابلیت ساختار جدیدی از سامانه اس بی آر و استفاده از آن ها برای تصفیه هیدروکربن های نفتی از اهداف مهم این تحقیق بود.

۲. مواد و روش ها

۱.۲. سامانه اس بی آر

پایلوت بیولوژیکی استفاده شده در این تحقیق از جنس



شکل ۱. شماتیک پایلوت و سامانه استفاده شده در تحقیق

باقی می ماند. در این حالت، از میزان گلوکز تزریقی ۱۰ درصد کم شد و به همان میزان فاضلاب نفتی افزوده شد. با دستیابی به درصد حذف سی او دی و هیدروکربن های نفتی کل (تی پی اچ) مناسب، سهم بار آلی ترکیبات هیدروکربنی به ۲۰، ۳۰، ۴۰ درصد افزایش یافت و میزان گلوکز به میزان ۸۰، ۷۰، ۶۰ درصد کاهش یافت. این روند تا جایی ادامه داشت که در نهایت ۱۰۰ درصد خوراک تزریقی به سامانه حاوی ترکیبات هیدروکربنی با سی او دی معادل ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر بود. با این روش زمان طولانی تری برای سازگاری میکروارگانیسم ها صرف شد، اما نتیجه کار دارای اطمینان کافی بود. در این دوره، در هر مرحله راندمان حذف راکتور اندازه گیری می شد.

۴.۲. آزمایش های انجام گرفته

در تمام مراحل انجام دادن آزمایش، پارامترهای کنترلی مانند

۲.۲. نحوه تهیه خوراک ورودی

برای دستیابی به ترکیبی مشابه با پساب نفتی پالایشگاه نفت تهران، از ترکیب نفت خام با گازوئیل به نسبت ۲ به ۱ استفاده شد. قبل از ورود مخلوط به سامانه، به مدت ۴۸ ساعت در شرایط هوادهی مشابه با بیوراکتور قرار داده شد تا ترکیبات سبک، همراه با بخار آب (وارد شدن به فاز گاز) از محیط خارج شود و هیدروکربن های سنگین به دیواره های ظرف بماند. با این کار از ورود هیدروکربن های خیلی سبک و خیلی سنگین به راکتور جلوگیری شد [۱۶].

۳.۲. سازگاری میکروارگانیسم ها و افزایش بار

ابتدای مرحله سازگاری به منظور تأمین خوراک، از منبع کربنی گلوکز با سی او دی اولیه ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر استفاده شد و در ادامه فاضلاب نفتی حاوی غلظت های مختلف از هیدروکربن های نفتی تزریق شد. روند کار به این صورت بود که در هر مرحله، افزودن غلظت آلاینده بیشتر، زمانی صورت می گرفت که درصد حذف سی او دی در سیکل متوالی، پایا

۳. نتایج و بحث

۱.۳. تغییرات حذف سی او دی

در این تحقیق دوره سازگاری ۵۹ روز به طول انجامید. به طور میانگین پنج تا هفت روز (۲۰ تا ۲۸ سیکل) زمان برای رسیدن به حالت پایا با هربار افزایش بار نیاز بود. در مدت ۱۲۰ روز راهبری سامانه، درصد حذف سی او دی به طور معناداری بالا بود و در انتهای دوره سازگاری در روز ۵۹، به ۹۵/۶ درصد رسید. پس از این مرحله، بار آلی تا مقدار سی او دی برابر ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر افزایش یافت. در ابتدای هر مرحله، راندمان حذف کمتر بود، ولی با گذشت زمان و در سیکل‌های بعدی به تدریج افزایش یافت و در نهایت به ۸۷/۳ درصد در سیکل ۴۸۰ رسید. نتایج عملکرد سامانه در شکل ۲ ارائه شده است.

رزمن و همکاران، ۹۸/۴ درصد از فاضلاب شرکت لاستیک‌سازی را با استفاده از سامانه اس بی آ آر حذف کردند. میزان بارگذاری در این تحقیق ۳/۶ کیلوگرم در مترمکعب در روز و زمان ماند ۶ ساعت بود.

۲.۳. تغییرات حذف تی پی اچ

به دلیل هزینه‌بر بودن آزمایش تی پی اچ، در مقادیر راندمان حذف حداکثر سی او دی در هر مرحله افزایش بار آلی، این پارامتر اندازه‌گیری شد. شکل ۳ میزان تغییرات راندمان حذف تی پی اچ سامانه بیولوژیکی در دوره سازگاری و افزایش بار را نشان می‌دهد. مقدار تی پی اچ فاضلاب ورودی از صفر در ابتدای دوره سازگاری به ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر در انتهای این دوره رسید. تا روز ۱۶، هم‌زمان با افزایش میزان تی پی اچ ورودی از صفر به ۴۰ میلی گرم بر لیتر، راندمان حذف برابر ۱۰۰ درصد بود. با افزایش تی پی اچ ورودی تا ۵۲ میلی گرم بر لیتر راندمان حذف به مقدار ناچیزی کاهش یافت، به گونه‌ای که به ۹۵/۵ درصد در انتهای دوره سازگاری رسید. با سازگاری ۱۰۰ درصد میکروارگانیسم‌ها به آلاینده، بار آلی وارد شده به سامانه تا ۱۱۵ میلی گرم بر لیتر افزایش یافت. با افزایش بار آلی، راندمان حذف تی پی اچ به ۸۸ درصد در انتهای روز به ۱۲۰ رسید. درکل، میانگین کاهش راندمان حذف تی پی اچ در دوره بهره‌برداری برابر ۱۲ درصد بود. ممکن است روند نزولی نمودار به دلیل کاهش توانایی لجن در تحمل آلاینده سمی ورودی باشد.

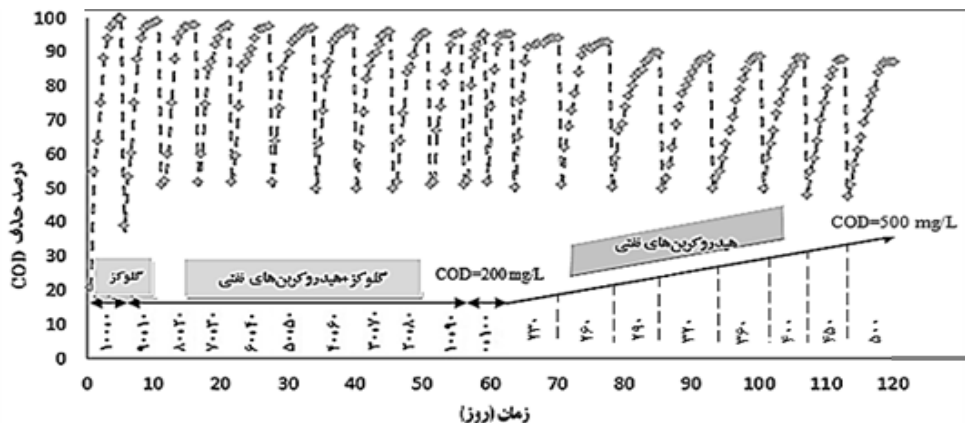
دما، پی اچ، پتانسیل کاهش اکسندها (او آر پی)^۱ و مقدار اکسیژن محلول برای کنترل و حفظ شرایط محیطی مناسب برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها به طور پیوسته ارزیابی شدند. پی اچ راکتور و اکسیژن محلول در محدوده استاندارد ۶/۸-۷/۲ و ۲-۶ میلی گرم بر لیتر نگه داشته شدند و او آر پی همواره بیشتر از ۱۰۰ بود. آزمایش‌هایی مانند تعیین جامدات معلق محلول (ام آل اس اس)^۲، جامدات معلق فرار محلول (ام وی آل اس اس)^۳، شاخص حجمی لجن (SVI₅، SVI₃₀)، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (سی او دی) و تی پی اچ طبق کتاب استاندارد متد انجام گرفتند [۱۷]. سرعت ته‌نشینی و نیز قطر گرانول‌ها پیوسته آنالیز می‌شدند.

۵.۲. مواد و تجهیزات

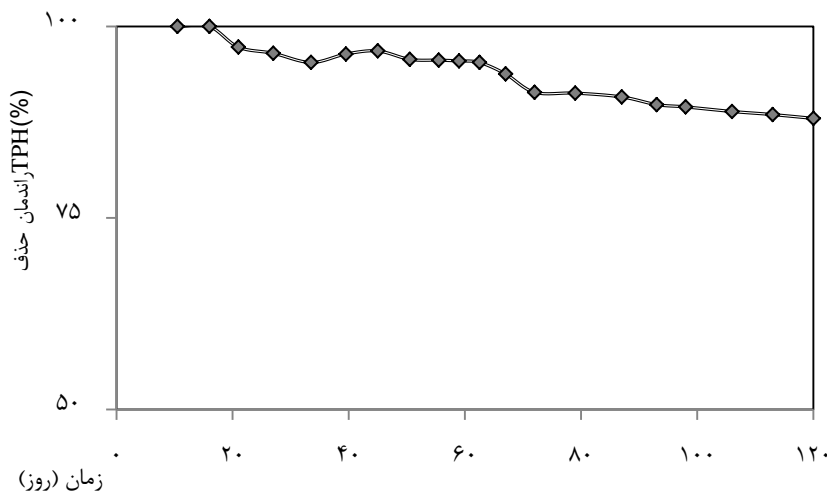
در این تحقیق، از گلوکز برای تأمین منبع کربن، از اوره برای تأمین نیتروژن و از ترکیب پتاسیم دی هیدروژن فسفات و دی پتاسیم فسفات به منظور تأمین فسفر استفاده شد. با توجه به هواز بودن سامانه نسبت کربن به مواد مغذی به کاررفته ۱:۵:۱۰۰=C:N:P بود. میکروارگانیسم‌ها برای رشد علاوه بر مواد مغذی اصلی به مواد ریزمغذی نیاز دارند که به این منظور از مخلوط سولفات منیزیم، هیدروکسید کلسیم، سولفات مس، هیدروکسید آلومینیوم، کلرور کبالت شش آبه، سولفات آن هفت آبه و سولفات منگنز استفاده شد.

برای انجام دادن آزمایش‌ها و تعیین کردن پارامترهای اصلی و کنترلی از تجهیزاتی شامل سنسور اندازه‌گیری اکسیژن محلول محصول شرکت هک^۴، پی اچ متر شرکت متروهم^۵، اسپکتروفوتومتر ساخت شرکت هک^۶ استفاده شد. برای تعیین سی او دی، سی او دی راکتور با شانزده جالوله‌ای به منظور اندازه‌گیری سی او دی، از دستگاه آنالیزور تی او جی به تی پی اچ مدل اینفراکال^۷ برای اندازه‌گیری تی پی اچ، از آون به منظور تعیین میزان ام آل اس اس و رطوبت گرانول‌ها، از میکروسکوپ نوری دو چشمی ساخت شرکت زیس^۸ برای بررسی مورفولوژی گرانول‌ها و از کوره مدل هان یانگ^۹ برای تعیین میزان ام آل وی اس اس استفاده شد.

1. Oxidation-Reduction Potential (ORP)
2. Mixed Liquor Suspended Solid (MLSS)
3. Mixed Liquor Volatile Suspended Solid (MLVSS)
4. Hach LDO-HQ30
5. Metrohm-691
6. Hach-DR4000
7. Infracal
8. Zeiss
9. Hanyoung-M11L-1100



شکل ۲. درصد حذف سی او دی در ۱۲۰ روز



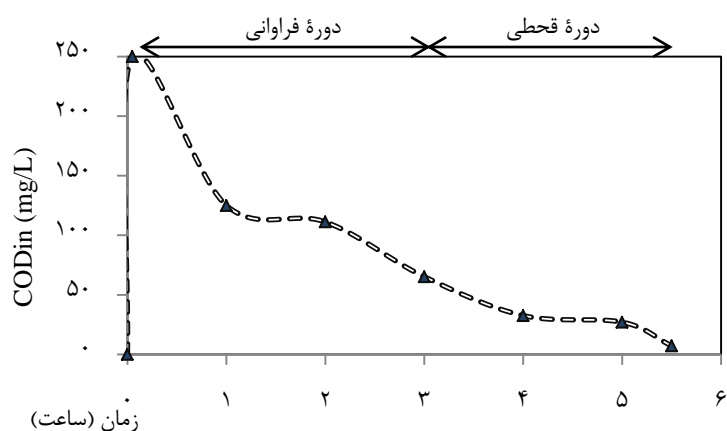
شکل ۳. راندامان حذف تی پی ایچ در دوره سازگاری با هیدروکربن های نفتی

محلول این است که تبدیل دوره فراوانی به دوره قحطی به طور مستقیم مربوط به افزایش غلظت اکسیژن محلول است [۱۸].

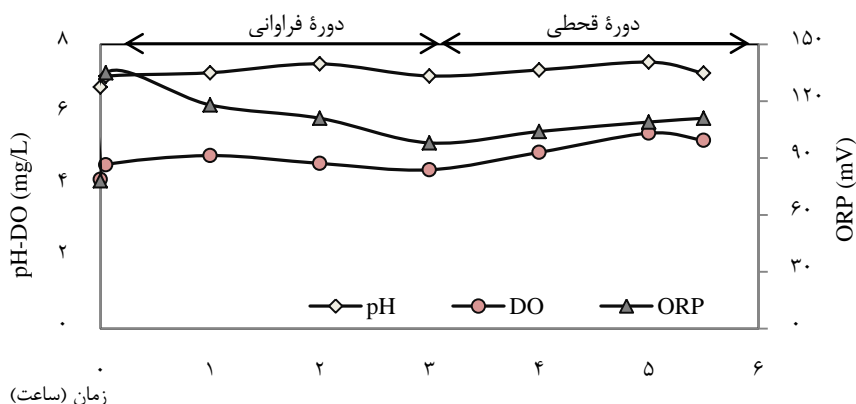
در این تحقیق، مدت زمان دوره فراوانی و قحطی از طریق اندازه گیری سی او دی، پی ایچ، او آر پی و اکسیژن محلول در روز ۸۸ و ۸۹ (سیکل های ۳۵۱، ۳۵۲ و ۳۵۵) بررسی شد. سی او دی ورودی در این سیکل ها برابر ۲۵۰ میلی گرم بر لیتر بود. به وضوح در شکل ۴ مشاهده می شود که بیوراکتور تا ساعت چهارم در فاز فراوانی بوده و پس از آن وارد فاز قحطی شده است. همان طور که در شکل ۵ قابل مشاهده است، غلظت اکسیژن محلول در دوره فراوانی کمتر از دوره قحطی بود و پی ایچ در ابتدای سیکل در محدوده خنثی قرار داشت، اما با نزدیک شدن به انتهای سیکل و تجزیه ترکیبات آلی، پی ایچ بازی شد.

۳.۳. رژیم فیست فامین^۱

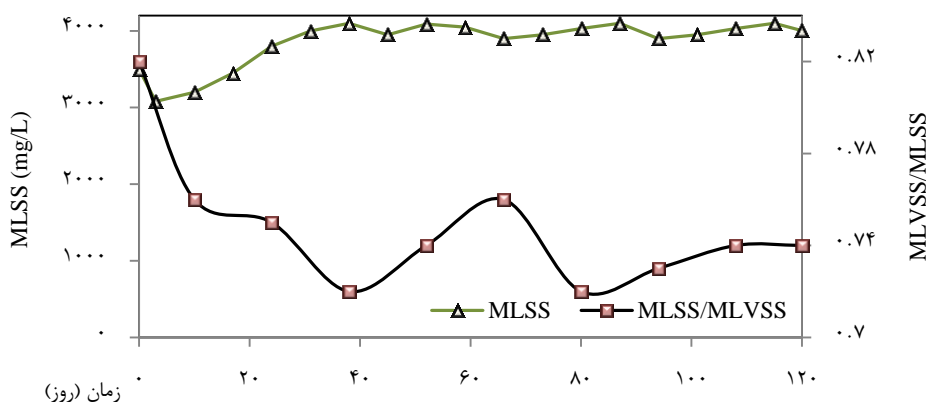
در طول دوره فراوانی، مواد آلی اکسید می شود و داخل سلول باکتریایی ذخیره می شود و در طول دوره قحطی، باکتری با استفاده از ترکیبات ذخیره شده رشد می کند. قحطی دوره ای بر آب گریزی سلول ها- که عاملی کلیدی در شکل گیری گرانول هاست- تأثیر بسزایی دارد. با این حال، هیچ نتیجه ای در مورد مدت زمان بهینه قحطی یا مطلوب ترین رابطه بین دوره قحطی و فراوانی گزارش نشده است. یک راه ساده برای کنترل روند رژیم و تشخیص نقطه شکست، شیب او آر پی است. در واقع، او آر پی پارامتری است که نزدیک ترین همبستگی را با روند تجزیه سی او دی دارد و کاهش اولیه آن نشان دهنده دوره فراوانی است که در آن میکروارگانیسم ها، مواد آلی را جذب می کنند. یکی از مهم ترین دلایل اندازه گیری اکسیژن



شکل ۴. میانگین سی او دی تجزیه شده نسبت به زمان در ۳ سیکل



شکل ۵. میانگین تغییرات پی اچ، اکسیژن محلول و او آر پی در ۳ سیکل



شکل ۶. تغییرات ام آل اس اس و نسبت ام آل اس اس به ام وی آل اس اس در طول زمان

۴.۳. تغییرات ام آل اس اس و ام آل وی اس اس
به منظور بررسی واکنش‌های بیولوژیکی در شرایط هوازی و فراهم کردن شرایط مناسب برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها، پارامترهای ام آل اس اس و ام آل وی اس اس به طور پیوسته کنترل می‌شدند. شکل ۶ تغییرات غلظت ام آل اس اس و

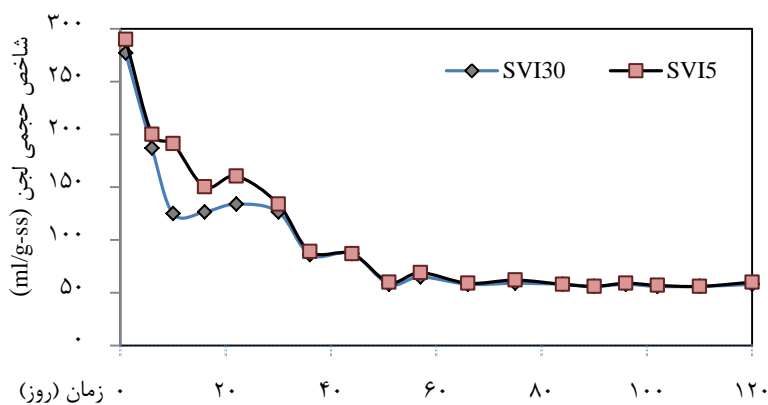
نتایج تحقیق وانگ و همکاران نیز بیانگر بالابودن غلظت سوبسترا در ۴۰ دقیقه ابتدای فعالیت سامانه در سیکل شش ساعته بود، به طوری که پس از این مدت، غلظت سوبسترا در سامانه افت شایان توجهی داشت [۱۹].

اندازه‌گیری این پارامتر پس از زمان ته‌نشینی کوتاه‌تر برای لجن گرانوله، نتایج مطمئن‌تری می‌دهد [۱۸]. در نتیجه، به‌منظور کنترل بهتر ته‌نشینی گرانول‌ها، SVI_5 نیز اندازه‌گیری شد. با توجه به شکل ۷، گذشت زمان و تشکیل گرانول‌ها، سبب بهبود فرایند ته‌نشینی و لخته‌سازی شده است، به‌گونه‌ای که مقدار SVI_{30} و SVI_5 به‌ترتیب از ۲۷۷ و ۲۹۰ میلی‌لیتر بر گرم جامدات معلق در سیکل اول به ۵۸ میلی‌لیتر بر گرم جامدات در سیکل ۲۴۰ رسید و تا انتهای روز ۱۲۰ حدوداً در همین مقدار باقی ماند. با افزودن آلاینده برای اولین بار، به‌دلیل وارد شدن شوک به میکروارگانیسم‌ها، مقدار اس وی آی در سیکل‌های ۳۷، ۶۱ و ۸۵، اندکی افزایش یافت، اما با گذشت زمان، مقدار آن کاهش یافت و به مقدار مطلوب رسید.

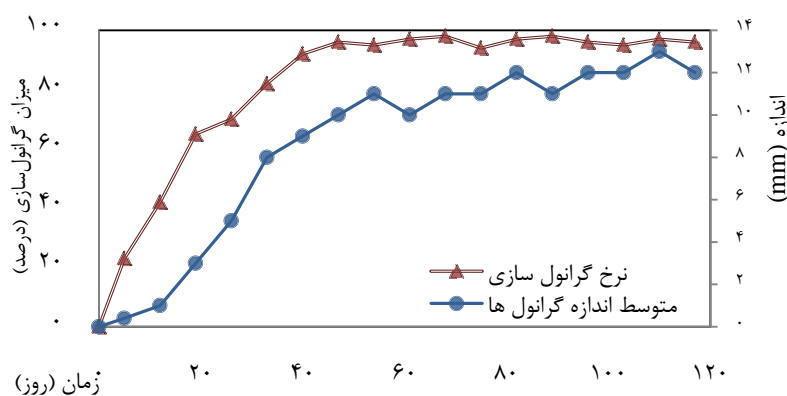
نسبت ام آل اس اس به ام آل وی اس اس را در سامانه نشان می‌دهد. برای اطمینان از نتایج و امکان مقایسه مراحل مختلف آزمایش، ام آل اس اس در حدود ۴۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نگه داشته شد. در حالت کلی، تغییرات نسبت ام آل اس اس به ام آل وی اس اس سیری نزولی داشت. بیشترین و کمترین مقدار این پارامتر برابر ۰/۸۲ و ۰/۷۲ بود و در روزهای پایانی به مقدار ۰/۷۴ رسید.

۵.۳. تغییرات اس وی آی

به‌منظور کنترل ته‌نشینی بیوراکتور، شاخص حجمی لجن به‌طور منظم اندازه‌گیری می‌شد. معمولاً مقدار SVI_{30} برای کنترل راکتورهای بیولوژیکی استفاده می‌شود، اما محققان معتقدند



شکل ۷. تغییرات SVI_5 و SVI_{30} در مدت راهبری سامانه



شکل ۸. میزان گرانول‌سازی و متوسط اندازه گرانول‌ها

پنجم، اولین گرانول‌ها با اندازه متوسط ۰/۴ میلی‌متر مشاهده شدند. گرانول‌های تشکیل‌شده در ابتدا کرکی شکل، نامنظم، ناپایدار و خاکستری رنگ بودند و با گذشت زمان و در انتهای دوره سازگاری رنگ آن‌ها از خاکستری به قهوه‌ای تغییر یافت. پس از

۶.۳. اندازه گرانول‌ها و میزان گرانول‌سازی

با گذشت پنج روز از راه‌اندازی سامانه، فرایند گرانول‌سازی آغاز شد. تغییراتی که در مورفولوژی گرانول‌ها با گذشت زمان ایجاد می‌شد، به‌طور مرتب با بررسی میکروسکوپی ارزیابی می‌شد. در روز

در حذف ام تی بی ای^۱ با استفاده از سامانه جی اس بی آر^۲، میانگین قطر گرانول‌های گزارش شده برابر ۶ میلی‌متر بود [۱۵]. شکل ۸ و شکل ۹ روند تغییر میزان گرانول‌سازی و اندازه متوسط گرانول‌ها را در این تحقیق نشان می‌دهد.

دوره سازگاری هم‌زمان با افزایش بار آلی، پایداری گرانول‌ها افزایش یافت. میزان گرانول‌سازی در این دوره همواره بیش از ۹۲ درصد بود. در روز ۱۱۰ (سیکل ۴۴۱) میانگین اندازه گرانول‌ها به بیشترین مقدار خود یعنی ۱۳ میلی‌متر رسید. در تحقیق رضایی



شکل ۹. روند تغییر لجن اولیه و تشکیل گرانول‌ها

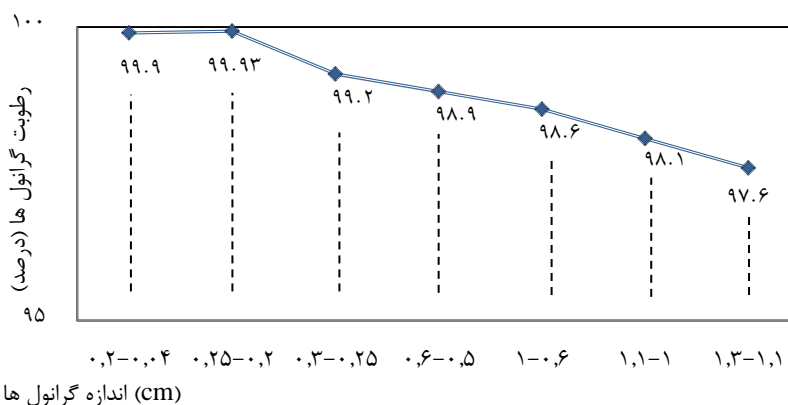
حاوی ۱ لیتر آب معمولی استفاده شد؛ به این صورت که تعدادی گرانول به ترتیب درون استوانه رها شد و مدت زمان متوسط - که طول مشخصی را باید طی کند - اندازه‌گیری شد [۴ و ۲۰]. در سیکل ۲۱، میانگین سرعت سقوط گرانول‌ها در سیستم ۰/۳۵ سانتی‌متر در ثانیه بود. با توجه به شکل ۱۱، به تدریج با رشد گرانول‌ها، سرعت سقوط گرانول‌ها سیر صعودی داشت، به گونه‌ای که در روز ۷۶ (سیکل ۳۰۴) به بیشترین مقدار خود یعنی ۳/۳۲ سانتی‌متر در ثانیه رسید و تا انتهای روز ۱۲۰ در همین حدود باقی ماند.

۷.۳. رطوبت گرانول‌ها

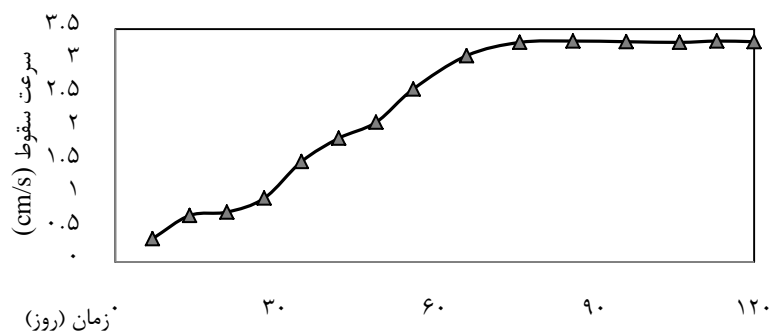
به منظور رسم شکل رطوبت، بازه اندازه گرانول‌ها با توجه به فراوانی آن‌ها در هفت گروه (۰/۲ - ۰/۴)، (۰/۴ - ۰/۶)، (۰/۶ - ۰/۸)، (۰/۸ - ۰/۱۰)، (۰/۱۰ - ۰/۱۲)، (۰/۱۲ - ۰/۱۴) و (۰/۱۴ - ۰/۱۶) (۱/۳ - ۱) تعریف شد. به طور کلی، با سازگاری میکروارگانیسم‌ها با شرایط جدید و افزایش چگالی گرانول‌ها، شکل رطوبت روندی نزولی داشته و در روزهای پایانی به کمترین مقدار خود یعنی ۹۷/۶ رسید. نتایج در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.

۸.۳. سرعت سقوط گرانول‌ها

به منظور تعیین سرعت سقوط آزاد گرانول‌ها از استوانه مدرج



شکل ۱۰. درصد رطوبت گرانول‌ها



شکل ۱۱. محدوده سرعت سقوط گرانول‌ها

شد. در شکل ۱۲، انواع باکتری‌های رشته‌ای به‌عنوان اسکلت^۱ و باکتری‌های لخته‌ای و کوکسی به‌طور غالب و در نهایت فلاژل‌ها، روتیفرها و پروتوزواها به‌صورت ذرات پراکنده مشاهده شد.

۹.۳. تصاویر میکروسکوپی گرانول‌ها

نوع منبع کربن مورد استفاده، سبب ایجاد تفاوت در تنوع و گونه غالب باکتری‌ها، سطح گرانول‌ها و ساختار آن‌ها می‌شود [۲۱]. به‌منظور بررسی مورفولوژی گرانول‌های هوازی تولید شده در سیستم، از تصاویر تهیه‌شده از میکروسکوپ استفاده



شکل ۱۲. تصاویر میکروسکوپی باکتری‌های موجود در لجن گرانوله

راه‌اندازی سامانه تشکیل شدند. بیوگرانول‌ها، بسیار بزرگ (۵-۱۳ میلی‌متر) و کروی بود و میزان گرانول‌سازی همواره بیش از ۹۲ درصد بود. کمترین مقدار رطوبت موجود در بیوگرانول‌ها ۹۷/۶ درصد بود و سرعت ته‌نشینی آن‌ها تقریباً ۳/۳۲ سانتی‌متر در ثانیه باقی ماند. به‌طور کلی، نتایج نشان داد گرانوله‌شدن سبب بهبود مشخصات سیستم تصفیه می‌شود و با افزایش بار آلی ورودی به سامانه، بر اندازه گرانول‌ها افزوده می‌شود، در نتیجه راندمان حذف نیز افزایش می‌یابد.

۴. جمع‌بندی

در این تحقیق، قابلیت سیستم اس بی آ آر در مقیاس آزمایشگاهی در حذف هیدروکربن‌های نفتی با استفاده از بیوگرانول‌های هوازی بررسی شد. راندمان حذف این آلاینده با استفاده از سامانه اس بی آ آر در سی او دی برابر ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، در زمان ماند شش ساعت معادل ۹۵/۶ درصد به‌دست آمد که نشان‌دهنده قابلیت بالای این سامانه در حذف این آلاینده است. اولین گرانول‌های هوازی پنج روز پس از

مراجع

- [1]. Diya'uddeen, B., H., Rahim Pourn, Sh., Abdul Aziz, A.R., Nashwan, S.M., Ashri W., Daud, W. and Shaaban, M.G. (2014). Hybrid of Fenton and sequencing batch reactor for petroleum refinery wastewater treatment", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 153, 25-35.
- [2]. Jasmine, J., Mukherji, S. (2015). "Characterization of oily sludge from a refinery and biodegradability assessment using various hydrocarbon degrading strains and reconstituted consortia", Journal of Environmental Management, 149, 118-125.

- [3]. Ni, B. J. (2013), "Formation, characterization and mathematical modeling of the aerobic granular sludge", Springer Theses, 131, 1-25.
- [4]. Rosman, N., Anuar, A., N., Chelliapan, Sh., Fadhil, Md., D., M., Ujang, Z. (2014), "Characteristics and performance of aerobic granular sludge treating rubber wastewater at different hydraulic retention time", *Journal of Bioresource Technology*, 161, 155-161.
- [5]. Verawaty, M., Tait, S., Pijuan, M., Yuan, Z., Bond, P. (2013), "Breakage and growth towards a stable aerobic granule size during the treatment of wastewater", *Journal of water research*, 47, 5338-5349.
- [6]. Long, B., Yang, Ch., Pu, W., Yang, J., Liu, F., Zhang, L., Zhang, J., Cheng, K. (2015), "Tolerance to organic loading rate by aerobic granular sludge in a cyclic aerobic granular reactor", *Journal of Bioresource Technology*, 182 (2015) 314-322.
- [7]. Thanh, B., X. (2005), "Aerobic granulation coupled membrane bioreactor", M.Sc. Thesis, Chemistry and Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology, Thailand.
- [8]. Luo, J., Hao, T., Wei, L., Mackey, H., R., Lin, Z., Chen, G. (2014), "Impact of influent COD/N ratio on disintegration of aerobic granular sludge", *Journal of water research*, 62, 127-135.
- [9]. Di Bella, G., Torregrossa, M. (2013). "Simultaneous nitrogen and organic carbon removal in aerobic granular sludge reactors operated with high dissolved oxygen concentration", *Journal of Bioresource Technology*, 142, 706-713.
- [10]. Moghaddam, S., S., Moghaddam, M., R., A. (2015), "Cultivation of aerobic granules under different pre-anaerobic reaction times in sequencing batch reactors", *Journal of Separation and Purification Technology*, 142, 149-154.
- [11]. Li, Y., Zou, J., Zhang, L. Sun, J. (2014). "Aerobic granular sludge for simultaneous accumulation of mineral phosphorus and removal of nitrogen via nitrite in wastewater", *Journal of Bioresource Technology*, 154, 178-184.
- [12]. Long, B., Yang, C. Z., Pu, W. H., Yang, J. K., Shi Y. F., Wang, J. (2014), "The stability of aerobic granular sludge treating municipal sludge deep dewatering filtrate in a bench scale sequencing batch reactor", *Bioresource Technology*, 169, 244-250.
- [13]. Wei, D., Shi, L., Yan, T., Zhang, G., Wang, Y., Du, B. (2014), "Aerobic granules formation and simultaneous nitrogen and phosphorus removal treating high strength ammonia wastewater in sequencing batch reactor", *Journal of Bioresource Technology*, 171, 211-216.
- [۱۴]. سیروس رضایی، ل. (۱۳۸۸). نقش پلیمر کیتوزان در گرانوله شدن در سیستم جی اس بی آر. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران و محیط زیست، تهران.
- [۱۵]. رضایی، م. (۱۳۹۲). بررسی قابلیت سیستم اس بی آر در حذف MTBE. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران و محیط زیست، تهران.
- [۱۶]. رحیمی، م. (۱۳۹۲). حذف هیدروکربن های نفتی از فاضلاب با استفاده از سامانه تلفیقی MBBR/UV. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- [17]. APHA, AWWA, WPCF. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and wastewater*, 20th ed. Washangton DC: American Public Health Association Press.
- [18]. Lopez-Palau, S., Pinto, A., Basset, N., Dosta, J. and Mata-Alvarez, J. (2012), "ORP slope and feast-famine strategy as the basis of the control of a granular sequencing batch reactor treating winery wastewater", *Journal of Biochemical Engineering*, 68, 190-198.
- [19]. Wang, F., Yang, F.-L., Zhang, X.-W., Liu, Y.-H., Zhang, H.-M., Zhou, J., (2005). "Effects of cycle time on properties of aerobic granules in sequencing batch airlift reactors", *World Journal of Microbiol. Biotechnol.* 21, 1379-1384.
- [20]. Song, Y., Ishii, S., Rathnayake, L., Ito, T., Satoh H., Okabe, S. (2013), "Development and characterization of the partial nitrification aerobic granules in a sequencing batch airlift reactor", *Journal of Bioresource Technology*, 139, 285-291.
- [21]. Lee, D., Chen, Y., Show, K., Whiteley, C., G., Tay, J. (2010), "Advances in aerobic granule formation and granule stability in the course of storage and reactor operation", *Journal of Biotechnology Advances*, 28, 919-934.