

مقایسه عملکرد راکتورهای بیوفیلیمی با بستر متحرک و لجن فعال تلفیقی با رشد چسبیده جهت حذف کربن و مواد مغذی از فاضلاب شهرک‌های صنعتی

آذر اسدی^۱ علی فیوضی^۲

۱. دانشیار (نویسنده مسئول)، گروه شیمی کاربردی، دانشکده نفت و گاز گچساران، دانشگاه یاسوج، کهگیلویه و بویر احمد، ایران
azarasadi_88@yahoo.com

۲. دانشجوی کارشناسی، گروه شیمی کاربردی، دانشکده نفت و گاز گچساران، دانشگاه یاسوج، کهگیلویه و بویر احمد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹

چکیده:

از آنجایی که تصفیه فاضلاب جهت حفاظت از محیط‌زیست، هدفی اصلی و امری حیاتی به شمار می‌رود در این مطالعه، بازده تصفیه فاضلاب شهرک‌های صنعتی فرمان واقع در استان کرمانشاه در دو بیوراکتور راهبری شده در شرایط یکسان مقایسه شده‌است. راکتورهای زیستی مورد مطالعه شامل راکتور بیوفیلیمی با بستر متحرک (MBBR) و لجن فعال تلفیقی با رشد چسبیده (IFAS) می‌باشد. عملکرد این دو سیستم با بررسی سه پارامتر عملکردی شامل زمان ماند هیدرولیکی (HRT)، شدت جریان هوادهی (AFR) و درصد پرشدگی (FR) جهت حذف محتوای کربن و نیتروژن از فاضلاب مذکور مقایسه شد. با استفاده از نرم‌افزار Design Expert، ۲۰ شرایط آزمایشی مختلف طراحی شد و هفت پاسخ مورد مطالعه قرار گرفت که شامل جمعیت میکروارگانیسم‌های چسبیده به حامل‌ها، حذف محتوای کربنی، کدورت خروجی و حذف نیتروژن که خود شامل حذف نیتريت و نیترات می‌باشد. طبق نتایج بدست آمده علیرغم اینکه رشد میکروارگانیسم‌های چسبیده در سیستم MBBR بالاتر بوده است اما سیستم IFAS توانایی بالاتری را در حذف محتوای کربنی و نیتروژن در کلیه شرایط راهبری از خود نشان داد. همچنین کدورت سیستم IFAS نیز کمتر از MBBR گزارش شد. در واقع نتایج بدست آمده بیانگر اثر مثبت تلفیق میکروارگانیسم‌های معلق و چسبیده بر راندمان تصفیه سیستم‌های بیولوژیکی می‌باشد.

Comparison of the performance of moving bed bioreactor (MBBR) and integrated fixed-film activated sludge (IFAS) for CNP removal from Faraman industrial estate wastewater

پست الکترونیکی	نام English	وابستگی سازمانی English
azarasadi_88@yahoo.com	Asadi, Azar	Department of Applied Chemistry, Faculty of Gas and Petroleum, Yasouj University, Gachsaran 75918-74831, Iran.
alifiuzi9118@gmail.com	Fuzi, Ali	2. Undergraduate Student, Department of applied chemistry, Faculty of Gas and Petroleum, Yasouj University, Gachsaran 75918-74831, Iran.

Received: 15/03/2025

Revised: 28/07/2025

Accepted: 20/08/2025

Abstract:

Since wastewater treatment is a primary and vital goal for environmental protection, this study compares the wastewater treatment of Faraman industrial parks located in Kermanshah province in two bioreactors operated under identical conditions. The bioreactors studied include a moving bed biofilm reactor (MBBR) and an integrated fixed-film activated sludge (IFAS) reactor. The performance of these two systems was compared by examining three operational parameters, including hydraulic retention time (HRT), aeration flow rate (AFR), and filling ratio (FR), for the removal of carbon and nitrogen content from the wastewater. Using Design Expert 20 software, various experimental conditions were designed, and seven responses were studied, including the population of microorganisms attached to the carriers, carbon content removal, effluent turbidity, and nitrogen removal, which itself includes nitrite and nitrate removal. According to the results obtained, although the growth of attached microorganisms was higher in the MBBR system, the IFAS system demonstrated a higher ability to remove carbon and nitrogen content under all operating conditions. Also, the turbidity of the IFAS system was reported to be lower than that of the MBBR. In fact, the results obtained indicate the positive effect of integrating suspended and attached microorganisms on the treatment efficiency of biological systems.

Keywords: Moving Bed Biofilm Reactor, Integrated Fixed-film Activated Sludge, Industrial wastewater, Hydraulic Retention Time, Air Flow Rate.

افزایش جمعیت و توسعه صنعت علاوه بر اینکه مشکلات موجود در زمینه تأمین آب را به مراحل بحرانی رسانده، موجب آلودگی پساب‌های خانگی، صنعتی، کشاورزی و آب‌های سطحی موجود نیز گردیده و علاوه بر خسارت‌های زیست‌محیطی، منابع آبی موجود را نیز غیرقابل استفاده نموده‌است (چوپان و امامی، ۱۳۹۹). بنابراین، تصفیه فاضلاب که هدف اصلی آن حفاظت محیط‌زیست و منابع آب می‌باشد، ضروری به‌نظر می‌رسد. محتوای کربن آلی و مواد مغذی (نیترژن و فسفر) به‌عنوان آلاینده‌های مهم فاضلاب‌های صنعتی و شهری شناخته می‌شوند که برای دستیابی به استانداردهای تخلیه پساب، لازم است بطور مؤثر حذف شوند (هاشم زاده و اکبر زاده، ۱۴۰۱) (Gao et al., 2023; Mirghorayshi et al., 2018). تصفیه فاضلاب صنعتی در طول سال‌ها با رویکردهای مختلفی مانند فیلتراسیون غشایی (Jalali et al., 2023; Zhang et al., 2021)، جذب (Prasanna, 2022)؛ (Waqas et al., 2020)، اکسیداسیون پیشرفته (Dolatshah et al., 2023; Li et al., 2021; Liu et al., 2021) و فرآیندهای بیولوژیکی (Asadi et al., 2013; Huang et al., 2023) انجام شده‌است. عملیات آسان و هزینه اقتصادی فرآیندهای بیولوژیکی همراه با کارایی رضایت‌بخش آنها، به گسترش آنها در صنایع منجر شده‌است (اسدی و همکاران، ۱۴۰۰). امروزه فرآیندهای نوین تصفیه بیولوژیکی فاضلاب به ویژه فرآیندهایی از نوع رشد تلفیقی (ترکیب رشد معلق و رشد چسبیده) نظیر فرآیند بیوفیلمی با رشد چسبیده (MBBR) و فرآیند لجن فعال با رشد تلفیقی (IFAS) به‌صورت روز افزونی برای ساخت تصفیه‌خانه‌های جدید و ارتقای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب موجود مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سیستم‌های رشد چسبیده، در طول سال‌ها به دلیل غلبه بر بعضی از محدودیت‌های سیستم‌های لجن فعال مانند حجم بزرگ راکتور و بازیابی لجن توسعه یافته‌اند.

MBBR یک سیستم رشد چسبیده است که برای تصفیه فاضلاب‌های بسیار آلوده به‌دلیل طراحی فشرده، عملیات آسان و بی‌نیاز از بازگشت لجن کارآمد است. بیوفیلیم تشکیل شده بر روی حامل‌های معلق شامل لایه‌های داخلی آنوکسیک/بی‌هوازی و لایه‌های خارجی هوازی است. بنابراین، MBBR مستعد حذف همزمان نیترژن و همچنین محتوای کربن می‌باشد. در پژوهشی که در سال ۲۰۰۶ انجام شد، سیستم MBBR برای حذف نیترژن از فاضلاب صنایع لبنیات سازی در درجه حرارت پایین مورد استفاده قرار گرفت و طبق داده‌های بدست آمده سیستم MBBR قادر به حذف ۶۰-۵۰٪ نیترژن و ۴۰-۷۰٪ اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی (COD) و انجام نیتریفیکاسیون به طور کامل می‌باشد (Luostarinen et al., 2006). از طرفی IFAS، نیز به دلیل داشتن زیست‌توده‌های معلق و متصل و ویژگی‌های منحصر به فرد خود، گزینه مناسبی برای تصفیه انواع فاضلاب‌ها به ویژه فاضلاب‌های صنعتی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به طراحی ساده، کم بودن هزینه عملیاتی، کاهش حجم لجن تولیدی، پساب خروجی شفاف، راندمان بالای حذف نیترژن و فسفر از فاضلاب، زمان ماند هیدرولیکی کم، زمان ماند زیاد برای لجن و مقاومت نسبی به شوک‌های آلی و هیدرولیکی اشاره نمود.

در یک مطالعه، ویولیت و همکارانش (Veuillet et al., 2014) آب دفعی از یک دستگاه هضم‌کننده لجن بی‌هوازی مزوفیلیک را با استفاده از بیوراکتورهای IFAS تصفیه کردند. دو سیستم IFAS با فاضلاب غنی از آمونیوم (90.7 ± 20.0 میلی‌گرم بر لیتر) خوراک‌دهی شدند که حذف آمونیوم و نیترژن از سیستم‌های IFAS به ترتیب ۹۵٪ و ۹۰٪ بود. در یک کار دیگر، ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2015) عملکرد دو سیستم

IFAS مقیاس کامل و پایلوت جهت تصفیه پساب خروجی از واحد آبکشی لجن مقایسه کرد. سیستم‌های IFAS پایلوت و مقیاس کامل به ترتیب ۸۰٪ و ۸۵٪ حذف نیتروژن را در نرخ‌های بارگذاری آمونیوم ۰/۴۸ کیلوگرم نیتروژن بر مترمکعب در روز و ۱/۳-۰/۷ کیلوگرم نیتروژن بر مترمکعب در روز حفظ کردند. در پژوهش دیگری که تیم تحقیقاتی مذکور گزارش کرده بود (Huang et al., 2017) حذف مواد آلی مقاوم در سیستم‌های IFAS، MBBR و بیوراکتور غشایی (MBR) جهت تصفیه آب‌های تحت تأثیر فرآیند شن و ماسه نفتی در شرایط یکسان راهبری شدند. بر اساس داده‌های گزارش شده، بازده حذف COD به ترتیب ۶۴/۴۲٪، ۵۸/۲٪ و ۵۳/۶٪ برای IFAS، MBBR و MBR گزارش شد که نشان‌دهنده توانمندی بالاتر سیستم ترکیبی در مقایسه با سیستم‌های معلق و چسبیده به‌تنهایی است (Hou et al., 2022).

بطور کلی، سیستم لجن فعال با رشد چسبیده روشی کارآمد برای ارتقاء تصفیه‌خانه‌های فاضلاب موجود محسوب می‌شود. در تحقیقات پیشین این گروه پژوهشی، دو سیستم IFAS و MBBR را در شرایط یکسان جهت حذف کربن و نیتروژن از فاضلاب واقعی یک شهرک صنعتی در استان کرمانشاه، مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. در این مطالعات، زمان ماند هیدرولیکی (HRT)^۴، نسبت پرشدگی (FR) و شدت جریان هوادهی (AFR) به‌عنوان متغیرهای مورد بررسی در سه سطح مختلف، ارزیابی شده‌اند (Dolatshah et al., 2024; Jalali et al., 2023).

در مقاله حاضر، هدف اصلی بررسی و مقایسه عملکرد دو سیستم IFAS و MBBR در حذف کربن و نیتروژن از فاضلاب صنعتی است. این تحلیل بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از یک طرح پژوهشی انجام شده توسط همین گروه تحقیقاتی صورت می‌گیرد و به منظور تبیین تفاوت‌های اساسی بین این دو سیستم در حذف آلاینده‌ها ارائه می‌شود.

مقایسه عملکرد دو سیستم IFAS و MBBR در حذف کربن و نیتروژن، با در نظر گرفتن چندین پاسخ عملکردی سیستم بیولوژیکی، شامل حذف COD، حذف نیتروژن، میزان نیترات و نیتريت خروجی و کدورت خروجی انجام شده است. این بررسی جامع، دیدگاهی روشن‌تر نسبت به نقاط قوت و ضعف هر یک از این سیستم‌ها در تصفیه فاضلاب صنعتی ارائه می‌دهد. شایان ذکر است که مطالعات پیشین مانند گزارش هوانگ و همکاران، عمدتاً بر مقایسه عملکرد این دو سیستم در حذف کربن متمرکز بوده‌اند. در مقابل این مقاله با ارائه اطلاعات گسترده‌تری به پیمایش و مقایسه عملکرد هر دو سیستم در حذف همزمان کربن و نیتروژن می‌پردازد. این رویکرد جامع‌تر، امکان درک بهتری از کارایی و کاربردپذیری هر یک از این سیستم‌ها در شرایط مختلف فاضلاب صنعتی را فراهم می‌سازد و می‌تواند به انتخاب بهینه سیستم تصفیه متناسب با نیازهای خاص صنایع کمک کند.

۲) مواد و روش‌ها:

۲-۱) ویژگی‌های فاضلاب شهرک صنعتی:

فاضلاب از ورودی پساب شهرک صنعتی تأمین شد. فاضلاب هر سه روز یکبار به آزمایشگاه منتقل شده و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در یخچال ذخیره می‌شد تا از هرگونه تغییر قابل مشاهده در ترکیب آن جلوگیری شود. مقادیر پارامترهای اصلی فاضلاب شامل ۱۰۱۴ میلی‌گرم بر لیتر از

COD، ۵۱۵ میلی‌گرم بر لیتر از اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی (BOD_5)، ۱۸۸ میلی‌گرم بر لیتر از نیتروژن آمونیاکی، ۷ میلی‌گرم بر لیتر از نیتروژن حاصل از نترات، ۱۹۷ میلی‌گرم بر لیتر از کل نیتروژن موجود، ۳ میلی‌گرم بر لیتر از فسفر کل و دامنه pH بین ۶/۵ تا ۷/۵ می‌باشد.

۲-۲) پیکربندی بیوراکتورها:

تصاویر آزمایشگاهی سیستم‌های راهبری شده در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند. بیوراکتور MBBR، از یک ستون پلاستیکی شفاف ساخته شده است که قطر داخلی، ارتفاع و حجم کل آن به ترتیب ۱۳ سانتی‌متر، ۷۰ سانتی‌متر و ۹/۳ لیتر است. حجم کاری بر روی ۲/۲ لیتر با ارتفاع ۱۶/۹ سانتی‌متر تنظیم شد. همچنین از یک مخزن ته‌نشینی بدون بازیافت لجن استفاده شد. بیوراکتور با حامل‌های (Kaldnes-3) ساخته شده از پلی‌اتیلن با چگالی بالا، پر شد. مساحت سطح خاص این نوع حامل ۵۰۰ مترمربع بر مترمکعب است (Jalali et al., 2023). بیوراکتور IFAS شامل یک ستون پلکسی‌گلاس با ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ۱۳ سانتی‌متر است. حجم کاری ۲/۲ لیتر با ارتفاع ۱۶/۹ سانتی‌متر حفظ شد. بیوراکتور بطور مداوم با یک پمپ پرستالتیک تغذیه شد. بیوراکتور با حامل‌های ساخته شده از پلی‌اتیلن با چگالی بالا (Kaldnes-3) با مساحت سطح ویژه ۵۰۰ مترمربع بر مترمکعب پر شد. هوادهی، اختلاط و گردش آزاد حامل‌های Kaldnes-3 در بیوراکتور با استفاده از یک هواده در انتهای ستون بیوراکتور تأمین شد. برای تنظیم نرخ جریان هوا، از جریان سنج گازی استفاده شد (Dolatshah et al., 2024).

۲-۳) تشکیل بیوفیلم بر روی حامل‌ها:

برای تشکیل لایه بیوفیلم بر روی حامل‌های استفاده شده، ابتدا حامل‌ها در محلول آگار غوطه‌ور شدند و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط خشک شدند. محلول آگار با حل کردن ۲ گرم آگار در ۱ لیتر آب مقطر تهیه شد. در مرحله بعد، حامل‌ها به ستون لجن فعال با غلظت مواد معلق مختلط (MLSS) 6000 mg/l به مدت ۲۴ ساعت منتقل شدند. به منظور توسعه بیوفیلم بر روی سطوح حامل‌ها، آنها جدا شده و در یک ستون دیگر که با محلول شیر تحت شرایط هوادهی به مدت ۳ هفته تغذیه می‌شد، تخلیه شدند. زمان چرخه به حالت منقطع به مدت ۲۴ ساعت تنظیم شد. پس از تشکیل بیوفیلم بر روی حامل‌ها، به منظور سازگار شدن جمعیت میکروبی رشد کرده با پساب شهرک صنعتی، سیستم به مدت دو هفته با مخلوطی از شیر و پساب شهرک صنعتی تغذیه شد بطوری که در ابتدا نسبت شیر به فاضلاب شهرک صنعتی ۳/۴ بود و سپس نسبت فوق‌الذکر در فواصل چهار روزه به ۱/۲، ۱/۴ و در نهایت صفر کاهش یافت. نهایتاً پس از دو هفته، سیستم تنها با فاضلاب شهرک صنعتی تأمین شد (Jalali et al., 2023).



(ب)



(الف)

شکل ۱. تصاویر بیوراکتورهای الف) (MBBR (Jalali et al., 2023) ، ب) IFAS (Dolatshah et al., 2024)

۲-۴) راهبری بیوراکتورها و طراحی آزمایش:

پس از راه‌اندازی، بیوراکتورها بطور مداوم با فاضلاب شهرک صنعتی از طریق یک پمپ پریستالتیک تغذیه شدند. بیوراکتورها در دمای اتاق (25 ± 2 C) راه‌اندازی شد و با یک پمپ هوا، هوادهی شد. هوادهی عامل حرکت آزادانه حامل‌ها در بیوراکتور شد. سه متغیر مستقل شامل زمان ماند هیدرولیکی (HRT)، شدت جریان هوادهی (AFR) و نسبت پرشدگی (FR) در سه سطح بررسی شد. هر دو بیوراکتور در ابتدا با FR ۵۰٪ راهبری شدند. در ضمن، بیوراکتور IFAS با MLSS معادل ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر راه‌اندازی شد و در طی آزمایشات با تخلیه لجن اضافی بر روی ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تنظیم شد.

بیوراکتورها با استفاده از یک پمپ پریستالتیک تحت رژیم هوادهی مداوم، به مدت دو هفته با فاضلاب شهرک صنعتی خوراک‌دهی شدند. در ابتدای راهبری بیوراکتورها، AFR و HRT به ترتیب بر روی ۲ لیتر بر دقیقه و ۱۰ ساعت تنظیم شدند. پس از دستیابی به شرایط پایدار، بیوراکتورها طبق شرایط آزمایشی طراحی شده بر اساس سه متغیر عملیاتی مستقل شامل HRT (۱۵، ۱۰، ۵ ساعت)، AFR (۴، ۲/۵، ۱ لیتر بر دقیقه) و FR (۷۰، ۵۰، ۳۰ درصد) راهبری شدند. در مدت دو هفته ذکرشده کلیه تست‌های عملکردی بیوراکتورها اندازه‌گیری شدند و پس از مشاهده ثابت ماندن پارامترهای عملکردی در خروجی سیستم‌ها، شرایط پایدار سیستم‌ها محرز شد.

۵-۲) طراحی شرایط آزمایشی و تحلیل آماری:

نرم افزار Design Expert (DOE، نسخه 11.0) برای طراحی شرایط آزمایشی و تجزیه و تحلیل داده‌ها به صورت آماری استفاده شد. سه متغیر مستقل شامل AFR، HRT و FR در سه سطح براساس طراحی ترکیب مرکزی $(2k+(2k+1)+5)$ انتخاب شدند. عملکرد فرآیند بیوراکتور با اندازه‌گیری هفت پارامتر مختلف در طول ۲۰ شرایط آزمایشگاهی مختلف شامل: حذف COD، حذف BOD، حذف کل نیتروژن (TN)، غلظت‌های نیترات و نیتريت در خروجی، شاخص حجم لجن (SVI) و کدورت خروجی، تعیین شد که در جدول ۱ شرایط مختلف راهبردی نشان داده شده است. همبستگی پاسخ‌ها با متغیرهای عملیاتی از طریق مدل‌های چند جمله‌ای به شرح فرمول ۱ نمایش داده می‌شود:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k (a_i x_i) + \sum_{i=1}^k (a_{ii} x_i^2) + \sum_{i \neq j}^n (a_{ij} x_i x_j) + \varepsilon \quad (1)$$

که در آن Y نشان‌دهنده پاسخ پیش‌بینی شده است، و x_i و x_j به‌عنوان متغیرهای مستقل در سطوح کد گذاری شده شناخته می‌شوند. ضرایب رگرسیون برای اثرات خطی، درجه دوم و تعاملات به ترتیب با a_i ، a_{ii} و a_{ij} مشخص می‌شوند. a_0 ضریب ثابت است، n به تعداد متغیرهای عملیاتی اختصاص داده شده و ε خطای مدل را نشان می‌دهد.

همچنین جهت بررسی و تحلیل آماری داده‌های حذف COD، حذف TN، کدورت خروجی در شرایط آزمایشی مختلف از منظر معنی‌داری تفاوت داده‌ها از آزمون t تک‌نمونه‌ای آذر نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

جدول ۱. شرایط مختلف راهبردی بیوراکتورها

شرایط	زمان ماند (ساعت)	نسبت پرشدگی (%)	شدت جریان هوادهی (لیتر بر دقیقه)
۱	۵	۳۰	۱
۲	۵	۳۰	۴
۳	۱۰	۳۰	۲/۵
۴	۱۵	۳۰	۱
۵	۱۵	۳۰	۴
۶	۵	۵۰	۲/۵
۷	۱۰	۵۰	۱
۸	۱۰	۵۰	۲/۵
۹	۱۰	۵۰	۴
۱۰	۱۵	۵۰	۲/۵
۱۱	۵	۷۰	۱
۱۲	۵	۷۰	۴
۱۳	۱۰	۷۰	۲/۵
۱۴	۱۵	۷۰	۱
۱۵	۱۵	۷۰	۴

۲/۵	۵۰	۱۰	۱۶
۲/۵	۵۰	۱۰	۱۷
۲/۵	۵۰	۱۰	۱۸
۲/۵	۵۰	۱۰	۱۹
۲/۵	۵۰	۱۰	۲۰

۲-۶) روش‌های اندازه‌گیری آزمایشگاهی:

مقادیر COD، BOD، TN، نیترات، نیتريت و نیتروژن آمونیاکی (NH₄-N) در ورودی و خروجی بیوراکتور با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد (Rice et al., 2012). برای اندازه‌گیری محتوای COD، روش بسته ریفلاکس با روش رنگ سنجی در ۶۰۰ نانومتر (600 nm) انجام شد. مقادیر N-NH₄ با استفاده از روش نسلر با رنگ‌سنجی در ۴۲۵ نانومتر (425 nm) اندازه‌گیری شد. جذب COD و N-NH₄ با استفاده از طیف‌سنج نور مرئی Jenway 6320D تعیین شد. غلظت N-NO₃ با استفاده از طیف‌سنج UV-Vis Agilent 8453 در ۲۲۰ و ۲۷۵ نانومتر اندازه‌گیری شد.

میزان جذب N-NO₂ با طیف‌سنج UV-Vis (JENWAY 6320D) در ۵۴۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. دستگاه اندازه‌گیری کدورت مدل (USA)، HachCo. 2100P برای اندازه‌گیری کدورت و نرخ جریان هوادهی توسط روماترگازی اندازه‌گیری شد. جهت تعیین غلظت زیست‌توده چسبیده، یک حامل بطور تصادفی از بیوراکتور انتخاب شده و به مدت ۱ ساعت در دمای ثابت ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرارگرفت، سپس بعد از رسیدن به دمای محیط وزن شد. در مرحله بعد، حامل کاملاً شسته شد و پس از آن مراحل ذکر شده برای یک حامل تمیز تکرار شد. غلظت زیست‌توده چسبیده با توجه به معادله (۲) محاسبه شد (Zinatizadeh & Ghaytooli, 2015).

$$\frac{mg}{l} = \left(\frac{A - B}{V} \times C \right) \times 1000 \quad (2)$$

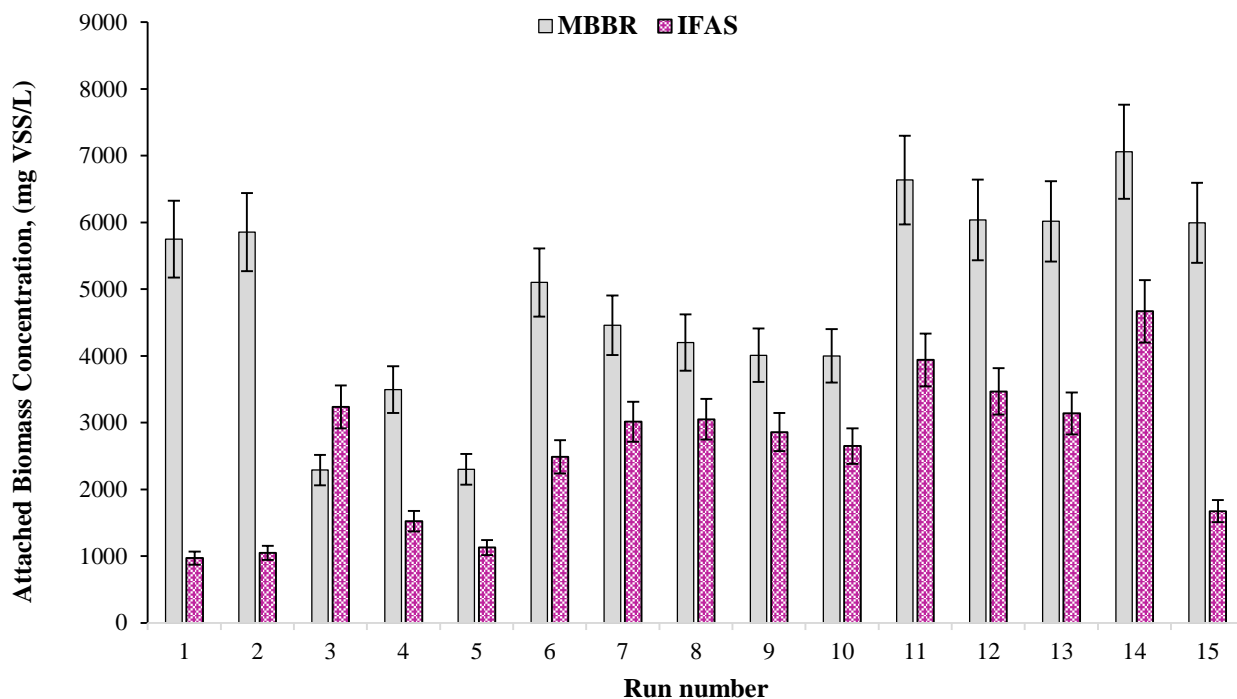
که در آن A، B، C و V به ترتیب وزن حامل با بیوفیلم چسبیده به آن (g)، وزن حامل تمیز (g)، تعداد حامل‌ها در بیوراکتور و حجم بیوراکتور (L) بودند. به منظور گزارش زیست‌توده چسبیده برای هر شرایط آزمایشی، مقدار میانگین اندازه‌گیری ۱۰ روزه گزارش شد. هر شرایط آزمایشی طراحی شده به مدت ۱۰ روز ادامه یافت و سپس مقادیر جمع‌آوری شده به طور میانگین محاسبه و به عنوان داده‌های به‌دست آمده برای هر پارامتر گزارش شد.

۳) نتایج و بحث:

۳-۱) جمعیت میکروارگانیسم‌های چسبیده به حامل‌ها

جمعیت میکروارگانیسم‌های چسبیده به حامل‌ها در شرایط مختلف راهبری برای هر دو سیستم MBBR و IFAS در شکل ۲ به خوبی به تصویر کشیده شده‌است. برطبق داده‌های بدست‌آمده غلظت میکروارگانیسم‌های چسبیده برای سیستم MBBR در اکثر شرایط بالاتر از سیستم IFAS می‌باشد که درواقع گویای غلبه دسترسی به منابع غذایی میکروارگانیسم‌های معلق در مقایسه با چسبیده را در سیستم IFAS می‌باشد. با افزایش میزان FR، جمعیت میکروارگانیسم‌های چسبیده در هر دو سیستم به دلیل افزایش سطح، جهت رشد میکروارگانیسم‌ها افزایش می‌یابد. از طرفی در مقادیر کمتر

از FR، با کاهش میزان HRT و بالارفتن نسبت غذا به میکروارگانیسم، رشد چسبیده میکروارگانیسم‌ها پیشرفت چشمگیری را نشان می‌دهد که این موضوع را در کاهش جمعیت میکروارگانیسم‌ها از شرایط ۱ و ۲ با کمترین HRT به شرایط ۴ و ۵ با بیشترین مقدار HRT می‌توان مشاهده نمود.



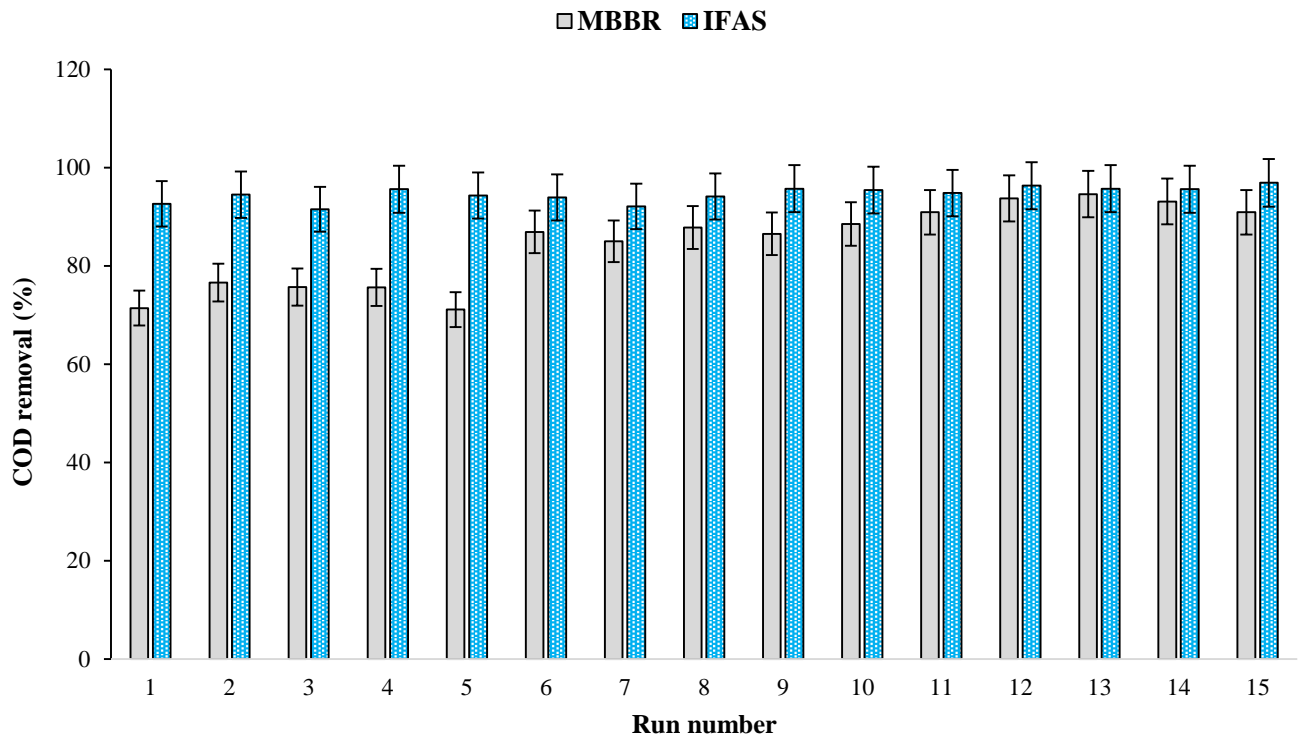
شکل ۲: غلظت میکروارگانیسم‌های چسبیده در دو سیستم IFAS و MBBR در شرایط مختلف راهبری ذکر شده در جدول ۱.

۲-۳ حذف محتوای کربنی

یکی از پارامترهای مهم در سنجش عملکرد بیوراکتورهای تصفیه فاضلاب میزان حذف COD از فاضلاب است که مربوط به حذف محتوای کربنی فاضلاب می‌باشد. به این منظور، حذف COD در بیوراکتورهای IFAS و MBBR در شرایط مختلف راهبری پیمایش شد که در شکل ۳ قابل مشاهده است. طبق نتایج نمایش داده شده در شکل ۳، سیستم IFAS در شرایط مختلف راهبری، راندمان حذف COD بالاتری را نسبت به MBBR دارد که بر پتانسیل بالاتر سیستم‌های تلفیقی معلق و چسبیده نسبت به سیستم‌های صرفاً رشد چسبیده تاکید می‌کند. در واقع، حضور میکروارگانیسم‌ها به هر دو صورت معلق و چسبیده قابلیت بالاتری در دسترسی به محتوای کربنی فاضلاب و هضم آن دارد، به همین دلیل راندمان بین ۹۱٪ تا ۹۷٪ در سیستم IFAS و محدوده ۷۱٪ تا ۹۴٪ برای سیستم MBBR مشاهده می‌شود.

در سیستم MBBR، با افزایش میزان FR حذف COD بالاتر می‌رود که این امر به بالاتر بودن جمعیت میکروارگانیسم‌های چسبیده به عنوان تنها منبع بیولوژیکی سیستم MBBR مربوط می‌شود که در نمودار ۲ به وضوح دیده می‌شود. در کمترین میزان FR (شرایط راهبری ۱ تا ۵) به طور عمده میزان حذف COD زیر ۸۰٪ می‌باشد و می‌توان این چنین برداشت نمود که تغییرات HRT و AFR در حذف محتوای کربنی تاثیر چشمگیری را از

خود نشان نداده‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مهم‌ترین پارامتر در حذف محتوای کربنی در سیستم MBBR میزان FR می‌باشد، در حالیکه سیستم IFAS مستقل از تغییرات هر سه پارامتر راهبری، راندمان بالایی را در حذف COD از خود نشان می‌دهد.



شکل ۳: درصد حذف COD سیستم‌های در شرایط مختلف راهبری ذکر شده در جدول ۱.

۳-۳) کدورت خروجی

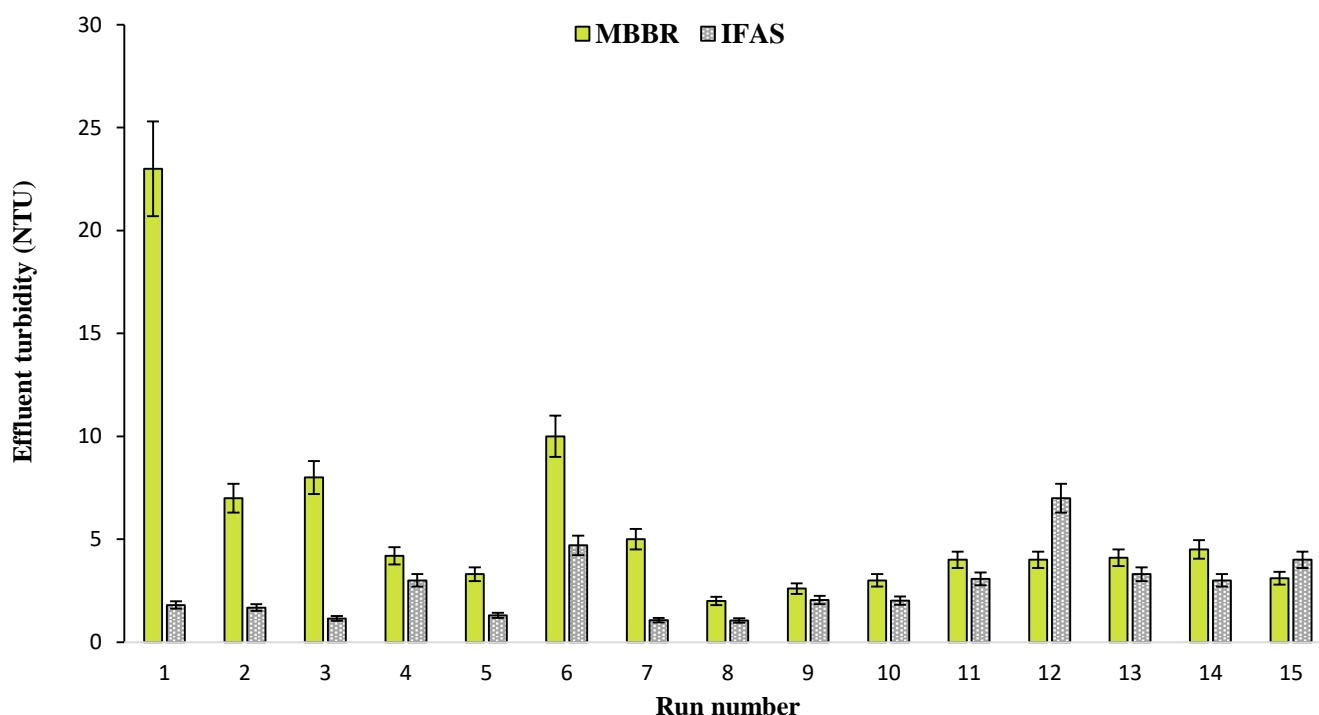
حذف کدورت فاضلاب تصفیه شده یکی از مهم‌ترین گام‌ها در روند تصفیه فاضلاب می‌باشد که با افزایش کیفیت فاضلاب تصفیه شده، ارتباط مستقیم دارد و علاوه بر جلوه ظاهری، نمایانگر کاهش بار آلودگی میکروبی نیز می‌باشد. به همین دلیل کدورت خروجی از هر دو سیستم در شرایط مختلف راهبری اندازه‌گیری شد و در شکل ۴ به صورت نمودار ستونی رسم شده‌اند. با توجه به نتایج بدست آمده در هر دو سیستم، میزان کدورت روند نوسانی دارد، اما نوسانات آن در روش IFAS کمتر بوده بطوری‌که در IFAS کدورت در کلیه شرایط زیر ۱۰ واحد^۱ NTU گزارش شده است که در کل می‌توان نتیجه گرفت عملکرد خوبی از لحاظ شفافیت خروجی از خود نشان داده است. اما همانطور که در شکل ۴ دیده می‌شود کدورت خروجی MBBR در محدوده ۳ تا ۲۳ واحد NTU می‌باشد. بالاترین مقدار کدورت خروجی در شرایط ۱ راهبری گزارش شده است که طبق جدول ۱ مربوط به مقادیر ۳۰ درصد، ۵ ساعت و ۱ لیتر بر دقیقه به ترتیب از متغیرهای FR، HRT و AFR می‌باشد. در واقع در این شرایط رشد میکروارگانیسم‌ها بر روی حامل‌ها به دلیل میزان بالای نسبت غذا به میکروارگانیسم در کمترین مقدار HRT می‌باشد که باعث رخ دادن پدیده ریزش خواهد شد و کدورت سیستم افزایش می‌یابد. از طرفی در کمترین میزان AFR نیز به لایه‌های درونی میکروارگانیسم‌های چسبیده، اکسیژن کافی نخواهد رسید که به نوبه خود پدیده ریزش را تسریع خواهد بخشید. روند کاهشی کدورت با افزایش AFR را در شرایط راهبری ۲ به خوبی می‌توان مشاهده نمود که با افزایش AFR از ۱ به ۴ میلی‌لیتر بر دقیقه (در HRT ثابت ۵ ساعت) میزان کدورت خروجی از ۲۳ به ۷ واحد NTU رسیده‌است. همچنین با

دقت در شرایط راهبری ۴ و ۵ می‌توان سیر نزولی کدورت با افزایش HRT را به خوبی مشاهده نمود، بطوری‌که در بالاترین مقدار HRT که ۱۵ ساعت می‌باشد میزان کدورت خروجی به شدت کاهش یافته‌است و اثر AFR به صورت ناچیزی مشاهده می‌شود. طبق نتایج ترسیم شده، کدورت خروجی از ۵ واحد NTU در شرایط ۴ با مقدار AFR، ۱ لیتر بر دقیقه به میزان ۴ واحد NTU در شرایط راهبری ۵ با میزان AFR، ۱ لیتر بر دقیقه رسیده است. به طور کلی طبق داده‌های بدست آمده کدورت خروجی سیستم MBBR در مقدار ۳۰ درصد از FR با شدت بیشتری تابعی از مقادیر HRT و AFR می‌باشد و با افزایش میزان FR از این حساسیت کاسته شده است. این نتیجه نشان دهنده این است که در FRهای بالاتر سیستم MBBR پایداری عملکردی بهتری را نشان می‌دهد.

۳-۴ حذف نیتروژن

در این مطالعه به منظور بررسی جامع حذف نیتروژن در هر دو سیستم مورد مطالعه مقادیر حذف کل نیتروژن، غلظت نیترات و نیتريت خروجی به ترتیب در نمودارهای ستونی ۵، ۶ و ۷ گزارش شده‌اند.

طبق شکل ۵، عملکرد IFAS جهت حذف کل نیتروژن در کلیه شرایط راهبری بالاتر از سیستم MBBR می‌باشد به طوری‌که بالاترین میزان حذف سیستم IFAS، ۸۰ درصد ولی بالاترین میزان حذف برای سیستم MBBR ۳۰ درصد می‌باشد. این تفاوت فاحش در میزان حذف نیتروژن به تعادل مناسبی بین فرآیندهای نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون در سیستم تلفیقی میکروارگانیسم‌های معلق و چسبیده اشاره دارد. در سیستم صرفاً چسبیده MBBR محدودیت‌هایی وجود دارد که مانع حذف بالای نیتروژن می‌شود از جمله، دسترسی محدود به منابع کربنی و اکسیژن در



شکل ۴: کدورت خروجی سیستم‌ها در شرایط مختلف راهبری ذکر شده در جدول ۱.

لایه‌های درونی رشد یافته بر روی حامل‌ها که در ادامه با توجه به داده‌های بدست آمده، این مهم تحقیق خواهد شد. میزان نیترات و نیتريت خروجی این سیستم‌ها که در نمودارهای ۶ و ۷ نمایش داده شده‌اند اطلاعات خوبی را در مورد پدیده نیتریفیکاسیون انعکاس می‌دهند. همانطور که

در نمودار ۶ دیده می‌شود، غلظت نیترات خروجی در سیستم IFAS در همه شرایط راهبری بیشتر از MBBR بوده است که حاکی از شرایط مساعد برای پدیده نیتریفیکاسیون می‌باشد. همانطور که می‌دانیم فرآیند نیتریفیکاسیون یک فرآیند هوازی است که توسط باکتری‌های اتوتروف انجام می‌شود، بنابراین مقدار اکسیژن بالا جهت انجام آن مورد نیاز است. در سیستم IFAS از آنجایی که هر دو جمعیت میکروبی چسبیده و معلق در سیستم وجود دارند سرعت هضم محتوای کربنی توسط باکتری‌های هتروتروف افزایش می‌یابد، در نتیجه پس از کاهش چشمگیر محتوای کربنی نوبت به باکتری‌های اتوتروف می‌رسد که در حضور اکسیژن کافی محتوای نیتروژن موجود را به نیترات تبدیل کنند.

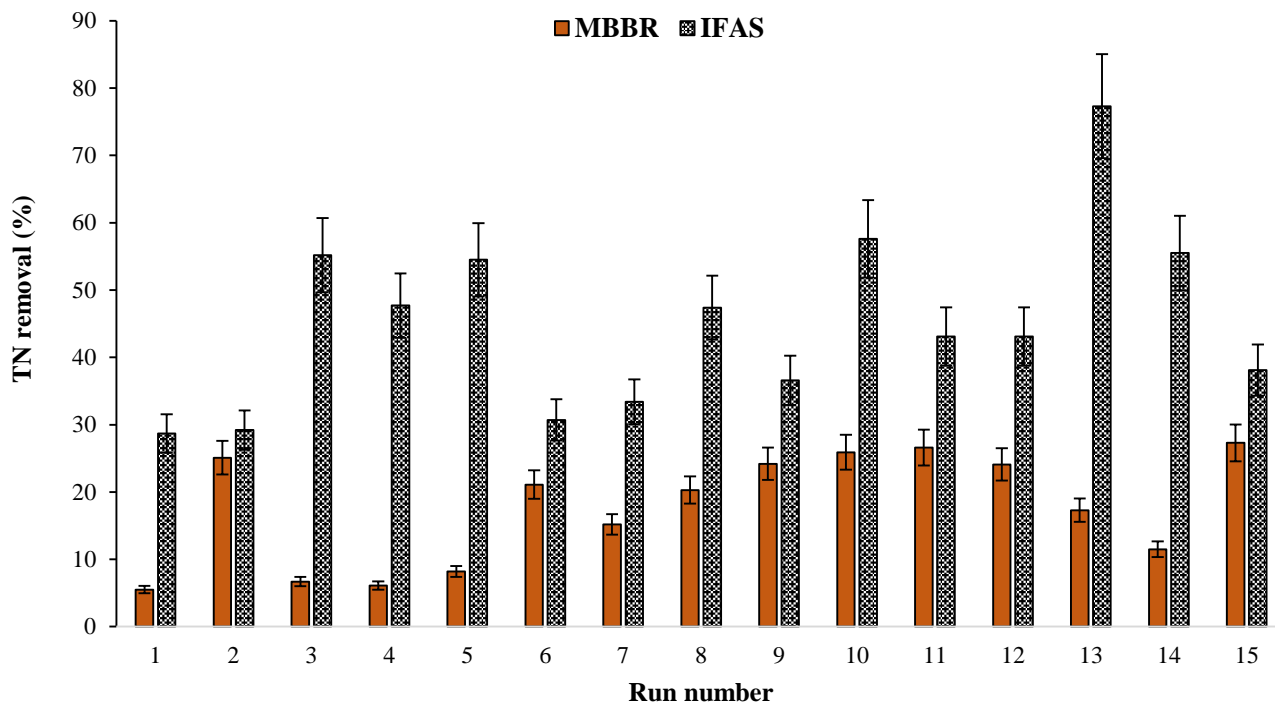
برخلاف سیستم IFAS، در سیستم MBBR نیترات کمتری در شرایط مختلف تولید شده است که نمایانگر نیتریفیکاسیون محدود شده می‌باشد. در واقع، در سیستم MBBR به دلیل محدودیت دسترسی میکروارگانیسم‌های چسبیده به محتوای کربنی نسبت به سیستم IFAS، سرعت کاهش محتوای کربنی کندتر است که داده‌های حذف COD به خوبی این نتیجه را متذکر می‌شوند. در نتیجه هضم کندتر محتوای کربنی توسط هتروتروف‌ها، فرصت کمتری به باکتری‌های اتوتروف جهت تولید نیترات می‌دهد. از طرفی داده‌های نیتريت خروجی نیز نیتریفیکاسیون محدود شده در سیستم MBBR را اثبات می‌کند به طوریکه میزان نیتريت در IFAS در تمام فرآیند کمتر از ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر و بیشترین آن ۹/۳۷ میلی‌گرم بر لیتر بوده اما در MBBR به ۳۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر و حتی به ۵۲/۸۳ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است. از آنجایی که نیتريت یک حد واسط در فرآیند نیتریفیکاسیون می‌باشد، حضور چشمگیر آن در خروجی MBBR بیانگر این مطلب است که نیتریفیکاسیون به صورت کامل انجام نشده است. یکی از دلایل نیتریفیکاسیون محدود شده، نفوذ اکسیژن کمتر به لایه‌های درونی میکروارگانیسم‌های چسبیده می‌باشد که منجر به عدم دسترسی جمعیت قابل توجهی از میکروارگانیسم‌ها به شرایط مناسب جهت تولید نیترات خواهد شد.

از طرفی بیشترین میزان حذف نیتروژن کل در سیستم IFAS، حدود ۸۰ درصد می‌باشد که در شرایط راهبری ۱۳ با مقادیر ۱۰ ساعت از HRT، ۲/۵ لیتر بر دقیقه از AFR و ۷۰ درصد از FR گزارش شده است. در همین شرایط میزان نیترات خروجی به کمتر از ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است که بیانگر تعادل مناسبی بین فرآیندهای نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون با تبدیل نیتروژن آلی به نیترات در فرآیند نیتریفیکاسیون و در ادامه تبدیل نیترات به گاز نیتروژن با فرآیند دنیتریفیکاسیون می‌باشد. در واقع در این شرایط با ۲/۵ لیتر بر دقیقه از AFR، نواحی آنوکسیک مناسبی در لایه‌های درونی میکروارگانیسم‌های چسبیده به حامل‌ها به وجود آمده است که در نتیجه آن نیترات به گاز نیتروژن تبدیل شده است.

جهت بررسی اثرات زمان ماند و نرخ هوادهی بر میزان حذف نیتروژن کل، شرایط‌های ۱۴ و ۱۵ را بررسی می‌کنیم. در شرایط شماره ۱۴ حذف نیتروژن کمتر شده است که به دلیل افزایش مقدار HRT به ۱۵ ساعت می‌باشد که باعث کم شدن نسبت غذا به میکروارگانیسم شده است و در نهایت کربن آلی لازم جهت انجام فرآیند دنیتروفیکاسیون تامین نشده است. روند کاهشی در شرایط ۱۵ بیشتر شده است، که در این شرایط علاوه بر ۱۵ ساعت از HRT عامل محدودکننده دیگری نیز اضافه شده است و آن افزایش AFR به میزان ۴ لیتر بر دقیقه می‌باشد. لازم به ذکر است که مقادیر بالای AFR، باعث محدود شدن احتمال حضور نواحی کوچک آنوکسیک در لایه‌های درونی میکروارگانیسم‌های چسبیده می‌شود. بنابراین، در سیستم IFAS با افزایش مقادیر HRT و AFR میزان حذف نیتروژن کل کاهش می‌یابد.

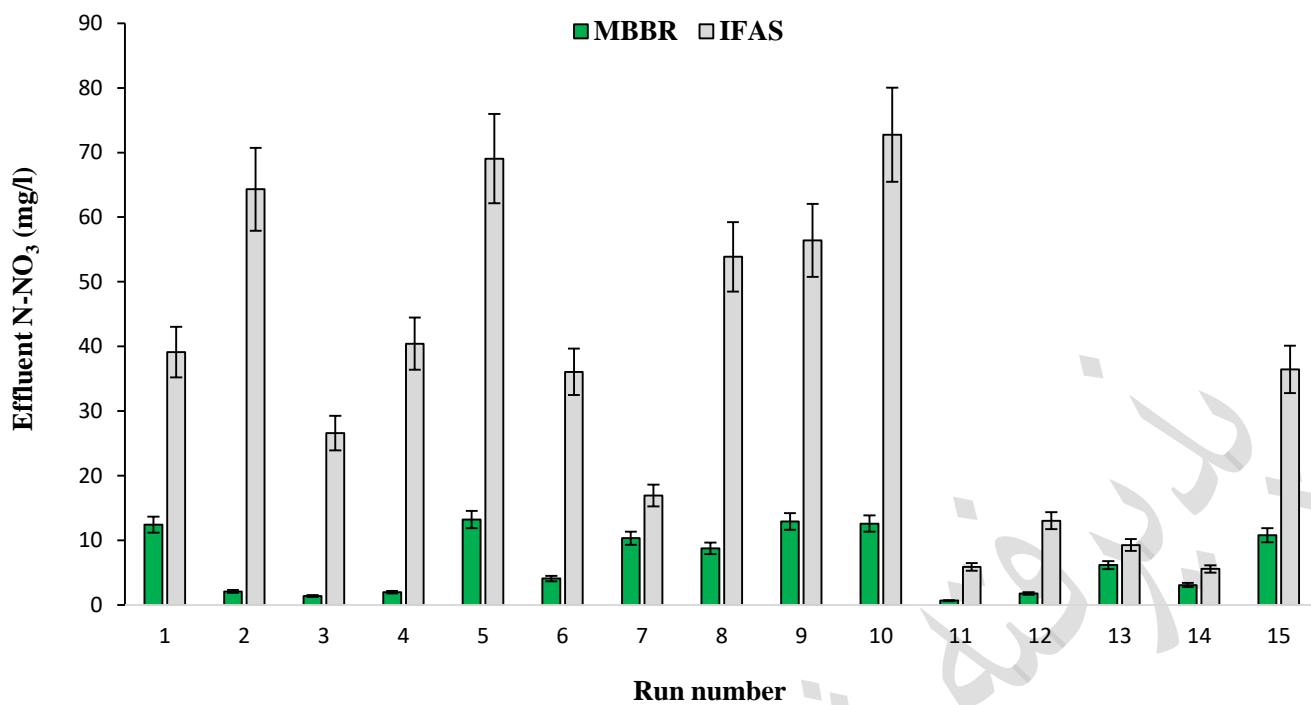
اما برخلاف سیستم IFAS، در شرایط ۱۵ میزان حذف نیتروژن کل در سیستم MBBR نسبت به شرایط ۱۳ و ۱۴ افزایش یافته است که نشان دهنده میزان حذف بالاتر نیتروژن در بیشترین مقادیر از HRT و AFR می‌باشد. این نتیجه، محدود شدن فرآیند نیتریفیکاسیون را به عنوان مرحله

کند فرآیند همزمانی نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون^{۱۴} (SND) در سیستم MBBR را اثبات می‌کند. در واقع با افزایش HRT و کاهش نسبت غذا به میکروارگانیسم و همچنین با افزایش AFR میکروارگانیسم‌های اتوتروف فعالیت بیشتری نموده و تولید نیترات افزایش یافته است که نیترات تولید شده در شرایط آنوکسیک لایه‌های درونی حامل‌ها به گاز نیتروژن تبدیل شده است.

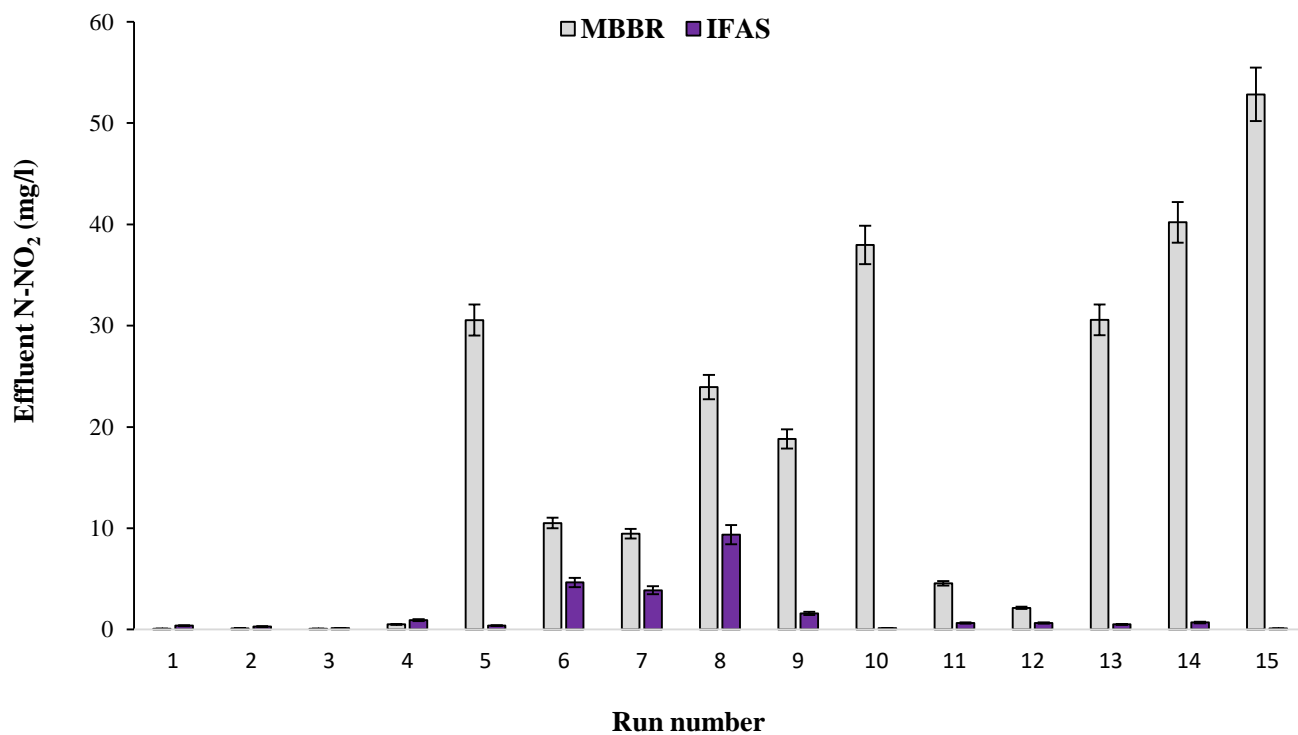


شکل ۵: حذف کل نیتروژن (TN) سیستم‌ها در شرایط مختلف راهبری ذکر شده در جدول ۱.

پژوهش نشده



شکل ۶: مقدار نیتروژن حاصل از نیترات خروجی سیستم‌ها بر حسب میلی‌گرم بر لیتر در شرایط مختلف راهبری ذکر شده در جدول ۱.



شکل ۷: نیتريت خروجی سیستم‌ها در شرایط مختلف راهبری ذکر شده در جدول ۱.

جهت بررسی آماری داده‌های به دست آمده از هر دو سیستم MBBR و IFAS از نرم افزار SPSS استفاده شده است و نتایج حاصله جهت بررسی داده‌های حذف COD، حذف TN، و کدورت خروجی در هر دو سیستم به صورت مجزا در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد. "t" در تحلیل‌های آماری، نشان‌دهنده مقدار آزمون t تک‌نمونه‌ای است که بر اساس آن تصمیم‌گیری می‌شود که آیا تفاوت میانگین‌ها یا نسبت‌ها معنی‌دار است یا خیر. مقادیر بزرگ t برای هر کدام از پاسخ‌ها، نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه و معنی‌داری بین مقادیر نسبت به خطای استاندارد می‌باشد. از طرفی مقادیر^{۱۵} Sig. (2-tailed) که به عنوان مقدار p-value در نتایج آزمون‌های آماری استفاده می‌شود نشان می‌دهد که چقدر احتمال دارد نتیجه آزمایش تنها بر اساس تصادف یا خطای تصادفی رخ داده باشد.

هنگامی که مقدار p-value کوچک‌تر از سطح معنی‌داری تعیین شده (معمولاً ۰/۰۵) باشد، فرض صفر (که می‌گوید تفاوت معنی‌دار نیست) رد می‌شود و نتیجه آزمایش را معنی‌دار در نظر می‌گیریم. با توجه به اینکه مقادیر p-value برای حذف COD، حذف TN و کدورت خروجی صفر می‌باشد بیانگر معنی‌دار بودن تفاوت داده‌ها در شرایط آزمایشی مختلف می‌شود. به عبارت دیگر، نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که تغییرات مشاهده شده در حذف COD، حذف TN و کدورت خروجی، تحت تاثیر شرایط آزمایشگاهی خاص قرار داشته‌اند.

از طرفی داده‌های میانگین برای پاسخ‌های مورد مطالعه، نمایی کلی از عملکرد سیستم‌ها در حذف آلاینده‌های اصلی را ارائه می‌دهند. مقایسه عملکرد سیستم‌های MBBR و IFAS در تصفیه فاضلاب با تکیه بر داده‌های میانگین، نمایانگر تفاوت‌های قابل توجهی در راندمان این دو روش تصفیه بیولوژیکی است. داده‌های ارائه شده، نمایی کلی از عملکرد سیستم‌ها در حذف آلاینده‌های اصلی را ارائه می‌دهند.

بر اساس این داده‌ها، سیستم IFAS در حذف COD، برتری قابل ملاحظه‌ای نسبت به سیستم MBBR دارد. میانگین حذف COD در سیستم IFAS برابر با ۹۴ درصد گزارش شده است، در حالی که این میزان برای سیستم MBBR تنها ۸۴ درصد است. این اختلاف ۱۰ درصدی، نشان‌دهنده کارایی بالاتر سیستم IFAS در تجزیه و حذف ترکیبات آلی موجود در فاضلاب می‌باشد. به طور مشابه در حذف TN، سیستم IFAS نیز عملکرد بهتری را به نمایش می‌گذارد. میانگین حذف TN در سیستم IFAS معادل ۴۵ درصد است، در حالی که در سیستم MBBR این میزان تنها ۲۲ درصد می‌باشد. این تفاوت قابل توجه، حاکی از پتانسیل بالاتر سیستم رشد تلفیقی IFAS در فرایندهای نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون و در نتیجه، حذف مؤثرتر نیتروژن از فاضلاب است. علاوه بر این، بررسی کدورت خروجی نشان می‌دهد که خروجی سیستم IFAS از شفافیت بیشتری برخوردار است. این مسئله می‌تواند ناشی از عملکرد بهتر سیستم IFAS در حذف ذرات معلق و مواد کلوییدی موجود در فاضلاب باشد.

در مجموع، داده‌های میانگین ارائه شده، به طور واضح برتری سیستم IFAS را نسبت به سیستم MBBR در حذف COD، TN و همچنین تولید خروجی با کدورت کمتر نشان می‌دهند. این یافته‌ها می‌توانند در فرآیند انتخاب مناسب‌ترین روش تصفیه فاضلاب، بر اساس نیازهای خاص و شرایط محیطی، مورد استفاده قرار گیرند.

جدول ۲: داده‌های آماری آزمون t تک نمونه‌ای برای پاسخ‌های مورد مطالعه

95% Confidence Interval of the Difference							
Upper	Lower	Mean Difference	Sig. (2-tailed)	df	T	نوع سیستم	پارامترها

۸۹/۱۱۴۱۲	۷۹/۹۹۲۵	۸۴/۵۵۳۳۳	۰/۰۰۰	۱۴	۳۹/۷۶۲	MBBR	حذف COD ، %
۹۵/۴۶۲۸	۹۳/۷۳۷۲	۹۴/۶۰۰۰۰	۰/۰۰۰	۱۴	۲۳۵/۱۷۴	IFAS	
۳۲/۶۵۲۷	۱۲/۵۳۴۰	۲۲/۵۹۳۳۳	۰/۰۰۰	۱۴	۴/۸۱۷	MBBR	حذف TN ، %
۵۲/۶۰۱۲	۳۷/۸۰۶۸	۴۵/۲۰۴۰۰	۰/۰۰۰	۱۴	۱۳/۱۰۷	IFAS	
۸/۷۳۸۶	۲/۹۶۸۱	۵/۸۵۳۳۳	۰/۰۰۱	۱۴	۴/۳۵۱	MBBR	کدورت خروجی، NTU
۳/۵۸۳۶	۱/۷۷۵۱	۲/۶۷۹۳۳	۰/۰۰۰	۱۴	۶/۳۵۵	IFAS	

(۴) نتیجه گیری

در این مقاله اثر نوع سیستم بیولوژیکی از منظر رشد چسبیده (MBBR) و تلفیقی از رشد معلق و چسبیده (IFAS) در تصفیه فاضلاب شهرک صنعتی مورد مطالعه قرار گرفت. شایان ذکر است که سیستم‌های مورد اشاره، در مقیاس آزمایشگاهی راهبری شده‌اند. در این آزمایش‌ها، فاضلاب صنعتی با ویژگی‌های نسبتاً ثابت به سیستم تزریق شده است. لذا، نوسانات معمول در ویژگی‌های فاضلاب صنعتی که در شرایط واقعی مشاهده می‌شوند بر این سیستم‌ها اعمال نشده است.

اثر سه متغیر عملکردی مهم شامل زمان ماند (HRT)، شدت جریان هوادهی (AFR) و نرخ پر شدگی (FR) بر عملکرد سیستم‌های مذکور جهت حذف کربن و نیتروژن ارزیابی شد. بر اساس نتایج بدست آمده برای هر دو سیستم در شرایط راهبری یکسان، راندمان بالاتری در حذف کربن و نیتروژن و همچنین کاهش کدورت خروجی برای سیستم IFAS نسبت به سیستم MBBR در کلیه شرایط راهبری گزارش شد. به‌طور کلی سیستم IFAS قابلیت بالاتری را جهت تصفیه فاضلاب از خود نشان داد، هر چند که به دلیل نیتریفیکاسیون توسعه یافته در این سیستم نیترات خروجی در اغلب شرایط بیشتر از ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شد که این پدیده خود مستلزم پیمایش و بررسی است. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در شدت‌های هوادهی پایین (بین ۲ تا ۳ لیتر بر دقیقه) و زمان ماند ۱۰ ساعت سیستم IFAS عملکرد خوبی را در حذف نیتروژن و کربن با نیترات خروجی پایین از خود نشان می‌دهد. بنابراین، افزودن حامل‌ها یا پکینگ مدیای مناسب به سیستم لجن فعال و بهره‌مندی از هر دو رشد چسبیده و معلق می‌تواند در ارتقای تصفیه‌خانه‌های موجود فاضلاب بدون نیاز به احداث واحد جدید موثر باشد.

(۵) پی‌نوشت‌ها

1. Moving-bed Biofilm Reactor
2. Integrated Fixed Film Activated Sludge
3. Chemical Oxygen Demand
4. Membrane Bioreactor
5. Hydraulic Retention Time
6. Filling Ratio
7. Aeration Flow Rate
8. Biological Oxygen Demand
9. Mixed Liquor Suspended Solids
10. Total Nitrogen
11. Sludge Volume Index
12. One-sample T-test
13. Nephelometric Turbidity Units
14. Simultaneous Nitrification and Denitrification

بدین وسیله نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی خود را از حمایت‌های بنیاد ملی نخبگان در قالب طرح شهید احمدی روشن و جایزه مرحوم دکتر آشتیانی اعلام می‌دارد.

منابع

- Asadi, A., Zinatizadeh, A., Sumathi, S., Rezaie, N., and Kiani, S. (2013). "A comparative study on performance of two aerobic sequencing batch reactors with flocculated and granulated sludge treating an industrial estate wastewater: Process analysis and modeling". *IJE Transaction B*. 26(2). 105-116. 10.5829/idosi.ije.2013.26.02b.01.
- Dolatshah, M., Asadi, A., Gholami, F., and Nazari, S. (2024). "Development and modeling of an integrated fixed-film activated sludge (IFAS) system for simultaneous nitrogen and carbon removal from an industrial estate wastewater". *Biotechnology Reports*, 41, e00831. 10.1016/j.btre.2024.e00831.
- Dolatshah, M., Zinatizadeh, A. A., Zinadini, S., and Zangeneh, H. (2023). "A new UV-grafted photocatalytic membrane for advanced treatment of biologically treated baker's yeast (BTY) effluent: Fabrication, characterization and performance evaluation". *Process Safety and Environmental Protection*. 170. 608-622. 10.1016/j.psep.2022.11.060
- Gao, X., Zhang, L., Peng, Y., Ding, J., and An, Z. (2023). "The successful integration of anammox to enhance the operational stability and nitrogen removal efficiency during municipal wastewater treatment". *Chemical Engineering Journal*. 451. 138878. 10.1016/j.cej.2022.138878.
- Hou, H., Mengting, Z., Duan, L., Zhao, Y., Zhang, Z., Yao, M., Zhou, B., Zhang, H., and Hermanowicz, S. W. (2022). "Removal performance and biodegradation mechanism of sulfonamides antibiotic contained wastewater by IFAS-MBR bioreactor". *Journal of Molecular Liquids*. 367. 120572. 10.1016/j.molliq.2022.120572.
- Huang, Y., Yuan, B., Wang, X., Dai, Y., Wang, D., Gong, Z., Chen, J., Shen, L., Fan, M., and Li, Z. (2023). "Industrial wastewater source tracing: The initiative of SERS spectral signature aided by a one-dimensional convolutional neural network". *Water Research*. 232. 119662. 10.1016/j.watres.2023.119662.
- Jalali, F., Zinatizadeh, A., Asadi, A., and Zinadini, S. (2023). "A moving bed biofilm reactor coupled with an upgraded nanocomposite polyvinylidene fluoride membrane to treat an industrial estate wastewater". *Chemical Engineering Journal*. 470. 144128. 10.1016/j.cej.2023.144128.
- Li, R., Speed, D., Siriwardena, D., Fernando, S., Thagard, S. M., and Holsen, T. M. (2021). "Comparison of hydrogen peroxide-based advanced oxidation processes for the treatment of azole-containing industrial wastewater". *Chemical Engineering Journal*. 425. 131785. 10.1016/j.cej.2021.131785.
- Liu, L., Chen, Z., Zhang, J., Shan, D., Wu, Y., Bai, L., and Wang, B. (2021). "Treatment of industrial dye wastewater and pharmaceutical residue wastewater by advanced oxidation processes and its combination with nanocatalysts: A review". *Journal of Water Process Engineering*. 42. 102122. 10.1016/j.jwpe.2021.102122.
- Luostarinen, S., Luste, S., Valentin, L., and Rintala, J. (2006). "Nitrogen removal from on-site treated anaerobic effluents using intermittently aerated moving bed biofilm reactors at low temperatures". *Water research*. 40(8). 1607-1615. 10.1016/j.watres.2006.02.022.
- Mirghorayshi, M., Zinatizadeh, A. A., and Van Loosdrecht, M. (2018). "Evaluating the process performance and potential of a high-rate single airlift bioreactor for simultaneous carbon and nitrogen removal through coupling different pathways from a nitrogen-rich wastewater". *Bioresource technology*. 260, 44-52. 10.1016/j.biortech.2018.03.048.
- Prasanna, K. (2022). "A novel adsorption process for the removal of salt and dye from saline textile industrial wastewater using a three-stage reactor with surface modified adsorbents". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108729. 10.1016/j.jece.2022.108729.
- Rice, E. W., Baird, R. B., Eaton, A. D., and Clesceri, L. S. (2012). Standard methods for the examination of water and wastewater.
- Veuillet, F., Lacroix, S., Bausseron, A., Gonidec, E., Ochoa, J., Christensson, M., & Lemaire, R. (2014). Integrated fixed-film activated sludge ANITA™ Mox process—a new perspective for advanced nitrogen removal. *Water Science and Technology*, 69(5), 915-922. 10.2166/wst.2013.786.
- Waqas, S., Bilal, M. R., Man, Z., Wibisono, Y., Jaafar, J., Mahlia, T. M. I., Khan, A. L., and Aslam, M. (2020). "Recent progress in integrated fixed-film activated sludge process for wastewater treatment: A review". *Journal of environmental management*. 268. 110718. 10.1016/j.jenvman.2020.110718.
- Zhang, L., Liu, M., Zhang, S., Yang, Y., and Peng, Y. (2015). "Integrated fixed-biofilm activated sludge reactor as a powerful tool to enrich anammox biofilm and granular sludge". *Chemosphere*. 140. 114-118. 10.1016/j.chemosphere.2015.02.001.
- Zhang, X., Xiong, S., Liu, C.X., Shen, L., Wang, S.L., Lang, W.Z., & Wang, Y. (2021). "Smart TFC membrane for simulated textile wastewater concentration at elevated temperature enabled by thermal-responsive microgels". *Desalination*. 500. 114870. 10.1016/j.desal.2020.114870.
- Zinatizadeh, A., and Ghaytooli, E. (2015). "Simultaneous nitrogen and carbon removal from wastewater at different operating conditions in a moving bed biofilm reactor (MBBR): process modeling and optimization". *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 53. 98-111. 10.1016/j.jtice.2015.02.034.

اسدی، آ.، احمدی، ف.، زینتی زاده، ع.، و نامور اصل، ع.، (۱۴۰۰)، "مروری بر عوامل موثر در روش فقر و غنا برای تولید پلاستیک زیستی از لجن مازاد تصفیه بیولوژیکی فاضلاب"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۶(۱)، ۱۵-۲۹. 10.22112/JWWSE.2020.230356.1207

چوپان، ی.، امامی، س.، (۱۳۹۹)، "بررسی امکان سنجی بهره‌گیری از پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری تربت‌حیدریه برای آبیاری محصولات کشاورزی"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۵(۱)، ۳۹-۴۵. 10.22112/JWWSE.2020.154348.1118

هاشم زاده، ف.، اکبر زاده، ع.، (۱۴۰۱)، "بررسی عملکرد بیورآکتور مستغرق غشایی (SMBR) در تصفیه فاضلاب های شهری و نساجی شاهین شهر اصفهان"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۷(۳)، ۷۲-۸۴. 10.22112/JWWSE.2022.324258.1305

پذیرفته شده / ویرایش نشده