

Research Paper

مقاله پژوهشی

## Comparison of the Performance of Moving Bed Bioreactor (MBBR) and Integrated Fixed-Film Activated Sludge (IFAS) for CNP Removal from Faraman Industrial Estate Wastewater

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

Azar Asadi<sup>1\*</sup> and Ali Fiuzi<sup>2</sup>

1- Associate Professor, Department of Applied Chemistry, Faculty of Gas and Petroleum, Yasouj University, Kogiloyeh and Boyerahmad, Iran.

2- B.Sc. Student, Department of Applied Chemistry, Faculty of Gas and Petroleum, Yasouj University, Kogiloyeh and Boyerahmad, Iran.

\*Corresponding Author, Email: [a.asadi@yu.ac.ir](mailto:a.asadi@yu.ac.ir)

آذر اسدی<sup>۱\*</sup> و علی فیوضی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار گروه شیمی کاربردی، دانشکده نفت و گاز گچساران، دانشگاه یاسوج، کهگیلویه و بویر احمد، ایران.

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

\*نویسنده مسئول، ایمیل: [a.asadi@yu.ac.ir](mailto:a.asadi@yu.ac.ir)

Received: 15/03/2025

Revised: 28/07/2025

Accepted: 20/08/2025

© IWWA

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹

© انجمن آب و فاضلاب ایران

### 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 studied bioreactors included 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 included 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. The turbidity of the IFAS system was also reported to be lower than that of the MBBR. In fact, the obtained results 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.

### چکیده

از آنجایی که تصفیه فاضلاب برای حفاظت از محیط‌زیست، هدفی اصلی و امری حیاتی به‌شمار می‌رود در این مطالعه، بازده تصفیه فاضلاب شهرک‌های صنعتی فرامان واقع در استان کرمانشاه در دو بیوراکتور راهبردی شده در شرایط یکسان مقایسه شده است. راکتورهای زیستی مورد مطالعه شامل راکتور بیوفیلمی با بسترمتحرک (MBBR) و لجن فعال تلفیقی با رشد چسبیده (IFAS) است. عملکرد این دو سیستم با بررسی سه پارامتر عملکردی شامل زمان ماند هیدرولیکی (HRT)، شدت جریان هوادهی (AFR) و درصد پرشدگی (FR) برای حذف محتوای کربن و نیتروژن از فاضلاب مذکور مقایسه شد. با استفاده از نرم‌افزار Design Expert 20، شرایط آزمایشی مختلف طراحی شد و هفت پاسخ مورد مطالعه قرارگرفت که شامل جمعیت میکروارگانیسم‌های چسبیده به حامل‌ها، حذف محتوای کربنی، کدورت خروجی و حذف نیتروژن که خود شامل حذف نیتريت و نیترات است. طبق نتایج به‌دست 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 راهبردی از خود نشان داد. هم‌چنین کدورت سیستم IFAS نیز کمتر از MBBR گزارش شد. در واقع نتایج به‌دست آمده بیانگر اثر مثبت تلفیق میکروارگانیسم‌های معلق و چسبیده بر راندمان تصفیه سیستم‌های بیولوژیکی است.

**واژه‌های کلیدی:** بیوراکتور بستر متحرک، لجن فعال با لایه تثبیت‌کننده، فاضلاب شهرک صنعتی، زمان ماند هیدرولیکی، شدت هوادهی.

MBBR قادر به حذف ۵۰-۶۰٪ نیترژن و ۴۰-۷۰٪ اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی (COD) و انجام نیتریفیکاسون به طور کامل است (Luostarinen et al., 2006). از طرفی IFAS، نیز به دلیل داشتن زیست توده های معلق و متصل و ویژگی های منحصر به فرد خود، گزینه مناسبی برای تصفیه انواع فاضلاب ها به ویژه فاضلاب های صنعتی است که از آن جمله می توان 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 شوک های آلی و هیدرولیکی اشاره نمود.

در یک مطالعه، (Veuillet et al., 2014) آب دفعی از یک دستگاه هضم کننده لجن بی هوازی مزوفیلیک را با استفاده از بیوراکتورهای IFAS تصفیه کردند. دو سیستم IFAS با فاضلاب غنی از آمونیوم (۲۰۰±۹۰۷ میلی گرم بر لیتر) خوراک دهی شدند که حذف آمونیوم و نیترژن از سیستم های IFAS به ترتیب ۹۵٪ و ۹۰٪ بود. در یک کار دیگر، (Zhang et al., 2015) عملکرد دو سیستم IFAS مقیاس کامل و پایلوت برای تصفیه پساب خروجی از واحد آبکشی لجن مقایسه کرد. سیستم های IFAS پایلوت و مقیاس کامل به ترتیب ۸۰٪ و ۸۵٪ حذف نیترژن را در نرخ های بارگذاری آمونیوم ۰/۴۸ کیلوگرم نیترژن بر مترمکعب در روز و ۱/۳-۰/۷ کیلوگرم نیترژن 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 سیستم های IFAS، MBBR و بیوراکتور غشایی (MBR) برای تصفیه آب های تحت تأثیر فرآیند شن و ماسه نفتی در شرایط یکسان راهبری شدند. براساس داده های گزارش شده، بازده حذف COD به ترتیب ۶۴/۴۲٪، ۵۸/۲٪ و ۵۳/۶٪ برای IFAS، MBBR و MBR گزارش شد که نشان دهنده توانمندی بالاتر سیستم ترکیبی در مقایسه با سیستم های معلق و چسبیده به تنهایی است (Hou et al., 2022). به طور کلی، سیستم لجن فعال با رشد چسبیده روشی کارآمد برای ارتقای تصفیه خانه های فاضلاب موجود محسوب می شود. در تحقیقات پیشین این گروه پژوهشی، دو سیستم IFAS و MBBR در شرایط یکسان برای حذف کربن و نیترژن از فاضلاب واقعی یک شهرک صنعتی در استان کرمانشاه، مورد بهره برداری قرار گرفته اند. در این مطالعات، زمان ماند هیدرولیکی (HRT) ۵، نسبت پرشدگی (FR) ۶ و شدت جریان هوادهی (AFR) ۷ به عنوان متغیرهای مورد بررسی در سه سطح مختلف، ارزیابی شده اند (Dolatshah et al., 2024; Jalali et al., 2023).

در مقاله حاضر، هدف اصلی بررسی و مقایسه عملکرد دو

افزایش جمعیت و توسعه صنعت علاوه بر این که مشکلات موجود در زمینه تأمین آب را به مراحل بحرانی رسانده، موجب آلودگی پساب های خانگی، صنعتی، کشاورزی و آب های سطحی موجود نیز شده و علاوه بر خسارت های محیط زیستی، منابع آبی موجود را نیز غیرقابل استفاده نموده است (چوپان و امامی، ۱۳۹۹). بنابراین، تصفیه فاضلاب که هدف اصلی آن حفاظت محیط زیست و منابع آب است، ضروری به نظر می رسد. محتوای کربن آلی و مواد مغذی (نیترژن و فسفر) به عنوان آلاینده های مهم فاضلاب های صنعتی و شهری شناخته می شوند که برای دستیابی به استانداردهای تخلیه پساب، لازم است به طور مؤثر حذف شوند (هاشم زاده و اکبرزاده، ۱۴۰۱؛ Gao et al., 2023; Mirghorayshi et al., 2018). تصفیه فاضلاب صنعتی در طول سال ها 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) و فرآیندهای بیولوژیکی (Asadi et al., 2021; Liu et al., 2021) انجام شده است. عملیات آسان و هزینه اقتصادی فرآیندهای بیولوژیکی همراه با کارایی رضایت بخش آن ها، به گسترش آن ها در صنایع منجر شده است (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 بیوفیلیم با رشد چسبیده (MBBR) ۱ و فرآیند لجن فعال با رشد تلفیقی (IFAS) ۲ به صورت روز افزونی برای ساخت تصفیه خانه های جدید و ارتقای تصفیه خانه های فاضلاب موجود مورد استفاده قرار می گیرد. این سیستم های رشد چسبیده، در طول سال ها به دلیل غلبه بر بعضی از محدودیت های سیستم های لجن فعال مانند حجم بزرگ راکتور و بازیابی لجن توسعه یافته اند.

MBBR یک سیستم رشد چسبیده است که برای تصفیه فاضلاب های بسیار آلوده به دلیل طراحی فشرده، عملیات آسان و بی نیاز از بازگشت لجن کارآمد است. بیوفیلیم تشکیل شده بر روی حامل های معلق شامل لایه های داخلی آنوکسیک/بی هوازی و لایه های خارجی هوازی است. بنابراین، MBBR مستعد حذف هم زمان نیترژن و هم چنین محتوای کربن است. 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 داده های به دست آمده سیستم

هم‌چنین از یک مخزن ته‌نشینی بدون بازیافت لجن استفاده شد. بیوراکتور با حامل‌های (Kaldnes-3) ساخته‌شده 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 به‌طور مداوم با یک پمپ پرستالتیک تغذیه شد. بیوراکتور با حامل‌های ساخته‌شده 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 از انتهای ستون بیوراکتور تأمین شد. برای تنظیم نرخ جریان هوا، از جریان سنج گازی استفاده شد (Dolatshah et al., 2024).

## ۲-۳- تشکیل بیوفیلیم بر روی حامل‌ها

برای تشکیل لایه بیوفیلیم بر روی حامل‌های استفاده‌شده، 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. به‌منظور توسعه بیوفیلیم 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 بیوفیلیم بر روی حامل‌ها، به‌منظور سازگارشدهن جمعیت میکروبی رشد کرده با پساب شهرک صنعتی، سیستم به مدت دو هفته با مخلوطی از شیر و پساب شهرک صنعتی تغذیه شد؛ به‌طوری‌که 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).

## ۲-۴- راهبری بیوراکتورها و طراحی آزمایش

پس از راه‌اندازی، بیوراکتورها به‌طور مداوم با فاضلاب شهرک صنعتی از طریق یک پمپ پرستالتیک تغذیه شدند. بیوراکتورها در دمای اتاق ( $25 \pm 2$  °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)،

سیستم IFAS و MBBR در حذف کربن و نیتروژن از فاضلاب صنعتی است. این تحلیل براساس داده‌های جمع‌آوری شده از یک طرح پژوهشی انجام شده توسط همین گروه تحقیقاتی صورت می‌گیرد و به‌منظور 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 درنظر گرفتن چندین پاسخ عملکردی سیستم بیولوژیکی، شامل حذف COD، حذف نیتروژن، میزان نیترات و نیتريت خروجی و کدورت خروجی انجام شده‌است. این بررسی جامع، دیدگاهی روشن‌تر نسبت به نقاط قوت و ضعف هریک از این سیستم‌ها در تصفیه فاضلاب صنعتی ارائه می‌دهد. شایان ذکر است که مطالعات پیشین مانند گزارش (Hou et al., 2022)، عمدتاً برمقایسه عملکرد این دو سیستم در حذف کربن متمرکز بوده‌اند. درمقابل، این مقاله با ارائه اطلاعات گسترده‌تری عملکرد هر دو سیستم در حذف هم‌زمان کربن و نیتروژن را پیمایش و مقایسه می‌کند. 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 سه‌روز 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 نیترات، ۱۹۷ میلی‌گرم بر لیتر از کل نیتروژن موجود، ۳ میلی‌گرم بر لیتر از فسفر کل و دامنه pH بین ۶/۵ تا ۷/۵ است.

### ۲-۲- پیکربندی بیوراکتورها

تصاویر آزمایشگاهی سیستم‌های راهبری شده در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند. بیوراکتور MBBR، از یک ستون پلاستیکی شفاف ساخته‌شده 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.

گرم در لیتر راه اندازی شد و در طی آزمایش‌ها با تخلیه لجن اضافی بر روی ۲۰۰۰ میلی گرم بر لیتر تنظیم شد.

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 میلی



(ب)



(الف)

شکل ۱- تصاویر بیوراکتورهای: الف) MBBR (Jalali et al., 2023); و ب) IFAS (Dolatshah et al., 2024)

در خروجی، شاخص حجم لجن (SVI)<sup>۱۱</sup> و کدورت خروجی، تعیین شد که در جدول ۱ شرایط مختلف راهبری نشان داده شده است. همبستگی پاسخ‌ها با متغیرهای عملیاتی از طریق مدل‌های چند جمله‌ای به شرح رابطه (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  $Y$ : نشان دهنده پاسخ پیش‌بینی شده است و  $x_i$  و  $x_j$ : به عنوان 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  $\varepsilon$ : خطای مدل را نشان می‌دهد.

همچنین برای بررسی و تحلیل آماری داده‌های حذف COD، حذف TN، کدورت خروجی در شرایط آزمایشی مختلف از منظر معنی‌داری تفاوت داده‌ها از آزمون  $t$  تک‌نمونه‌ای<sup>۱۲</sup> در نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

بیوراکتورها با استفاده از یک پمپ پرستالتیک 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 براساس 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 ذکر شده کلیه تست‌های عملکردی بیوراکتورها اندازه‌گیری شدند و پس از مشاهده ثابت ماندن پارامترهای عملکردی در خروجی سیستم‌ها، شرایط پایدار سیستم‌ها محرز شد.

## ۲-۵- طراحی شرایط آزمایشی و تحلیل آماری

نرم‌افزار 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 پاسخ مختلف در طول ۲۰ شرایط آزمایشگاهی مختلف شامل: حذف COD، حذف BOD، حذف کل نیتروژن (TN)<sup>۱۰</sup>، غلظت‌های نیترات و نیتريت

آن مراحل ذکر شده برای یک حامل تمیز تکرار شد. غلظت زیست‌توده چسبیده با توجه به رابطه (۲) محاسبه شد (Zinatizadeh and Ghaytooli, 2015).

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

که  $A$ ،  $B$ ،  $C$  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 به‌طور میانگین محاسبه و به‌عنوان 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 به‌خوبی به‌تصویر کشیده شده است. برطبق داده‌های به‌دست‌آمده غلظت میکروارگانیسم‌های چسبیده برای سیستم MBBR در اکثر شرایط بالاتر از سیستم IFAS است، که در واقع گویای غلبه دسترسی به منابع غذایی میکروارگانیسم‌های معلق در مقایسه با چسبیده در سیستم IFAS است. با افزایش میزان FR، جمعیت میکروارگانیسم‌های چسبیده در هر دو سیستم به‌دلیل افزایش سطح، برای 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.

#### ۳-۲- 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 است. 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

جدول ۱- شرایط مختلف راهبری بیوراکتورها

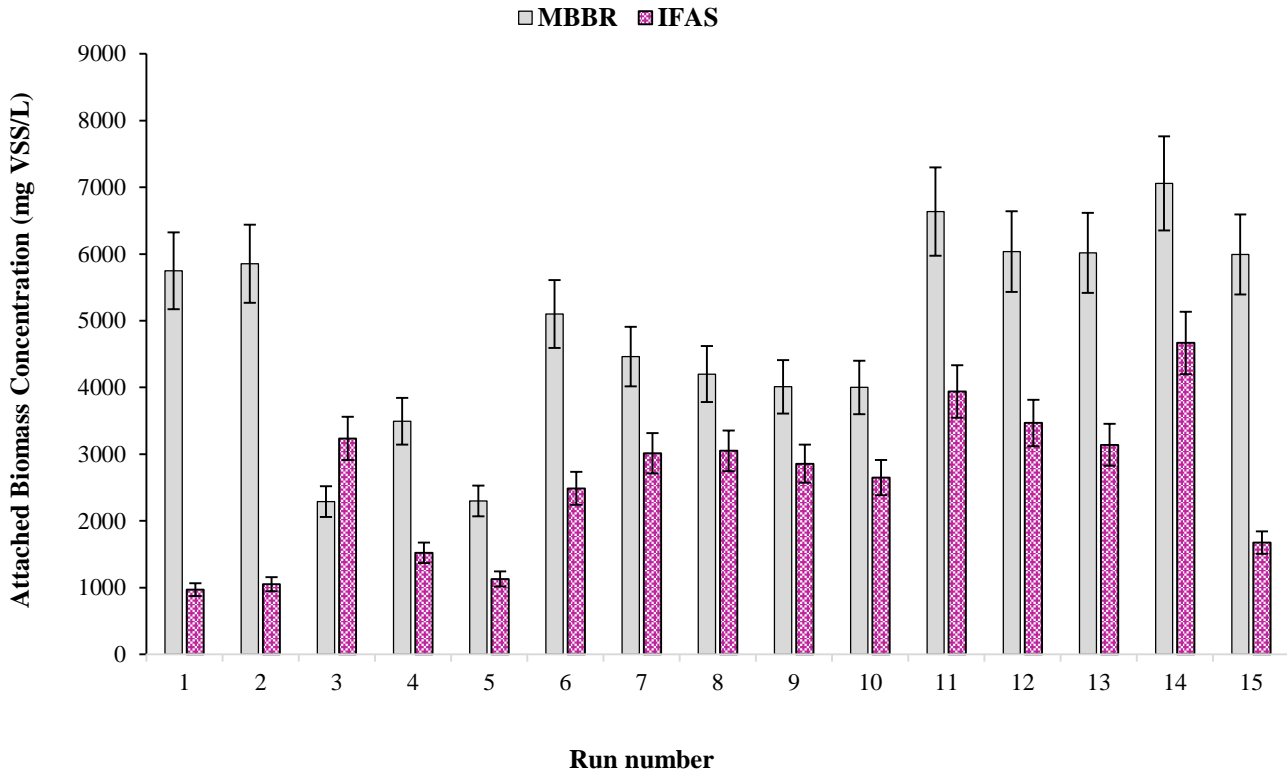
شرایط	زمان ماند (ساعت)	نسبت پرشدگی (%)	شدت جریان هوادهی (لیتر بر دقیقه)
۱	۵	۳۰	۱
۲	۵	۳۰	۴
۳	۱۰	۳۰	۲/۵
۴	۱۵	۳۰	۱
۵	۱۵	۳۰	۴
۶	۵	۵۰	۲/۵
۷	۱۰	۵۰	۱
۸	۱۰	۵۰	۲/۵
۹	۱۰	۵۰	۴
۱۰	۱۵	۵۰	۲/۵
۱۱	۵	۷۰	۱
۱۲	۵	۷۰	۴
۱۳	۱۰	۷۰	۲/۵
۱۴	۱۵	۷۰	۱
۱۵	۱۵	۷۰	۴
۱۶	۱۰	۵۰	۲/۵
۱۷	۱۰	۵۰	۲/۵
۱۸	۱۰	۵۰	۲/۵
۱۹	۱۰	۵۰	۲/۵
۲۰	۱۰	۵۰	۲/۵

#### ۲-۶- روش‌های اندازه‌گیری آزمایشگاهی

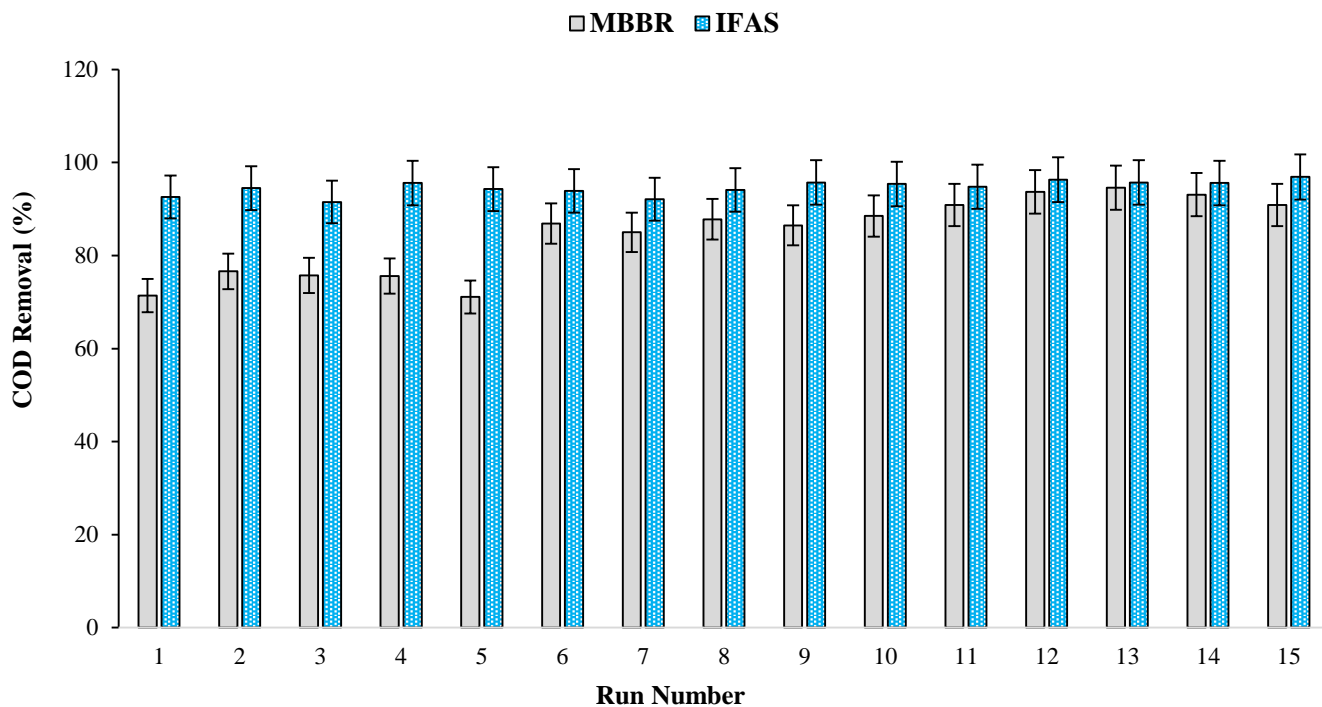
مقادیر COD، BOD، TN، نیترات، نیتريت و نیتروژن آمونیاکی (NH<sub>4</sub>-N) در ورودی و خروجی بیوراکتور با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد (Rice et al., 2012). برای اندازه‌گیری محتوای COD، روش بسته ریفلکس با روش رنگ‌سنجی در ۶۰۰ نانومتر انجام شد. مقادیر N-NH<sub>4</sub> با استفاده از روش نسلر با رنگ‌سنجی در ۴۲۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. جذب COD و N-NH<sub>4</sub> با استفاده از طیف‌سنج نور مرئی Jenway 6320D تعیین شد. غلظت N-NO<sub>3</sub> با استفاده از طیف‌سنج UV-Vis Agilent 8453 در ۲۲۰ و ۲۷۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. میزان جذب N-NO<sub>2</sub> با طیف‌سنج (Jenway 6320D) UV-Vis در ۵۴۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. دستگاه اندازه‌گیری کدورت مدل 2100P (HachCo., USA) برای اندازه‌گیری کدورت و نرخ جریان هوادهی توسط روماترگازی اندازه‌گیری شد. برای تعیین غلظت زیست‌توده چسبیده، یک حامل به‌طور 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

میکروارگانیسیم‌ها به هردو صورت معلق و چسبیده قابلیت بالاتری در دسترسی به محتوای کربنی فاضلاب و هضم آن دارد. به‌همین دلیل راندمان بین ۹۱٪ تا ۹۷٪ در سیستم IFAS و محدوده ۷۱٪ تا ۹۴٪ برای سیستم MBBR مشاهده می‌شود.

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



شکل ۲- غلظت میکروارگانیسیم‌های چسبیده در دو سیستم IFAS و MBBR در شرایط مختلف راهبری ذکر شده در جدول ۱



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

شرایط راهبری ۴ و ۵ می‌توان سیر نزولی کدورت با افزایش HRT را به خوبی مشاهده نمود، به طوری که در بالاترین مقدار HRT که ۱۵ ساعت است میزان کدورت خروجی به شدت کاهش یافته است 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 به دست آمده کدورت خروجی سیستم MBBR در مقدار ۳۰٪ از AFR با شدت بیشتری تابعی از مقادیر HRT و AFR است 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 شکل‌های ستونی ۵، ۶ و ۷ گزارش شده‌اند. طبق شکل ۵، عملکرد IFAS برای حذف کل نیتروژن در کلیه شرایط راهبری بالاتر از سیستم MBBR است به طوری که بالاترین میزان حذف سیستم IFAS، ۸۰٪ ولی بالاترین میزان حذف برای سیستم MBBR ۳۰٪ است. این تفاوت فاحش در میزان حذف نیتروژن به تعادل مناسبی بین فرآیندهای نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون در سیستم تلفیقی میکروارگانسیم‌های 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 لایه‌های درونی رشد یافته بر روی حامل‌ها که در ادامه باتوجه به داده‌های به دست آمده، این مهم تحقیق خواهد شد.

میزان نیترات و نیتريت خروجی این سیستم‌ها که در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده‌اند اطلاعات خوبی را در مورد پدیده نیتریفیکاسیون انعکاس می‌دهند. همان‌طور که در شکل 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 است. چون فرآیند نیتریفیکاسیون یک فرآیند هوازی است که توسط باکتری‌های اتوتروف انجام می‌شود، بنابراین مقدار اکسیژن بالا برای 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

در سیستم MBBR، با افزایش میزان FR حذف COD بالاتر می‌رود که این امر به بالاتر بودن جمعیت میکروارگانسیم‌های 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٪ است 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 است، در حالی که سیستم IFAS مستقل از تغییرات هر سه پارامتر راهبری، راندمان بالایی را در حذف COD از خود نشان می‌دهد.

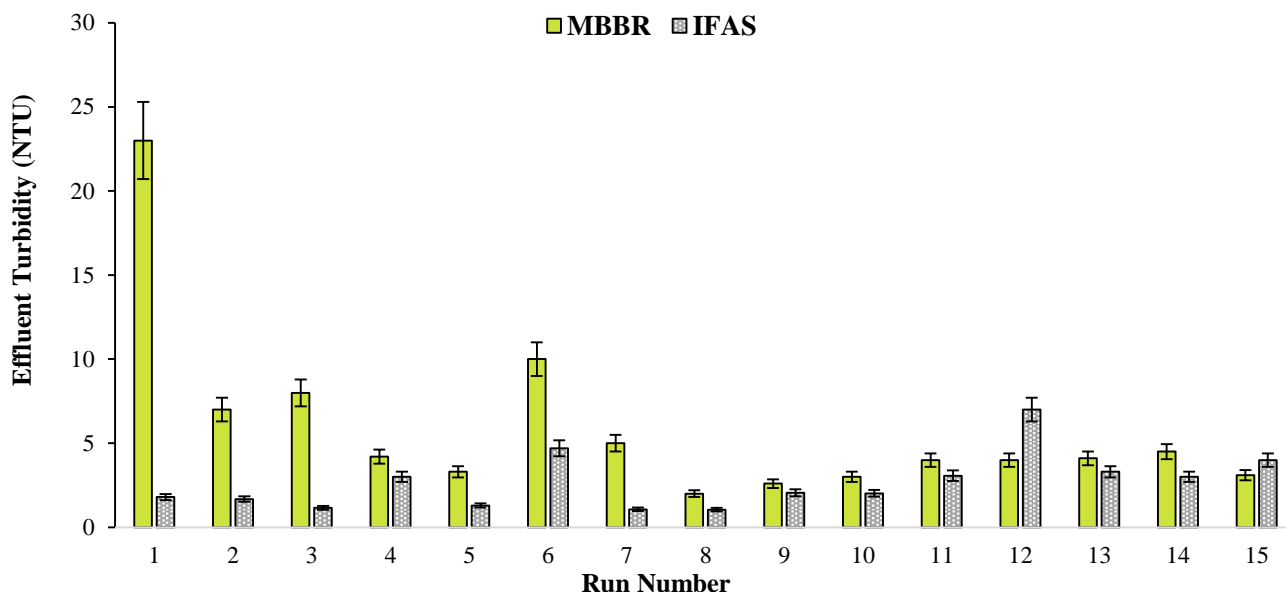
### ۳-۳- کدورت خروجی

حذف کدورت فاضلاب تصفیه شده یکی از مهم‌ترین گام‌ها در روند تصفیه فاضلاب است که با افزایش کیفیت فاضلاب تصفیه شده، ارتباط مستقیم دارد و علاوه بر جلوه ظاهری، نمایانگر کاهش بار آلودگی میکروبی نیز هست. 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 به دست آمده در هر دو سیستم، میزان کدورت روند نوسانی دارد، اما نوسانات آن در روش IFAS کمتر بوده به طوری که در IFAS کدورت در کلیه شرایط زیر ۱۰ واحد NTU<sup>۱۳</sup> 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 است.

بالاترین مقدار کدورت خروجی در شرایط راهبری ۱ 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 است. در واقع در این شرایط رشد میکروارگانسیم‌ها بر روی حامل‌ها به دلیل میزان بالای نسبت غذا به میکروارگانسیم در کمترین مقدار HRT است که باعث رخ دادن پدیده ریزش خواهد شد و کدورت سیستم افزایش می‌یابد. از طرفی در کمترین میزان AFR نیز به لایه‌های درونی میکروارگانسیم‌های 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 رسیده است. هم‌چنین با دقت در

نیترژن موجود را به نیترات تبدیل کنند.

نتیجه پس از کاهش چشمگیر محتوای کربنی نوبت به باکتری‌های اتوتروف می‌رسد که در حضور اکسیژن کافی محتوای



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

ساعت از HRT،  $2/5$  لیتر بر دقیقه از AFR و  $70\%$  از FR گزارش شده است. در همین شرایط میزان نیترات خروجی به کمتر از  $10$  میلی‌گرم بر لیتر رسیده است که بیانگر تعادل مناسبی بین فرآیندهای نیتروفیکاسیون و دنیتروفیکاسیون با تبدیل نیترژن آلی به نیترات در فرآیند نیتروفیکاسیون و در ادامه تبدیل نیترات به گاز نیترژن با فرآیند دنیتروفیکاسیون است. در واقع در این شرایط با  $2/5$  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 نیترژن تبدیل شده است.

برای بررسی اثرات زمان ماند و نرخ هوادهی بر میزان حذف نیترژن کل، شرایط راهبری  $14$  و  $15$  بررسی می‌شود. در شرایط شماره  $14$  حذف نیترژن کمتر شده است که به دلیل افزایش مقدار HRT به  $15$  ساعت است که باعث کم شدن نسبت غذا به میکروارگانیسم شده است و در نهایت کربن آلی لازم برای انجام فرآیند دنیتروفیکاسیون تامین نشده است. روند کاهشی در شرایط  $15$  بیشتر شده است. در این شرایط علاوه بر  $15$  ساعت از HRT عامل محدودکننده دیگری نیز اضافه شده است و آن افزایش AFR به میزان  $4$  لیتر بر دقیقه است. 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

برخلاف سیستم IFAS، در سیستم MBBR نیترات کمتری در شرایط مختلف تولید شده است که نمایانگر نیتروفیکاسیون محدود شده است. 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 برای تولید نیترات می‌دهد. از طرفی داده‌های نیتريت خروجی نیز نیتروفیکاسیون محدود شده در سیستم MBBR را اثبات می‌کند به طوری که میزان نیتريت در IFAS در تمام فرآیند کمتر از  $10$  میلی‌گرم بر لیتر و بیشترین آن  $9/37$  میلی‌گرم بر لیتر بوده اما در MBBR به  $30/5$  میلی‌گرم بر لیتر و حتی به  $52/83$  میلی‌گرم بر لیتر رسیده است. از آنجایی که نیتريت یک حد واسط در فرآیند نیتروفیکاسیون است، حضور چشمگیر آن در خروجی MBBR بیانگر این مطلب است که نیتروفیکاسیون به صورت کامل انجام نشده است. یکی از دلایل نیتروفیکاسیون محدود شده، نفوذ اکسیژن کمتر به لایه‌های درونی میکروارگانیسم‌های چسبیده است که منجر به عدم دسترسی جمعیت قابل توجهی از میکروارگانیسم‌ها به شرایط مناسب برای تولید نیترات خواهد شد.

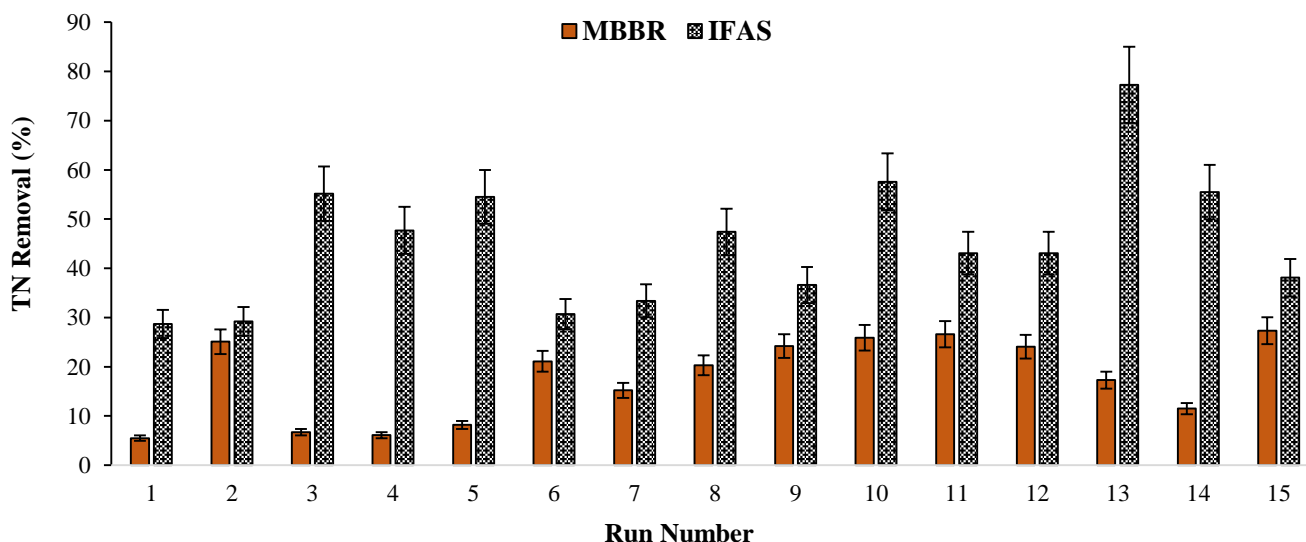
از طرفی بیشترین میزان حذف نیترژن کل در سیستم IFAS، حدود  $80\%$  است که در شرایط راهبری  $13$  با مقادیر  $10$

### ۳-۵- تحلیل آماری

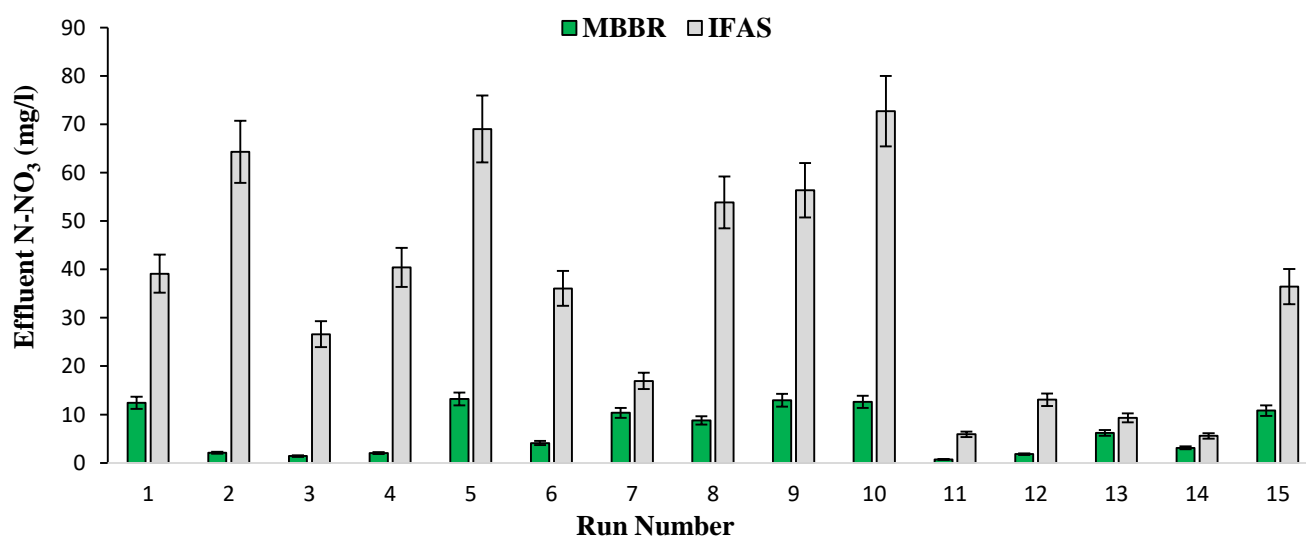
برای بررسی آماری داده‌های به‌دست آمده از هر دو سیستم MBBR و IFAS از نرم‌افزار SPSS استفاده شده است و نتایج حاصله برای بررسی داده‌های حذف COD، حذف TN و کدورت خروجی در هر دو سیستم به‌صورت مجزا در جدول ۲ قابل مشاهده است. "t" در تحلیل‌های آماری، نشان‌دهنده مقدار آزمون t تک‌نمونه‌ای است که براساس آن تصمیم‌گیری 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 است. از طرفی مقادیر Sig. (2-tailed) <sup>۱۵</sup> که به‌عنوان مقدار p-value در نتایج آزمون‌های آماری استفاده می‌شود نشان می‌دهد که چقدر احتمال دارد نتیجه آزمایش تنها براساس تصادف یا خطای تصادفی رخ داده باشد.

AFR میزان حذف نیتروژن کل کاهش می‌یابد.

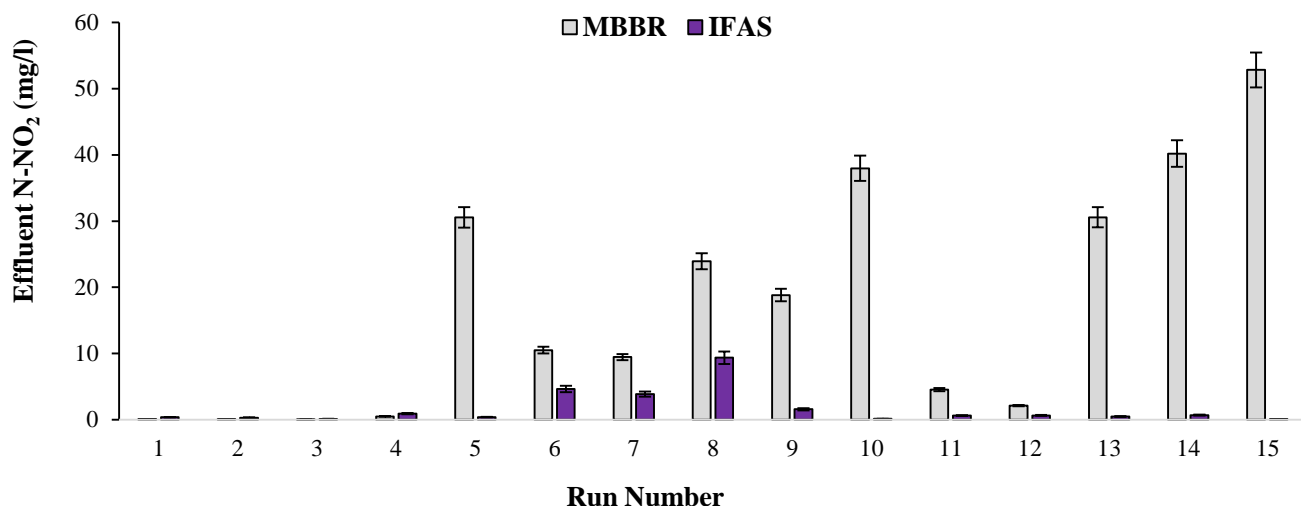
اما برخلاف سیستم IFAS، در شرایط راهبری ۱۵ میزان حذف نیتروژن کل در سیستم MBBR نسبت به شرایط راهبری ۱۳ و ۱۴ افزایش یافته است که نشان‌دهنده میزان حذف بالاتر نیتروژن در بیشترین مقادیر از HRT و AFR است. این نتیجه، محدود شدن فرایند نیتریفیکاسیون را به‌عنوان مرحله کند فرآیند هم‌زمانی نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون (SND) <sup>۱۴</sup> 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



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



شکل ۷- نیتريت خروجی سیستم‌ها در شرایط مختلف راهبري ذکر شده در جدول ۱

درحالی‌که این میزان برای سیستم MBBR تنها ۸۴٪ است. این اختلاف ۱۰ درصدی، نشان‌دهنده کارایی بالاتر سیستم IFAS در تجزیه و حذف ترکیبات آلی موجود در فاضلاب است. به‌طور مشابه در حذف TN، سیستم IFAS نیز عملکرد بهتری را به نمایش می‌گذارد. میانگین حذف TN در سیستم IFAS معادل ۴۵٪ است، درحالی‌که در سیستم MBBR این میزان تنها ۲۲٪ است. 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، به‌طور 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، براساس نیازهای خاص و شرایط محیطی، مورد استفاده قرار گیرند.

هنگامی‌که مقدار p-value کوچک‌تر از سطح معنی‌داری تعیین‌شده (معمولاً ۰/۰۵) باشد، فرض صفر (که می‌گوید تفاوت معنی‌دار نیست) رد می‌شود و نتیجه آزمایش معنی‌دار در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این‌که مقادیر p-value برای حذف COD، حذف TN و کدورت خروجی، صفر است، بیانگر معنی‌دار بودن تفاوت داده‌ها در شرایط آزمایشی مختلف است. به‌عبارت 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.

براساس این داده‌ها، سیستم IFAS در حذف COD، برتری قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به سیستم MBBR دارد. میانگین حذف COD در سیستم IFAS برابر با ۹۴٪ گزارش شده است،

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

95% Confidence Interval of the Difference		Mean Difference	Sig. (2-tailed)	df	T	نوع سیستم	پارامترها
Upper	Lower						
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	۱۲/۵۲۴۰	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	

14- Simultaneous Nitrification and Denitrification

15- Significance (Two-Tailed)

۶- قدردانی

بدین‌وسیله 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.

۷- مراجع

اسدی، آ.، احمدی، ف.، زینتی‌زاده، 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، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2020.230356.1207>

چوپان، ی.، و امامی، س.، (۱۳۹۹)، "بررسی امکان‌سنجی بهره‌گیری از پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری تربت‌حیدریه برای آبیاری محصولات کشاورزی"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۱۵(۱)، ۳۹-۴۵، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2020.154348.1118>

هاشم‌زاده، ف.، و اکبرزاده، ع.، (۱۴۰۱)، "بررسی عملکرد بیورآکتور مستغرق غشایی (SMBR) در تصفیه فاضلاب‌های شهری و نساجی شاهین‌شهر اصفهان"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۷(۳)، ۷۲-۸۴، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2022.324258.1305>

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, <https://doi.org/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, <https://doi.org/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, <https://doi.org/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

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 برای حذف کربن و نیتروژن ارزیابی شد. براساس نتایج به‌دست 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 برای تصفیه فاضلاب از خود نشان داد، هر چند که به‌دلیل نیتریفیکاسیون توسعه‌یافته 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

- Veuillet, F., Lacroix, S., Bausseron, A., Gonidec, E., Ochoa, J., Christensson, M., and 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, <https://doi.org/10.2166/wst.2013.786>.
- Waqas, S., Bilad, 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, <https://doi.org/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, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.02.001>.
- Zhang, X., Xiong, S., Liu, C.X., Shen, L., Wang, S.L., Lang, W.Z., and Wang, Y., (2021), "Smart TFC membrane for simulated textile wastewater concentration at elevated temperature enabled by thermal-responsive microgels", *Desalination*, 500, 114870, <https://doi.org/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, <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.02.034>.
- the operational stability and nitrogen removal efficiency during municipal wastewater treatment", *Chemical Engineering Journal*, 451, 138878, <https://doi.org/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, <https://doi.org/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, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119662>.
- Jalali, F., Zinatizadeh, A., Asadi, A., and Zinatini, 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, <https://doi.org/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, <https://doi.org/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, <https://doi.org/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, <https://doi.org/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", *Bioresour. Technol.*, 260, 44-52, <https://doi.org/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, <https://doi.org/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*, American Public Health Association, Washington DC.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.