



ISSN 2588-3941

نشریه علمی

# علوم و مهندسی آب و فاضلاب

سال دهم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴

نشریه علمی

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

سال دهم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴

انجمن آب و فاضلاب ایران

## پیشگفتار

لزوم پایداری و انعطاف پذیری سامانه های آب و فاضلاب در شرایط بحران  
حسین نایب

## مقالات علمی

- ۲  
۳  
۱۵  
۲۹  
۴۱  
۵۱  
۶۳
- مقایسه عملکرد راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک و لجن فعال تلفیقی با رشد چسبیده برای حذف کربن و مواد مغذی از فاضلاب شهرک های صنعتی  
آذر اسدی و علی فیوضی
- بررسی حذف مواد آلی توسط فرایند انعقاد الکتریکی در صنایع لبنی (مطالعه موردی: شرکت بستنی مهر اصفهان)  
الهام ایزدی نیا و علی نصری
- یافتن محل و مقدار نشت در شبکه های توزیع آب با استفاده از الگوریتم SMA  
مریم نصیری دهج، محمدرضا جلیلی قاضی زاده، ابراهیم جباری و رضا معاشی
- امکان سنجی توانایی ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در حذف زیستی میکروپلاستیک پلی اتیلن از محیط آبی و بهینه سازی پارامترهای مؤثر بر حذف زیستی  
سیدحسام شریف واقفی، رویا مافی غلامی، امید توکلی و حمید مقیمی
- کاربرد هوش مصنوعی مولد در ارزیابی و رتبه بندی عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد سامانه های جمع آوری آب باران  
محمدجواد امامی اسکاردی، رضا هدایتی مرزونی و یاسمن سمائی
- تحلیل اقتصادی و فنی کاهش نشت در شبکه توزیع آب شهری بیرجند  
نوید غلام پور، پویا محمدی، فرشته مدرسی و حسین انصاری

# علوم و مهندسی آب و فاضلاب

سال ۱۰، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴

این نشریه دارای مجوز کمیسیون بررسی نشریات علمی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، به شماره ۱۲۹/۳/۱۸/۲۹۰ مورخ ۱۳۹۵/۱۲/۱۶ و مجوز وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی به شماره ۸۶۰۹۲ مورخ ۱۳۹۸/۱۰/۳۰ است.

انجمن آب و فاضلاب ایران

دکتر مسعود تابش

دکتر علی حقیقی

صاحب امتیاز

مدیر مسئول

سر دبیر

اعضای

هیئت تحریریه



دکتر مسعود تابش: استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران  
دکتر تیکو تانیمبو: دانشیار، دانشگاه ویت واتر سراند، ژوهانسبورگ، آفریقای جنوبی  
دکتر علی ترابیان: استاد دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران  
دکتر افشین تکدستان: استاد دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز  
دکتر محمدرضا جلیلی قاضی زاده: دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی  
دکتر عبدالله رشیدی مهرآبادی: دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی  
دکتر دراگان ساویچ: استاد، دانشگاه اگزتر، انگلستان  
دکتر سید حسین سجادی فر: شرکت آب و فاضلاب تهران و استادیار دانشگاه آزاد اسلامی  
دکتر محمدحسین صراف زاده: استاد دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران و رئیس کرسی یونسکو در باز یافت آب

دکتر حمیدرضا صفوی: استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان  
دکتر ناصر طالب بیدختی: استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شیراز  
دکتر راضیه فرمانی: دانشیار، دانشگاه اگزتر، انگلستان  
دکتر اورازیو گیوستولیسی: استاد، دانشگاه پلی تکنیک باری، ایتالیا  
دکتر سارا نظیف: دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران  
دکتر منوچهر وثوقی: استاد دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف  
دکتر جعفر یزدی: دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

دکتر هاشم امینی: مدیرعامل شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور  
مهندس علی اصغر قانع: رئیس کانون هماهنگی دانش، صنعت، بازار آب و فاضلاب، معاونت علمی ریاست جمهوری  
مهندس مجید قنادی: مدیر دفتر تحقیقات، توسعه فناوری و ارتباط با صنعت، شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور  
مهندس حمیدرضا هنری: عضو هیئت علمی بازنشسته دانشگاه علوم پزشکی تهران

شورای سیاستگذاری

صنعت آب و فاضلاب

ناهید اختری  
ناهید اختری، دکتر سید احمدرضا شاهنگیان  
انجمن آب و فاضلاب ایران  
تهران، خیابان طالقانی، بین وصال و قدس، پلاک ۴۲۹، طبقه ۴، واحد ۷  
۰۲۱-۸۸۹۵۶۰۹۷  
۰۲۱-۸۸۳۹۱۳۹۰  
2588-3941  
2588-396X  
info@jwvse.ir

کارشناس اجرایی:

طراح و صفحه آرا:

ناشر:

آدرس:

تلفن:

نمابر:

شاپا چاپی:

شاپا الکترونیکی:

ایمیل:

لزوم پایداری و انعطاف پذیری سامانه‌های آب و فاضلاب در شرایط بحران.....۲  
حسین نایب

## مقالات علمی

مقایسه عملکرد راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک و لجن فعال تلفیقی با رشد چسبیده.....۳  
برای حذف کربن و مواد مغذی از فاضلاب شهرک‌های صنعتی  
آذر اسدی و علی فیوضی

بررسی حذف مواد آلی توسط فرایند انعقاد الکتریکی در صنایع لبنی (مطالعه موردی: شرکت بستنی مهر اصفهان).....۱۵  
الهام ایزدی‌نیا و علی نصری

یافتن محل و مقدار نشت در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم SMA.....۲۹  
مریم نصیری دهج، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده، ابراهیم جباری و رضا معاشری

امکان‌سنجی توانایی ریز جلبک سندسموس آبلیکوس در حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن.....۴۱  
از محیط آبی و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر حذف زیستی  
سیدحسام شریف‌واقفی، رویا مافی غلامی، امید توکلی و حمید مقیمی

کاربرد هوش مصنوعی مولد در ارزیابی و رتبه‌بندی عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد سامانه‌های جمع‌آوری آب باران.....۵۱  
محمدجواد امامی اسکاردی، رضا هدایتی مرزونی و یاسمن سمائی

تحلیل اقتصادی و فنی کاهش نشت در شبکه توزیع آب شهری بیرجند.....۶۳  
نوید غلام‌پور، پویا محمدی، فرشته مدرسی و حسین انصاری



## لزوم پایداری و انعطاف پذیری سامانه‌های آب و فاضلاب در شرایط بحران



دکتر حسین نایب

پژوهشگر مستقل حوزه آب و محیط زیست و  
عضو هیئت مدیره انجمن آب و فاضلاب ایران

دسترسی به خدمات پایدار و ایمن آب و فاضلاب از مهم‌ترین و اساسی‌ترین حقوق آحاد جوامع انسانی به حساب می‌آید. بدون دسترسی به این خدمات مقوله‌هایی هم‌چون تأمین بهداشت و سلامت عمومی، امنیت غذایی و به‌طور کلی زیست‌پذیری جوامع با تهدیدات عمیق و حیاتی مواجه خواهد شد. در دهه‌های گذشته و در مناطق مختلف کشور، بروز حوادث و رویدادهای طبیعی و انسان‌ساخت، خدمات و شریان‌های حیاتی و زیرساختی، به‌ویژه خدمات آب و فاضلاب را با چالش‌های عدیده‌ای مواجه کرده است. کاهش نزولات جوی و ایجاد وقفه در تأمین آب در برخی از شهرهای کشور، حوادث زلزله و سیل و اثرات آن بر پایداری تأسیسات و خدمات آب و فاضلاب و در نهایت دو جنگ ۱۲ روزه و ۴۰ روزه در سال ۱۴۰۴ از جمله تجربیات و رخدادهای مهمی بوده‌اند که لزوم در نظرگیری و اهمیت بخشی به پایایی و تاب‌آوری سامانه‌های آب و فاضلاب را ضرورت می‌بخشد.

اگرچه موضوع تاب‌آوری سامانه‌های آب و فاضلاب همواره به‌عنوان یک چارچوب علمی-عملیاتی در طراحی، اجرا و بهره‌برداری از این سامانه‌ها مورد توجه مدیران و تصمیم‌گیران بخش آب کشور بوده است، لیکن با توجه به تغییر و توسعه ماهیت تهدیدات، بازنگری در رویکردهای پیشین در این حوزه امری مهم و غیرقابل چشم‌پوشی است. از سوی دیگر به‌واسطه افزایش تکرار و نیز شدت یافتن میزان تهدیدات سامانه‌های آب و فاضلاب، ضرورت دارد که با درس‌آموزی از رخدادهای پیشین و آینده‌نگری تهدیدات آتی، تمرکز و الگوی مقابله با تهدیدات از اقدامات حین و پس از حوادث به اقدامات پیش از حوادث بازتعریف شود. به‌عنوان مثال در رخداد سیل فروردین ۱۳۹۸ حدود ۱۰ استان کشور با آسیب‌های متوسط تا شدید و ۵ استان کشور با آسیب‌های شدید و حتی وقفه چندین روزه در خدمات آب و فاضلاب مواجه شدند. پس از این رخداد کمیته‌های تخصصی دانشگاه و صنعت و هم‌چنین کمیته‌هایی از سازمان‌های مختلف از جمله سازمان پدافند غیرعامل نسبت به جمع‌آوری تجربیات و درس‌آموزی این حوادث اقدام نمودند.

اگرچه دستاوردهای تحقیقاتی و بررسی‌های کمیته‌های مذکور به‌صورت گزارش‌های مدون و جامع به مراجع ذی‌صلاح انعکاس یافت و از حیث ثبت آموخته‌های حوادث قابل‌تمجید بود، لیکن انتظار آن بود که نتایج آن تحقیقات به‌عنوان تجارب عملیاتی صنعت آب و فاضلاب کشور به مدیران و کارشناسان میدانی این صنعت انتقال می‌یافت و براساس این تجربیات، تمهیدات و پیش‌بینی‌های لازم به‌منظور مواجهه مناسب با رخدادهای آتی در دستور کار قرار می‌گرفت. این چرخه در سایر رخدادهای صنعت آب و فاضلاب در سال‌های گذشته تکرار شده است. به‌عنوان یک نمونه دیگر، در وقفه ۱۸ روزه تأمین آب کلان‌شهر همدان در سال ۱۴۰۱ بسیاری از اقدامات پس از وقوع این رخداد صورت پذیرفت و امر آب‌رسانی از منابع جایگزین را طولانی کرد. در صورتی که با بهره‌گیری از تجربیات مشابه دیگر و انطباق آن با شرایط موجود، امکان پیش‌بینی و انجام اقدامات پیش از وقوع رخداد در این مورد مشخص وجود داشت.

از سوی دیگر، راه‌کارها و استراتژی‌های متنوع و قابل‌اتکایی در حوزه افزایش تاب‌آوری و پایایی سامانه‌های آب و فاضلاب وجود دارد که با استفاده از آن‌ها می‌توان اطمینان به عملکرد پایدار سامانه‌ها و خدمات حوزه آب و فاضلاب را ارتقا داد. استفاده از تجهیزات کنترل و پایش شبکه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب، تفکیک نواحی شبکه‌های آب‌رسانی، بازنگری در رویکردهای تمرکزگرایانه و جایگزینی آن با رویکردهای تمرکززدایی در تأسیسات و خدمات آب و فاضلاب، به‌روزرسانی بانک‌های اطلاعاتی و بهره‌گیری از هوش مصنوعی در کنترل و پایش تأسیسات و در نهایت، ارتقای سطح دانش مدیران، کارشناسان و اپراتورها به‌واسطه بازآموزی‌های حین خدمت، ازجمله مهم‌ترین ابزارهای قابل‌استفاده در این زمینه خواهند بود. هم‌چنین استفاده حداکثری از رهنمودها، مقررات و ضوابط پدافند غیرعامل در مراحل انتخاب ساختگاه، طراحی، اجرا و بهره‌برداری از تأسیسات آب و فاضلاب به‌عنوان یکی از پارامترهای اساسی و بنیادین باید بیش‌ازپیش در دستور کار ذی‌مدخلان این حوزه قرار گیرد. اگرچه در حال حاضر، مقوله پدافند غیرعامل در بخش آب کشور از اهمیت و جایگاه قابل‌ملاحظه‌ای در حوزه ستادی برخوردار است، لیکن هم‌چنان در بسیاری از پروژه‌های اجرا شده و در دست اجرای آب و فاضلاب (تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب، ایستگاه‌های پمپاژ، خطوط انتقال و شبکه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب و...)، به‌کارگیری مقررات و رهنمودهای پدافند غیرعامل به‌عنوان امری جانبی و غیراساسی مدنظر قرار می‌گیرد.

در نهایت، آمادگی در مواجهه با بحران‌های پیش رو، از وسعت و شدت آسیب این بحران‌ها خواهد کاست. با توجه به آسیب‌پذیری افراد جامعه از قطع دسترسی به خدمات آب و فاضلاب و اثر عمیق آن بر جوانب مختلف زندگی زیست‌مندان جامعه و با توجه به قرارگیری کشور در کانون بحران‌های طبیعی و انسان‌ساخت، توجه هرچه بیشتر به این مقوله به معنای توجه به حقوق عامه و افزایش رضایت و همراهی عمومی با سیاست‌های کلی کشور به‌ویژه در حوزه آب و فاضلاب خواهد بود.

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 Fiuzy<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 راهبری شده در شرایط یکسان مقایسه شده‌است. 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 راهبری 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 ( $90.7 \pm 20.0$  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  $0.48$  کیلوگرم نیترژن بر مترمکعب در روز و  $1/3-0.7$  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)<sup>۴</sup> 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  $64/42$ ٪،  $58/2$ ٪ و  $53/6$ ٪ برای IFAS، MBBR و MBR گزارش شد که نشان دهنده توانمندی بالاتر سیستم ترکیبی در مقایسه با سیستم های معلق و چسبیده به نهایی 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)<sup>۵</sup>، نسبت پرشدگی (FR)<sup>۶</sup> و شدت جریان هوادهی (AFR)<sup>۷</sup> 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 بیوفیلمی با رشد چسبیده (MBBR)<sup>۱</sup> و فرآیند لجن فعال با رشد تلفیقی (IFAS)<sup>۲</sup> 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

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 شده است. 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 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 به‌طور 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 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 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) ۶۰۰۰ 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 سازگارشدن 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 ( $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ) 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)،

گرم در لیتر راهاندازی 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 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  $Y$ : نشان‌دهنده 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 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 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 نیترژن (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).

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

که  $A$ ,  $B$ ,  $C$  و  $V$ : به‌ترتیب وزن حامل با بیوفیلیم چسبیده به آن (g)، وزن حامل تمیز (g)، تعداد حامل‌ها در بیوراکتور و حجم بیوراکتور (L) بودند.

به‌منظور گزارش زیست‌توده چسبیده برای هر شرایط آزمایشی، مقدار میانگین اندازه‌گیری ۱۰ روزه گزارش شد. هر شرایط آزمایشی طراحی شده به‌مدت 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 IFAS و MBBR 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 درواقع 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 بالا رفتن 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

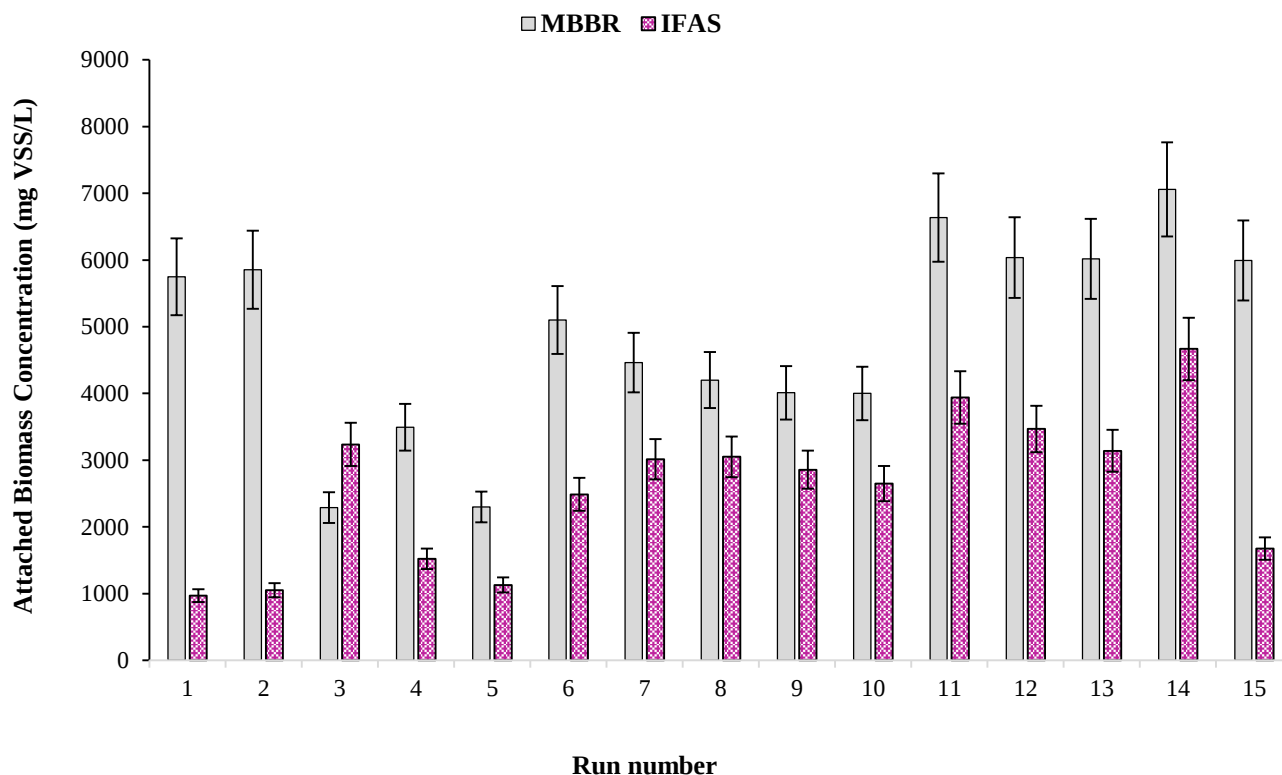
| شرایط | زمان ماند (ساعت) | نسبت پرشدگی (%) | شدت جریان هوادهی (لیتر بر دقیقه) |
|-------|------------------|-----------------|----------------------------------|
| ۱     | ۵                | ۳۰              | ۱                                |
| ۲     | ۵                | ۳۰              | ۴                                |
| 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

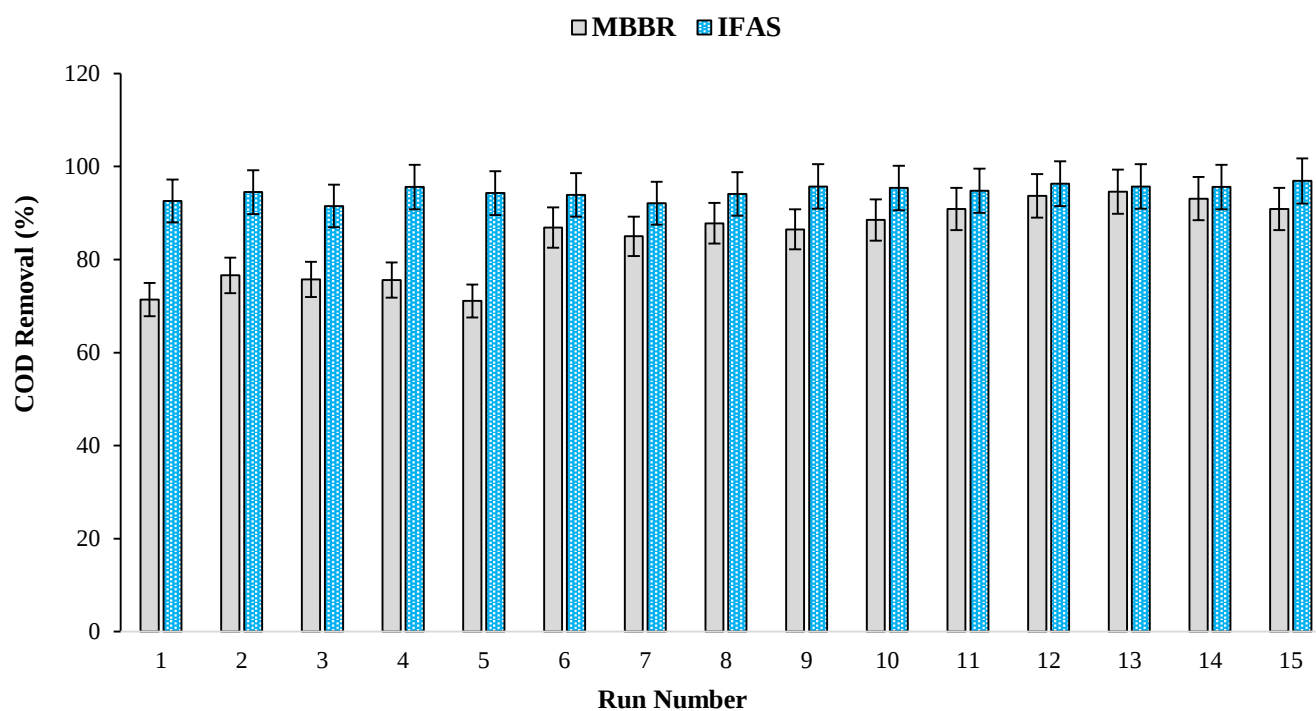
مقادیر COD، BOD، TN، نیترات، نیتريت و نیتروژن آمونیاکی ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) در ورودی و خروجی بیوراکتور با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد (Rice et al., 2012). برای اندازه‌گیری محتوای COD، روش بسته ریفلاکس با روش رنگ‌سنجی در ۶۰۰ نانومتر انجام شد. مقادیر  $\text{N-NH}_4$  با استفاده از روش نسلر با رنگ‌سنجی در ۴۲۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. جذب COD و  $\text{N-NH}_4$  با استفاده از طیف‌سنج نور مرئی Jenway 6320D تعیین شد. غلظت  $\text{N-NO}_3$  با استفاده از طیف‌سنج UV-Vis Agilent 8453 در ۲۲۰ و ۲۷۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. میزان جذب  $\text{N-NO}_2$  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 رواترگازی اندازه‌گیری شد. برای تعیین غلظت زیست‌توده چسبیده، یک حامل به‌طور تصادفی از بیوراکتور انتخاب شده و به‌مدت ۱ ساعت در دمای ثابت ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفت، سپس بعد از رسیدن به دمای محیط وزن شد. در مرحله بعد، حامل کاملاً شسته شد و پس از

میکروارگانیسم‌ها به هردو صورت معلق و چسبیده قابلیت بالتری 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.

داده شده در شکل ۳، سیستم IFAS در شرایط مختلف راهبری، راندمان حذف COD بالتری 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 میکروارگانیسم‌های 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 FR 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 دینتریفیکاسیون 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.

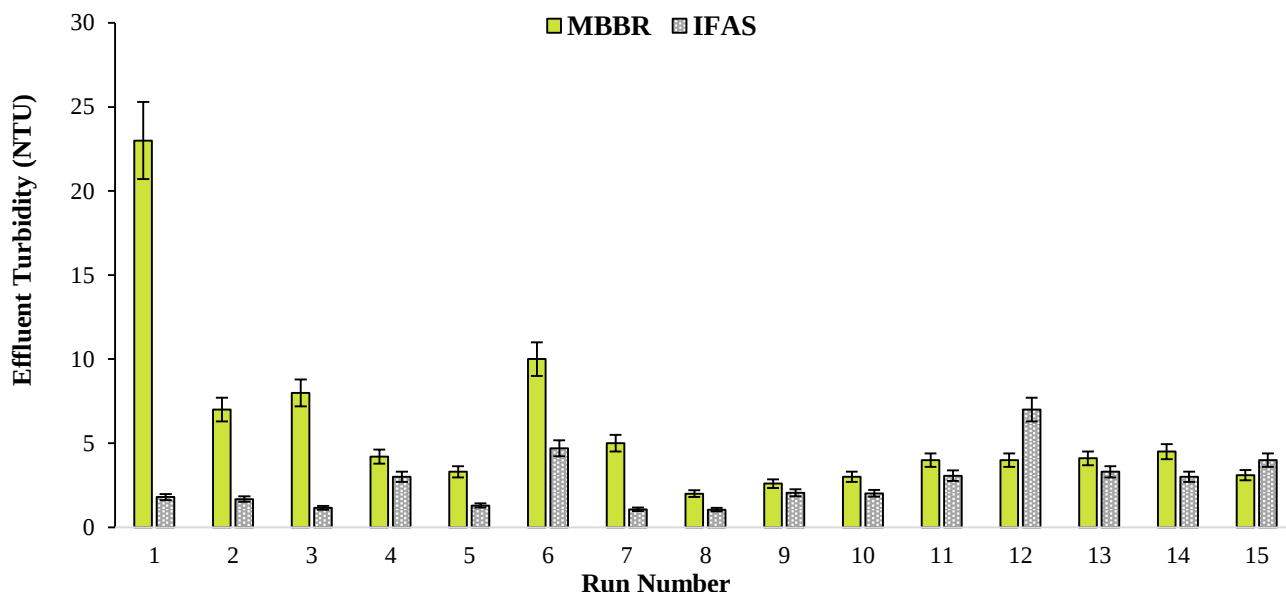
### ۳-۳- کدورت خروجی

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

نیتروژن 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، ۲/۵ لیتر بر دقیقه از AFR و ۷۰٪ 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 است. 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.

برای بررسی اثرات زمان ماند و نرخ هوادهی بر میزان حذف نیتروژن کل، شرایط راهبری ۱۴ و ۱۵ بررسی می‌شود. در شرایط شماره ۱۴ حذف نیتروژن کمتر شده است که به دلیل افزایش مقدار HRT به ۱۵ 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 ۱۵ بیشتر شده است. 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 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 نیتریفیکاسیون 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 نیتریفیکاسیون محدود شده در سیستم MBBR را اثبات می‌کند به طوری که 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 است، 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 است که منجر به عدم دسترسی جمعیت قابل توجهی از میکروارگانیسم‌ها به شرایط مناسب برای تولید نیترات خواهد شد.

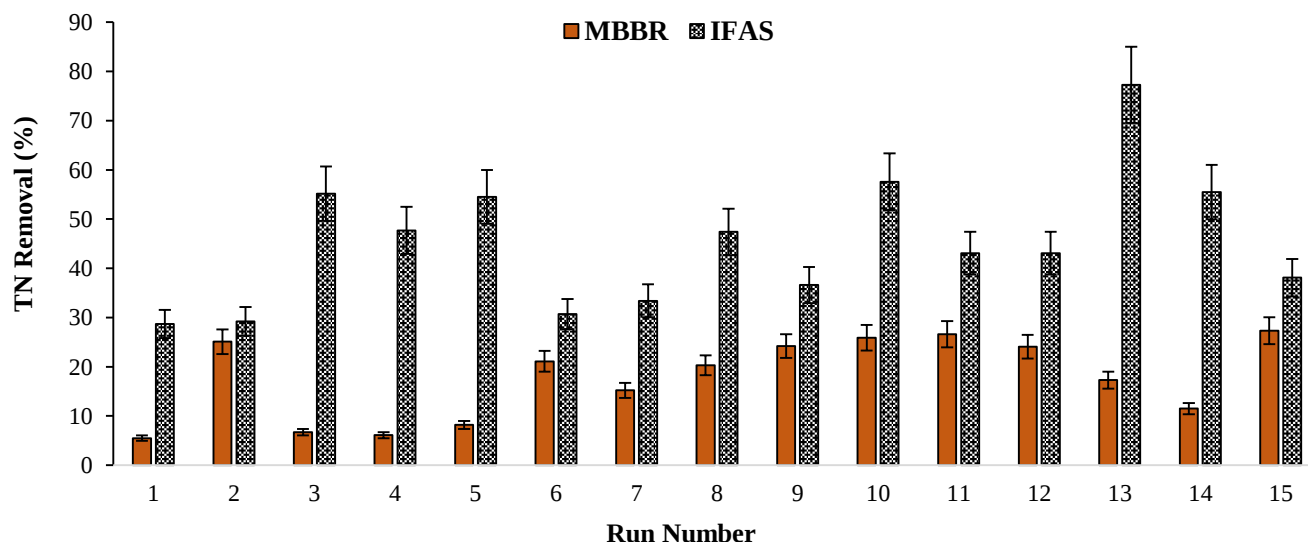
از طرفی بیشترین میزان حذف نیتروژن کل در سیستم IFAS، حدود ۸۰٪ است که در شرایط راهبری ۱۳ با مقادیر ۱۰

### ۳-۵- تحلیل آماری

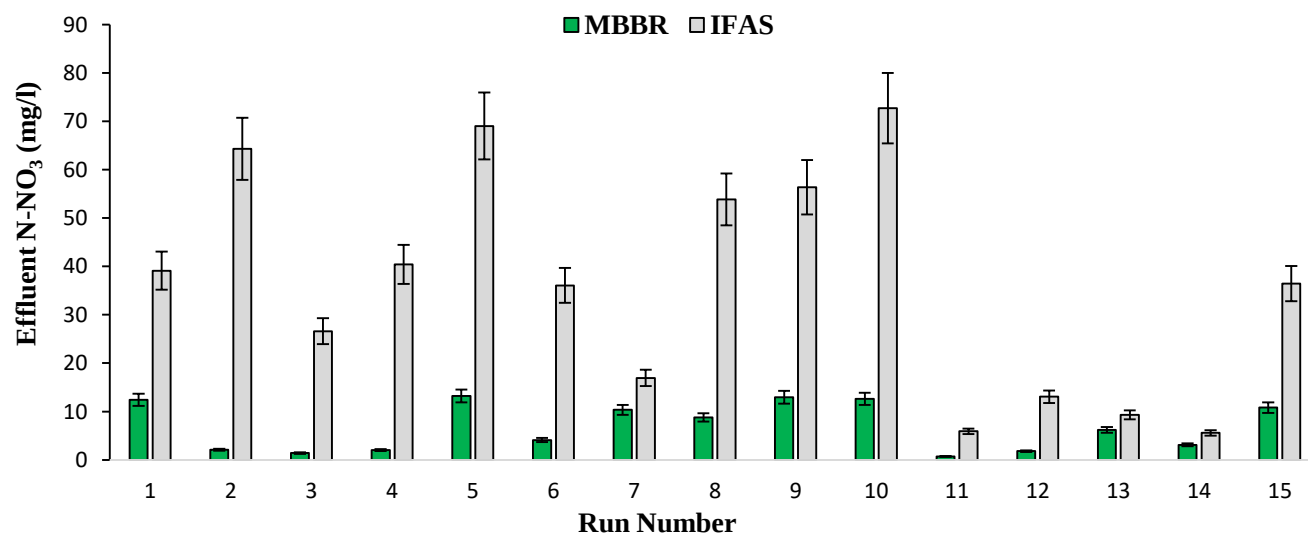
برای بررسی آماری داده‌های به‌دست آمده از هر دو سیستم MBBR و IFAS از نرم‌افزار SPSS استفاده شده است و نتایج حاصله برای بررسی داده‌های حذف COD، حذف TN و کدورت خروجی در هر دو سیستم به‌صورت مجزا در جدول ۲ قابل مشاهده است. "t" در تحلیل‌های آماری، نشان‌دهنده مقدار آزمون t تک‌نمونه‌ای است که براساس آن تصمیم‌گیری می‌شود که آیا تفاوت میانگین‌ها یا نسبت‌ها معنی‌دار است یا خیر. مقادیر بزرگ t برای هر کدام از پاسخ‌ها، نشان‌دهنده تفاوت قابل‌توجه 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.

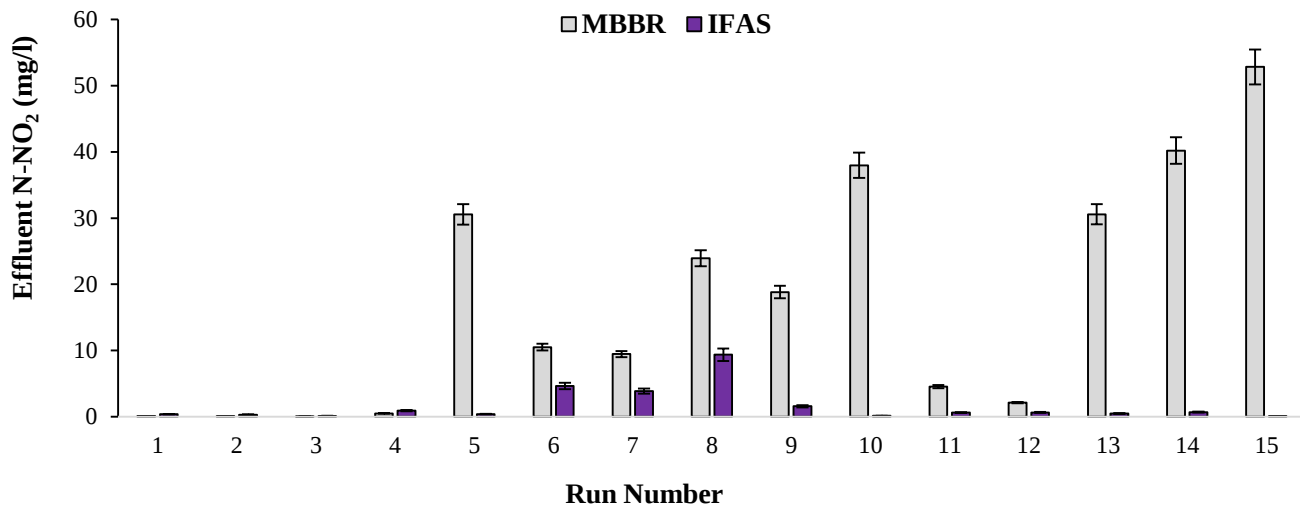
اما برخلاف سیستم IFAS، در شرایط راهبری ۱۵ میزان حذف نیتروژن کل در سیستم MBBR نسبت به شرایط راهبری ۱۳ و ۱۴ افزایش یافته است که نشان‌دهنده میزان حذف بالاتر نیتروژن در بیشترین مقادیر از HRT و AFR است. این نتیجه، محدود شدن فرایند نیتریفیکاسیون را به‌عنوان مرحله کند فرایند هم‌زمانی نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون (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 قابل‌توجه، 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. 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 قابل‌توجهی 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 |         |                 |                 |    |         |           |                  |
|-------------------------------------------|---------|-----------------|-----------------|----|---------|-----------|------------------|
| 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- نتیجه‌گیری

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*، ۵(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., Zinatini, 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., 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, <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", *Bioresource Technology*, 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.

Research Paper

مقاله پژوهشی

## Investigation of Organic Matter Removal by Electrocoagulation Process in Dairy Industry (Case Study: Mehr Ice Cream Company, Isfahan)

## بررسی حذف مواد آلی توسط فرایند انعقاد الکتریکی در صنایع لبنی (مطالعه موردی: شرکت بستنی مهر اصفهان)

Elham Izadinia<sup>1\*</sup> and Ali Nasri<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Civil Engineering Department,  
Faculty of Engineering and Technology, Shahid  
Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran.

2- MSc Graduate, Water and Hydraulic Structures  
Engineering, Shahid Ashrafi Esfahani University,  
Isfahan, Iran.

\*Corresponding Author, Email:  
[elham.izadinia@gmail.com](mailto:elham.izadinia@gmail.com)

الهام ایزدینیا<sup>۱\*</sup> و علی نصری<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه  
شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان، ایران.

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش آب و  
سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان، ایران.

\*نویسنده مسئول، ایمیل: [elham.izadinia@gmail.com](mailto:elham.izadinia@gmail.com)

Received: 15/05/2025

Revised: 05/08/2025

Accepted: 20/08/2025

© IWWA

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹

© انجمن آب و فاضلاب ایران

### Abstract

Dairy industries are high consumers of water, most of which is discharged as wastewater. This study was conducted by constructing a pilot system and performing a laboratory-scale investigation on the removal of organic matter based on carbon in ice cream manufacturing industries over one month using the electrocoagulation process. The reference samples tested were taken from the effluent of the equalization unit of the Mehr ice cream factory located in the Isfahan Jay Industrial Town. In this research, the variables COD, TSS, and BOD concentrations were respectively 8700, 2900, and 6200 mg/L at reaction times of 15, 30, 45, and 60 minutes and pH values of 3, 5, 7, and 9 with current intensities of 0.75, 1.5, 2.25, and 3 amperes. These were evaluated in four electrode arrangements: iron, aluminum, iron and aluminum with equal ratios, and iron to aluminum in a 1:2 ratio as the anode electrode. The results showed that the highest removal efficiencies for COD, BOD, and TSS were at pH 3, with a reaction time of 60 minutes, using a combined iron and aluminum electrode with equal numbers, and a current intensity of 2.25 amperes, achieving removal rates of 89.3%, 95.1%, and 82.5%, respectively.

**Keywords:** Chemical Oxidation, Dairy Industry, Electrocoagulation Process, Wastewater Treatment.

### چکیده

صنایع لبنی، مصرف‌کننده حجم بالایی از آب هستند که بخش اعظم آن به‌صورت فاضلاب دفع می‌شود. این بررسی، با ساخت پایلوت و به‌صورت مطالعه آزمایشگاهی بر حذف مواد آلی بر پایه کربن در صنایع تولید بستنی به‌مدت یک ماه با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی انجام‌شد. نمونه مرجع مورد آزمایش خروجی واحد متعادل‌ساز کارخانه بستنی مهر واقع در شهرک صنعتی جی اصفهان تهیه‌شد. در این تحقیق متغیر غلظت COD، TSS و BOD به‌ترتیب ۸۷۰۰، ۲۹۰۰ و ۶۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر در مدت زمان ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه و pH برابر ۳، ۵، ۷ و ۹ با شدت جریان ۰/۷۵، ۱/۵، ۲/۲۵ و ۳ آمپر در چهار چیدمان الکترود آهن، آلومینیوم، آهن و آلومینیوم با نسبت برابر و آهن و آلومینیوم به نسبت ۱ به ۲ به‌عنوان الکترود آند مورد ارزیابی قرارگرفت. بیش‌ترین راندمان حذف COD، BOD و TSS در pH برابر ۳، با زمان واکنش ۶۰ دقیقه و الکترود ترکیبی آهن و آلومینیوم با نسبت تعداد برابر و در شدت جریان ۲/۲۵ آمپر برابر با درصد ۸۹/۳، ۹۵/۱ و ۸۲/۵ به‌دست آمد.

**کلمات کلیدی:** اکسیداسیون شیمیایی، تصفیه فاضلاب، صنایع لبنیات، فرایند انعقاد الکتریکی.

به صورت متداول از طریق افزودن مواد منعقدکننده آلی، معدنی و غیره به محیط آب و فاضلاب انجام می‌پذیرد. روش ترسیب شیمیایی علی‌رغم سابقه نسبتاً طولانی در تصفیه آب و فاضلاب دارای معایبی از قبیل هزینه بالای بهره‌برداری و تولید لجن شیمیایی و تبعات نامطلوب محیط‌زیستی است. لذا به منظور یافتن راه کارهای مناسب دیگر در راستای جایگزینی فرآیند ترسیب شیمیایی، روش‌های متعددی در سال‌های اخیر مورد توجه و بررسی قرار گرفته است که از این میان می‌توان فرآیند انعقاد الکتریکی و شناورسازی الکتریکی را به عنوان یک نوآوری قابل توجه در صنعت تصفیه سامانه‌های آبی مطرح نمود (پورمحمود و همکاران، ۱۴۰۱). در این روش، با استفاده از جریان الکتریکی و نصب الکترودهای شیمیایی از جنس آلومینیوم، آهن و غیره که به صورت آند و کاتد عمل می‌کنند، ذرات کلوئیدی موجود در فاضلاب از طریق تولید بارهای مثبت الکتریکی از نظر الکتریکی خنثی شده و در نتیجه یون آهن و آلومینیوم و غیره لازم در فرآیند لخته‌سازی فراهم می‌شود (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۲).

شایان ذکر است با طراحی اصولی، این فرآیندهای تصفیه را می‌توان به صورت وسیع در صنعت آب و فاضلاب و تصفیه آب‌های زیرزمینی و سطحی به کار برد. در خصوص شناورسازی الکتریکی می‌توان بیان کرد فرآیندی است که در آن آلاینده‌ها از طریق حباب‌های اکسیژن و هیدروژن تولیدشده از الکترولیز آب بر روی سطح آب شناور می‌شوند. به صورت کلی، در این فرآیند کاتدها گاز هیدروژن و آندها گاز اکسیژن آزاد می‌کنند (Yuliani et al., 2017).

همان‌طور که بیان شد فرآیند انعقاد الکتریکی، یک روش مؤثر است که عامل منعقدکننده در محل توسط اکسیداسیون الکتریکی آند تولید می‌شود (رئوف و ضمیر، ۱۴۰۴). انعقاد الکتریکی شامل تولید ماده منعقدکننده در محلول توسط انحلال الکتریکی یون‌های آلومینیوم یا آهن به ترتیب از الکترودهای آلومینیوم و آهن است. تولید یون‌های فلزی در آند اتفاق می‌افتد و گاز هیدروژن در کاتد رها می‌شود. گاز هیدروژن می‌تواند به شناورسازی ذرات توده‌ای برای خروج از آب کمک کند (Ghazouani et al., 2019). نحوه عملکرد فرآیند انعقاد الکتریکی با استفاده از الکترود آلومینیوم در شکل ۱ نشان داده شده است.

انعقاد الکتریکی شامل سه مرحله موفقیت‌آمیز است:

- ۱- تشکیل ماده منعقدکننده توسط اکسیداسیون الکترود شیمیایی الکترود مصرف‌شونده (آند)؛
- ۲- ناپایدارسازی آلاینده‌ها، سوسپانسیون ذرات و شکستن امولسیون‌ها؛

آب یکی از ملزومات اصلی کارخانه‌ها و صنایع مختلف است. هر صنعت با توجه به تولیدات خود از این مایع حیاتی استفاده می‌کند و بعد از استفاده به عنوان فاضلاب تلقی می‌شود. فاضلاب تولیدی در هر صنعت با توجه به ماهیت آلودگی باید تصفیه شود و داخل منابع پذیرنده تخلیه شود. در این خصوص سازمان حفاظت محیط‌زیست، وظیفه کنترلی دارد تا محیط‌زیست آلوده نشود. از جمله اقدامات این سازمان، ملزم کردن صنایع در خصوص احداث تصفیه‌خانه فاضلاب است. در دهه اخیر اکثر صنایع به دلیل این اهمیت، در حال احداث و بهره‌گیری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب صنعتی هستند. لازم به ذکر است اغلب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب صنعتی به دلیل طراحی نامناسب و غیراصولی با مشکلات بهره‌برداری و کاهش راندمان مواجه هستند که متأسفانه با وجود هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری بالا، کارایی مطلوبی ندارد.

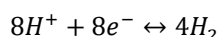
## ۱-۱- نگرش استفاده مجدد از فاضلاب

محدودیت منابع آب در کشورهای خشک و نیمه‌خشک، یکی از مهم‌ترین معضلات موجود در بخش صنعت و کشاورزی است (رضائی، ۱۴۰۱). از این رو استفاده از منابع آبی نامتعارف (از جمله پساب تصفیه‌خانه‌ها) در این کشورها روزبه‌روز از اهمیت بیش‌تری برخوردار می‌شود. کاربرد پساب به عنوان یک منبع دائمی آب در صنعت و کشاورزی، علاوه بر تأمین بخشی از نیازهای آبی این بخش، موجب صرفه‌جویی و دوام منابع آبی موجود نیز می‌شود (نظری و همکاران، ۱۳۹۱). به کارگیری پساب در صنعت و کشاورزی اگرچه با فواید زیادی همراه است، ولی اگر این امر بدون برنامه‌ریزی دقیق و اعمال مدیریت و نظارت صحیح انجام پذیرد، تبعات بسیار مخربی به دنبال دارد (Venzke et al., 2017). به طور کلی روش‌های مختلف استفاده از پساب به شرح زیر است:

- ۱- آبیاری اراضی کشاورزی؛ ۲- ایجاد فضای سبز و درختکاری؛
- ۳- مصارف صنعتی؛ ۴- مصارف شهری؛ ۵- تغذیه مصنوعی سفره‌های زیرزمینی؛ ۶- تخلیه به آب‌های سطحی به شرط خودپالایی رودخانه‌ها؛ ۷- پرورش آبزیان و غیره (Yip et al., 2018).

## ۲-۱- فرآیندهای انعقاد شیمیایی

انعقاد الکتریکی<sup>۱</sup> عبارت است از، تولید مواد منعقدکننده در محل که با استفاده از تجزیه الکتریکی الکترودهای آلومینیوم یا آهن انجام می‌شود. تولید یون‌های فلزی در آند و گاز هیدروژن در کاتد انجام می‌گیرد. فرآیند انعقاد و لخته‌سازی متأسفانه امروزه



(۸)

۳- تجمع فاز ناپایدار شده و تشکیل لخته.

از دیگر مزایای این روش حذف فلزات سنگین بین ۸۰٪ الی ۱۰۰٪ و حذف کدورت بیش از ۹۰٪ و امکان بازیابی ذرات رسوب و استفاده مجدد از آب تصفیه شده است (Geraldino et al., 2015).

### ۳-۱- فاضلاب صنایع لبنیات

صنایع لبنی، صناعی هستند که در آن‌ها شیر را به عنوان ماده اولیه دریافت کرده و سپس طی فرآیندهای صنعتی، به محصولات و فرآورده‌های مختلف از قبیل ماست، دوغ، شیر پاستوریزه، بستنی، خامه، کره و پنیر تبدیل می‌شود. فاضلاب صنایع لبنی دارای میزان بسیار زیادی چربی محلول و غیرمحلول است. وجود مقدار بالا از کربوهیدرات‌ها، لیپید و پروتئین از مهم‌ترین ویژگی‌های فاضلاب صنایع لبنی است. میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) و بیولوژیکی (BOD) آن بسیار بالا بوده و ذرات جامد معلق (TSS) فراوانی دارد. به‌طور کلی می‌توان در یک کارخانه صنایع لبنی با تولیداتی مانند شیر، ماست و دوغ، جدول ۱ را ملاک طراحی تصفیه‌خانه فاضلاب قرار دارد (Melchioris et al., 2016).

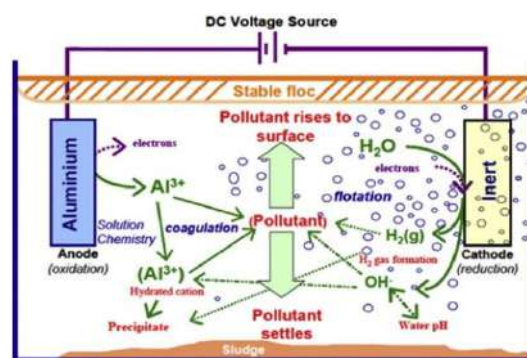
جدول ۱- مقادیر مواد آلی موجود در فاضلاب لبنیات

| پارامتر        | مقدار (میلی گرم بر لیتر) |
|----------------|--------------------------|
| COD            | ۲۵۰۰-۳۰۰۰                |
| BOD            | ۲۰۰۰-۱۲۰۰                |
| TSS            | ۹۶۰                      |
| Oil and Grease | ۳۵۰-۲۰۰                  |
| pH             | ۱۰-۷                     |

تصفیه فاضلاب صنایع لبنی با توجه به ماهیت و نوع تولیدات آن مانند شیر، ماست، دوغ، پنیر و بستنی در مرحله اول توسط روش‌های فیزیکی، شیمیایی و در مرحله دوم توسط روش‌های بیولوژیکی صورت می‌گیرد. به‌طور کلی منابع تولید فاضلاب در این کارخانجات را می‌توان در دو بخش اصلی شست‌وشوی مخازن در محل دریافت شیر و شست‌وشوی شیرآلات، لوله‌ها و دیگر تأسیسات خلاصه نمود.

### ۴-۱- پیشینه تحقیق

Benazzi et al. (2016) تصفیه فاضلاب صنعتی صنایع لبنیات را با استفاده از پایلوت پیوسته انعقاد الکتریکی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها فاضلاب صنایع لبنی را با بار آلی بسیار بالا که

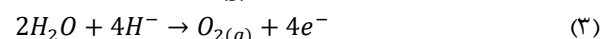


شکل ۱- نحوه عملکرد فرایند انعقاد الکتریکی با الکتروود آلومینیوم

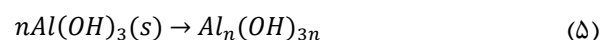
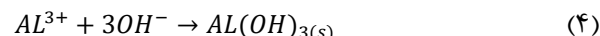
واکنش اصلی برای آند آلومینیومی به صورت رابطه (۱) است:



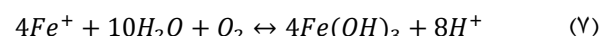
الکترولیز آب نیز در کاتد و آند مطابق روابط (۲) و (۳) رخ می‌دهد.



بعلاوه یون‌های فلزی تولید شده در آند و یون‌های هیدروکسید تولید شده در سطح الکتروودها در محلول پساب واکنش نشان می‌دهند و هیدروکسیدهای متنوعی تشکیل می‌دهند و در نتیجه شبکه‌های بزرگی را می‌سازند (رابطه‌های (۴) و (۵)).



یون‌های آلومینیوم در حال رشد، منعقدکننده‌های بسیار مؤثری برای منعقد کردن ذرات هستند. یون‌های آلومینیوم آب کافت شده می‌توانند شبکه‌های بزرگی از پیوندهای  $Al-O-(Al-OH)$  را تشکیل دهند، که می‌توانند آلاینده‌ها را به صورت شیمیایی جذب کنند (Ghazouani et al., 2019). هم‌چنین واکنش اکسیداسیون و احیا به ترتیب در الکتروودهای آهنی آند و کاتد در روابط (۶) الی (۸) بیان شده است.



فاضلاب پارامترهای مختلف کیفیت آب، برای هر ترکیب الکتروود مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و بهترین ترکیب ممکن شناسایی شد. در میان الکتروودهای آلیاژی انتخابی، AC10 برای تصفیه پساب لبنیات با کدورت و حذف COD به ترتیب  $3/21 \pm 86/64$  درصد و  $0/92 \pm 98/29$  درصد با زمان واکنش محدود ۵۴ دقیقه و حداقل اتلاف الکتروود را به‌عنوان آلیاژ بهینه معرفی کردند.

Asaithambi et al. (2023) پارامترهای عملیاتی تصفیه فاضلاب صنعتی با استفاده از فرآیند انعقاد الکتریکی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که فرآیند انعقاد الکتریکی با گردش مجدد، این پتانسیل را دارد که راه‌حل امیدوارکننده‌تری برای مشکل حذف آلاینده‌ها از پساب و پساب صنعتی باشد و تحت شرایط بهینه، فاضلاب تصفیه‌شده را می‌توان به‌طور کامل به‌عنوان آب تمیز بازیابی کرد. در این بررسی حذف رنگ  $100\%$ ، حذف COD  $99/90\%$  با ترکیب الکتروودهای Fe/Fe در زمان ۱۸۰ دقیقه به‌دست آمد.

Boinpally et al. (2023) ضمن معرفی فرآیند انعقاد الکتریکی، بیان کردند انعقاد الکتریکی (EC) یکی از این فناوری‌هایی است که پایه گسترده، بسیار قابل‌اعتماد و مقرون‌به‌صرفه است. همچنین دارای راندمان حذف آلاینده بالایی است و در مقایسه با سایر تکنیک‌ها لجن کم‌تری تولید می‌کند. علاوه‌بر آن به‌طور مؤثر برای تصفیه طیف گسترده‌ای از فاضلاب استفاده می‌شود و عوامل مختلف عملیاتی مانند pH، چگالی جریان، رسانایی محلول، مواد الکتروود و شرایط اختلاط بر سیستم انعقاد الکتریکی تأثیر می‌گذارند. (TriGueros et al. (2023) انعقاد الکتریکی بهینه به‌عنوان یک فرآیند تصفیه صنایع لبنیات پس از تصفیه اکسیداسیون فتوشیمیایی را معرفی کرده و از مزایای این روش، به حداقل مصرف انرژی الکتریکی و سمیت کم‌تر فاضلاب لبنیات اشاره نمودند.

Saeed et al. (2023) فاضلاب تولیدی از پالایشگاه روغن نباتی در کشور عراق را با استفاده از ترکیب فرآیند انعقاد الکتریکی و اکسیداسیون پیشرفته مورد ارزیابی قرار دادند. از نتایج این تحقیق می‌توان به حذف  $98\%$  COD موجود در این فاضلاب اشاره کرد. در انتها این محققین کاربرد فرآیند انعقاد الکتریکی و الکترواکسیداسیون متوالی را برای این‌گونه فاضلاب‌ها پیشنهاد کردند.

Ankoliyam et al. (2023) مطالعات انجام‌شده توسط محققین مختلف درخصوص فرآیند انعقاد الکتریکی در تصفیه فاضلاب صنایع لبنیات را جمع‌آوری و مقایسه‌ای در این خصوص ارائه نمودند. در این تحقیق شدت جریان، زمان الکتروولیز، pH، هدایت، دما، جنس الکتروود را به‌منظور حذف مواد آلی بر پایه

عمدتاً حاوی چربی، پروتئین و محصولات تجزیه میکروبی است، معرفی کردند. این محققین با تغییر در ولتاژ، فاصله الکتروودها و زمان ماند هیدرولیکی حذف کدورت، رنگ و کل کربن آلی را بررسی نمودند. از یافته‌های این تحقیق به‌دست آمدن زمان ماند بهینه ۹۰ دقیقه، مقدار ولتاژ ۱۰ ولت و فاصله بین الکتروودها به میزان یک سانتی‌متر بود. در این شرایط راندمان حذف رنگ، کدورت و کربن آلی به ترتیب ۹۴، ۹۳ و ۶۵ درصد به‌دست آمد. (Ates et al. (2017 با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و بالابردن کیفیت پساب فاضلاب صنایع لبنیات، از تلفیق فرآیند غشایی و انعقاد الکتریکی استفاده نمودند. این پژوهشگران با بررسی الکتروودهای آهن و آلومینیوم، حذف کربن آلی و پروتئین را از فاضلاب ارزیابی داشتند. همچنین برای کاهش ذرات معلق و فیلتراسیون غشایی این فرآیند را بهبود بخشیدند. از یافته‌های این تحقیق بازده حذف پروتئین در الکتروود آلومینیوم به میزان  $83/8$  درصد و حذف کربن آلی در الکتروود آهن به میزان  $86/4$  درصد مشاهده شد.

Reilly et al. (2019) تصفیه فاضلاب صنایع لبنیات و کشتارگاه را با استفاده از روش انعقاد الکتریکی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تصفیه فاضلاب لبنیات و کشتارگاه را به‌دلایلی از جمله حجم بالای فاضلاب تولیدی، نیاز به تزریق مواد مغذی و ریزمغذی و کربن آلی بسیار بالا برای حفاظت از محیط‌زیست ضروری دانست.

Gerson et al. (2020) فاضلاب صنایع لبنی را با استفاده از روش انعقاد الکتریکی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش که در مقیاس واقعی انجام شد، با ابعاد صفحه  $15 \times 100 \times 130$  میلی‌متر و تعداد ۴ صفحه و استفاده از جریان مستقیم ۸۲ آمپر توانستند در مدت زمان ۱۰ دقیقه فرآیند تصفیه را تکمیل کنند. محققین میزان حذف COD را  $50/4$  درصد و کدورت پساب را در حدود  $99/8\%$  در این آزمایش‌ها بیان داشتند.

TriGueros et al. (2022) امکان‌سنجی محیط‌زیستی و اقتصادی تصفیه پساب صنایع لبنی با فرآیند فتوفنتون و انعقاد الکتریکی را مورد بررسی قرار دادند. از نتایج این تحقیق می‌توان به پتانسیل مطلوب هر دو فرآیند نام برد که با اعمال پارامترهای بهره‌برداری بهینه به هر دو این امکان داده می‌شود تا حذف مواد آلی با بهره‌وری انرژی و حداقل هزینه عملیاتی به حداکثر برسد. (Krishna et al. (2022 توسعه و کاربرد الکتروودهای آلیاژ آلومینیوم - مس برای تصفیه فاضلاب لبنیات با استفاده از فرآیند انعقاد الکتریکی را بررسی کردند. در این بررسی بیان شد تصفیه فاضلاب لبنیات از طریق انعقاد الکتریکی یکی از فن‌آوری‌هایی است که به‌سرعت در حال ظهور است. همچنین راندمان تصفیه

بررسی قرارداد دهد. روش تاگوچی نه تنها موجب کاهش تعداد آزمایشات می شود، بلکه به طور غیرمستقیم به کاهش هزینه های کلی از نظر زمان و هزینه عملیاتی کمک بسیاری می کند. انتخاب فاکتورهای قابل کنترل و تعیین سطوح آن ها از مهم ترین مراحل روش طراحی آزمایش است. جدول ۲ طرح آزمایش های این بررسی را در سطوح مختلف نشان می دهد.

جدول ۲- طرح آزمایش های با فرآیند انعقاد الکتریکی

| پارامتر     | واحد | حالت های مختلف متغیر  |
|-------------|------|-----------------------|
| COD/BOD/TSS | mg/L | ۸۷۰۰/۶۲۰۰/۴۳۵۰        |
| زمان        | min  | ۶۰، ۴۵، ۳۰، ۱۵        |
| pH          | --   | ۹، ۷، ۵، ۳            |
| الکتروند    | --   | Fe-2Al، AL، Fe-Al، Fe |
| شدت جریان   | آمپر | ۳، ۲/۲۵، ۱/۵، ۰/۷۵    |

به منظور بررسی فرآیند انعقاد الکتریکی در راستای تصفیه فاضلاب صنایع لبنی، نمونه آزمایشگاهی با حجم مفید ۵۰ لیتر و با فرآیند منقطع ساخته شد. در این مطالعه از فاضلاب صنعتی شرکت بستنی مهر واقع در شهرک صنعتی جی اصفهان در پایلوت استفاده شد و هدف آن کاهش بار آلاینده های این واحد به منظور بررسی تخلیه پساب به تصفیه خانه مرکزی آن شهرک بود. در شکل ۲ نمونه ساخته شده این پایلوت به همراه شماتیک آن و همچنین منبع تغذیه جریان الکتریکی مورد استفاده، ارائه شده است. در این نمونه، تعداد صفحات الکتروند ۴۰ صفحه به فاصله ۱ سانتی متری با ابعاد مستغرق ۲۰ در ۲۰ سانتی متر با جریان موازی طراحی شد. به ترتیب آندها و کاتدها به صورت یک درمیان به منبع تغذیه متصل شدند. در این پایلوت امکان تغییر جریان به وسیله پل ها میان صفحات آلومینیومی و آهنی وجود دارد.

کربن به عنوان پارامترهای بهره برداری، مورد تحلیل قرار دادند. Faraj et al. (2024) مطالعه ای با هدف بررسی اثربخشی ترکیب انعقاد الکتریکی با جذب بر روی زئولیت طبیعی برای تصفیه فاضلاب صنایع لبنی انجام دادند. در این خصوص چندین پارامتر عملیاتی، از جمله pH اولیه (۵-۹)، زمان واکنش (۱۵-۴۵ دقیقه)، شدت جریان ۱۲-۴۸ آمپر بر سطح الکتروند و دوز زئولیت (۰/۰ - ۱۵/۰۸۳ گرم در میلی لیتر) مورد بررسی قرار گرفت. این محققین شرایط بهینه به منظور حذف مواد آلی (۹۲٪ حذف COD و ۹۷٪ حذف کدورت) را در زمان ۲۰ دقیقه با شدت جریان ۳۸ آمپر و دوز زئولیت ۰/۱۸۳ گرم بر میلی لیتر به دست آوردند.

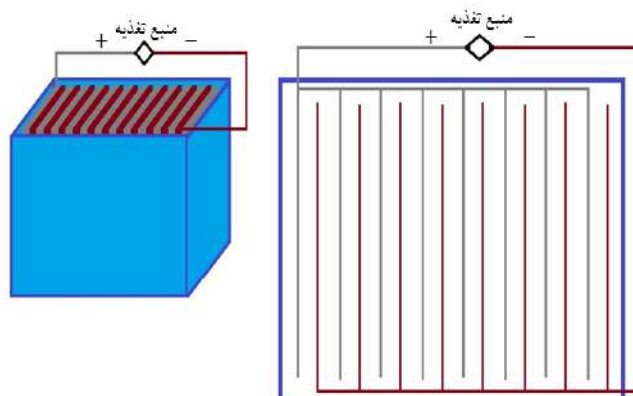
مطالعات گذشته نشان می دهد ابعاد مدل ها در مقیاس آزمایشگاهی و در حجم کم تر از ۵ لیتر انجام شده است. در تحقیق حاضر، روش انعقاد الکتریکی در تصفیه پساب لبنی؛ به صورت موردی صنعت بستنی و در مقیاس پایلوت ارزیابی شد. در مطالعه حاضر تأثیر پارامترهای شدت جریان، pH، زمان واکنش، جنس الکتروند و نحوه چیدمان آن بر راندمان روش انعقاد الکتریکی در مقیاس پایلوت ارزیابی شد.

## ۲- مواد و روش ها

در این بخش ضمن معرفی ضوابط تخلیه فاضلاب صنایع به تصفیه خانه های متمرکز در شهرک های صنعتی جی اصفهان، طرح آزمایش ها و مشخصات پایلوت مورد استفاده در این بررسی بیان می شود. در این تحقیق به منظور طراحی آزمایشات از روش تاگوچی استفاده شد (Taguchi, 1986) که یک روش آماری بسیار قوی است که توسط تاگوچی در دهه ۱۹۵۰ معرفی شد. این روش با بهره گیری از آرایه های متعامد، قادر است که در طی آزمایشات کمتری، شرایط بهینه و تأثیر پارامترهای مؤثر بر سیستم را مورد



(ب)



(الف)

شکل ۲- (الف) شماتیک پایلوت؛ و (ب) نمایی از پایلوت مورد مطالعه و منبع تغذیه به روش انعقاد الکتریکی

استفاده شد.

$$Efficiency = \frac{S_{in} - S_{out}}{S_{in}} \times 100 \quad (9)$$

که  $Efficiency$ : راندمان برحسب درصد،  $S_{in}$ : غلظت اولیه برحسب  $mg/l$  و  $S_{out}$ : غلظت ثانویه برحسب  $mg/l$  است.

### ۳- نتایج تحقیق

در این بخش، ارائه نتایج حاصل از راندمان فرآیند انعقاد الکتریکی درخصوص حذف بار آلی فاضلاب صنایع بستنی‌سازی بیان می‌شود. با توجه به چیدمان طرح آزمایش به‌روش تاگوچی، تمامی آزمایش‌ها مطابق با طرح آن انجام گرفت و راندمان حذف پارامترهای COD، BOD، TSS و همچنین نسبت COD/BOD به‌دست آمد.

#### ۳-۱- راندمان حذف COD، BOD و TSS

نتایج حاصل، مطابق با طرح آزمایش روش تاگوچی درخصوص راندمان حذف پارامترهای COD، BOD و TSS از فاضلاب تهیه‌شده از صنعت تولید بستنی به‌ترتیب در این بخش بیان شد. به‌منظور تعیین اثر هر یک از پارامترها بر راندمان حذف پارامترهای COD، BOD و TSS تمامی آزمایش‌ها در پیلوت مورد بررسی و در شرایط یکسان با مدت‌زمان انجام واکنش مطابق با طرح آزمایشات و زمان ته‌نشینی ۳۰ دقیقه‌ای به‌منظور جداسازی کلوئیدهای تشکیل‌شده انجام شد و درنهایت بعد از اتمام این مراحل، برای تعیین شاخص مورد نظر نمونه‌برداری صورت گرفت. نتایج این بخش به‌ترتیب در جدول ۵ و شکل‌های ۳ الی ۵ ارائه شده است.

بررسی اثرات متقابل pH، زمان واکنش، شدت جریان و جنس الکترود بر عملکرد پیلوت انعقاد الکتریکی نشان داد که بیش‌ترین درصد حذف COD (۸۹/۳٪) در شرایط بهینه شامل pH برابر ۳، زمان واکنش ۶۰ دقیقه، شدت جریان ۲/۲۵ آمپر و استفاده از الکترود ترکیبی آهن-آلومینیوم (Fe-2Al) حاصل شد. در مقابل، کم‌ترین راندمان حذف (۵۰/۹٪) در شرایط pH برابر ۵، زمان واکنش ۳۰ دقیقه و شدت جریان ۱/۵ آمپر با همان چیدمان الکترودی مشاهده شد. در میان متغیرهای بررسی‌شده، pH نقش مؤثرتری نسبت به زمان واکنش و شدت جریان در کنترل واکنش‌های اکسیداسیون ایفا کرد، به‌گونه‌ای که در محیط‌های اسیدی‌تر (به‌ویژه در pH برابر با ۳) واکنش‌های یونی به‌طور مؤثرتری رخ داده و راندمان حذف افزایش یافت.

#### ۲-۱- ضوابط تخلیه فاضلاب صنعتی به شبکه تصفیه‌خانه

در این پژوهش به‌منظور بررسی اطلاعات و داده‌های به‌دست‌آمده از نتایج تحقیق حاضر با استانداردهای تخلیه فاضلاب صنعتی به شبکه جمع‌آوری شهرک صنعتی و تصفیه‌خانه، مقایسه‌ای صورت گرفت. در جدول ۳، مقادیر استاندارد تخلیه به شبکه و تصفیه‌خانه شهرک صنعتی جی بیان شده است. واحدهای صنعتی که دارای بار آلی بالاتر از این استاندارد باشند باید قبل از تخلیه به شبکه جمع‌آوری، از پیش تصفیه استفاده نمایند و بعد از کاهش بار آلی مجوز تخلیه فاضلاب صنعتی صادر می‌شود.

جدول ۳- مقادیر حداکثر مجاز آلاینده‌های فاضلاب واحد صنعتی برای تخلیه به تصفیه‌خانه

| پارامتر          | مقدار     | واحد |
|------------------|-----------|------|
| COD              | ۲۰۰۰      | mg/L |
| BOD <sub>5</sub> | ۱۰۰۰      | mg/L |
| pH               | ۸/۶-۵/۵   | ---  |
| چربی و روغن      | ۵۰        | mg/L |
| سولفات‌ها        | ۴۰۰       | mg/L |
| TSS              | ۳۰۰       | mg/L |
| TDS              | ۳۰۰۰      | mg/L |
| Cl <sup>-</sup>  | ۶۰۰       | mg/L |
| دترجنت‌ها        | در حد صفر | mg/L |

#### ۲-۲- دستگاه اندازه‌گیری آزمایشات کیفی

به‌منظور اندازه‌گیری آزمایشات مورد بررسی، از دستگاه‌های مختلف مطابق با استاندارد متد و استاندارد سازنده این تجهیزات استفاده شد. در جدول ۴، مشخصات کلی این دستگاه‌ها آورده شده است.

جدول ۴- مشخصات دستگاه‌های مورد استفاده به‌منظور انجام آزمایشات

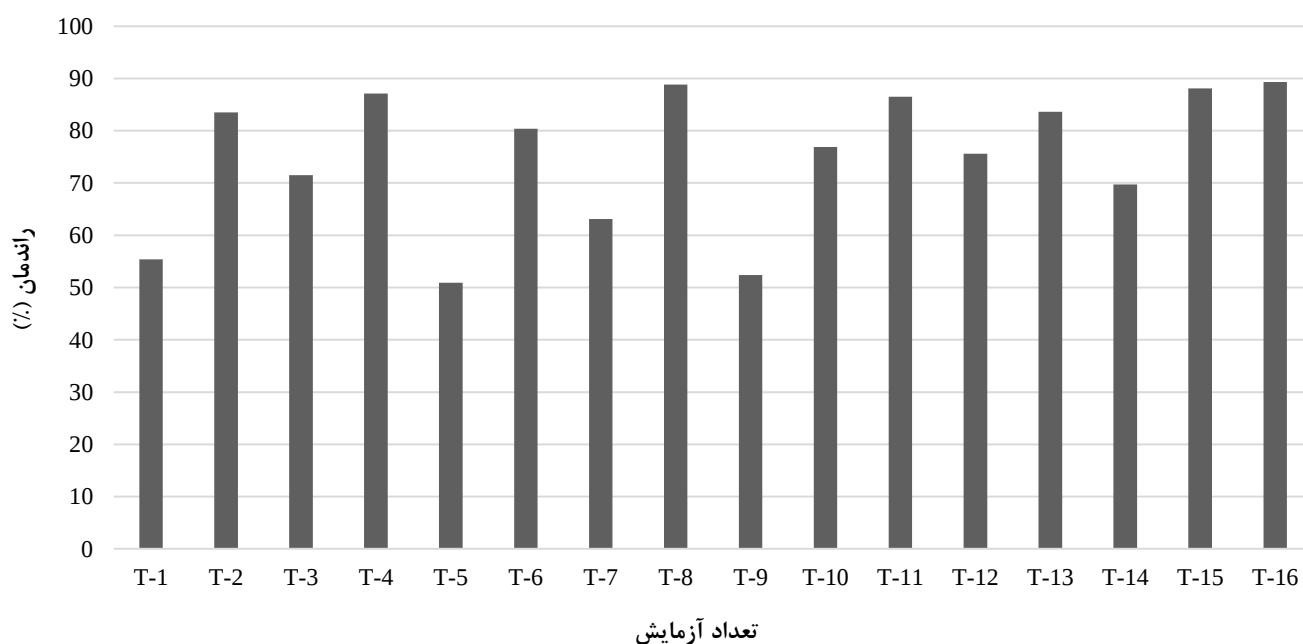
| اسم دستگاه  | توضیحات                             |
|-------------|-------------------------------------|
| BOD سنج     | مدل AL606 برند آکوالیتیک آلمان      |
| COD سنج     | مدل AL250 برند آکوالیتیک آلمان      |
| MultiDirect | دستگاه نورسنجی برند آکوالیتیک آلمان |
| pH سنج      | مدل AL20pH برند آکوالیتیک آلمان     |
| EC سنج      | مدل AL20con برند آکوالیتیک آلمان    |

#### ۲-۳- محاسبه راندمان حذف مواد آلی

باتوجه به این‌که هدف اصلی این تحقیق، بررسی راندمان حذف رنگ و COD از فاضلاب خام صنایع لبنی بود، در مدت‌زمان انجام آزمایش پارامترهای مذکور، راندمان حذف از رابطه (۹)

جدول ۵- نتایج حاصل از درصد حذف پارامترهای کیفی منطبق با چیدمان طرح آزمایش تاگوچی

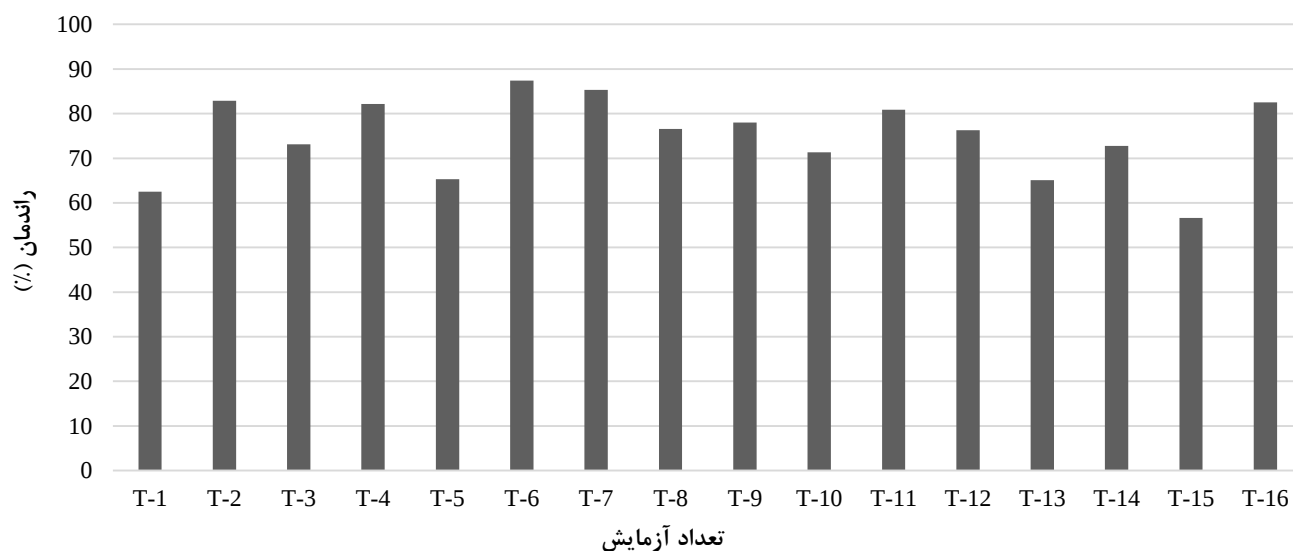
| ردیف | pH | زمان واکنش (min) | جنس الکترود آند | شدت جریان | درصد حذف COD | درصد حذف TSS | درصد حذف BOD |
|------|----|------------------|-----------------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| ۱    | ۳  | ۱۵               | Fe              | ۰/۷۵      | ۵۵/۴         | ۶۲/۵         | ۶۸/۱         |
| ۲    | ۵  | ۱۵               | Fe-2Al          | ۲/۲۵      | ۸۳/۵         | ۸۲/۹         | ۸۲/۹         |
| ۳    | ۷  | ۱۵               | Fe-Al           | ۳         | ۷۱/۵         | ۷۳/۱         | ۹۳/۷         |
| ۴    | ۹  | ۱۵               | Al              | ۱/۵       | ۸۷/۱         | ۸۲/۲         | ۹۴/۸         |
| ۵    | ۵  | ۳۰               | Fe-Al           | ۱/۵       | ۵۰/۹         | ۶۵/۳         | ۶۱/۶         |
| ۶    | ۳  | ۳۰               | Al              | ۳         | ۸۰/۴         | ۸۷/۴         | ۸۱/۹         |
| ۷    | ۹  | ۳۰               | Fe              | ۲/۲۵      | ۶۳/۱         | ۸۵/۳         | ۷۶/۳         |
| ۸    | ۷  | ۳۰               | Fe-2Al          | ۰/۷۵      | ۸۸/۸         | ۷۶/۶         | ۷۳/۵         |
| ۹    | ۷  | ۴۵               | Al              | ۲/۲۵      | ۵۲/۴         | ۷۸           | ۹۳/۹         |
| ۱۰   | ۹  | ۴۵               | Fe-Al           | ۰/۷۵      | ۷۶/۹         | ۷۱/۳         | ۷۴/۳         |
| ۱۱   | ۳  | ۴۵               | Fe-2Al          | ۱/۵       | ۸۶/۵         | ۸۰/۹         | ۹۳/۳         |
| ۱۲   | ۵  | ۴۵               | Fe              | ۳         | ۷۵/۶         | ۷۶/۳         | ۹۴/۵         |
| ۱۳   | ۹  | ۶۰               | Fe-2Al          | ۳         | ۸۳/۶         | ۶۵/۱         | ۸۰/۵         |
| ۱۴   | ۷  | ۶۰               | Fe              | ۱/۵       | ۶۹/۷         | ۷۲/۸         | ۷۴/۱         |
| ۱۵   | ۵  | ۶۰               | Al              | ۰/۷۵      | ۸۸/۱         | ۵۶/۶         | ۸۲/۳         |
| ۱۶   | ۳  | ۶۰               | Fe-Al           | ۲/۲۵      | ۸۹/۳         | ۸۲/۵         | ۹۵/۱         |



شکل ۳- نمودار درصد حذف COD منطبق با چیدمان طرح آزمایش تاگوچی

افزایش جریان با حفظ پایداری نسبی در راندمان همراه بود. به‌طور کلی، ترکیب الکترود Fe-2Al در کنار اسیدیته پایین و زمان کافی واکنش، مؤثرترین عوامل در بهبود کارایی حذف COD در این فرایند بودند.

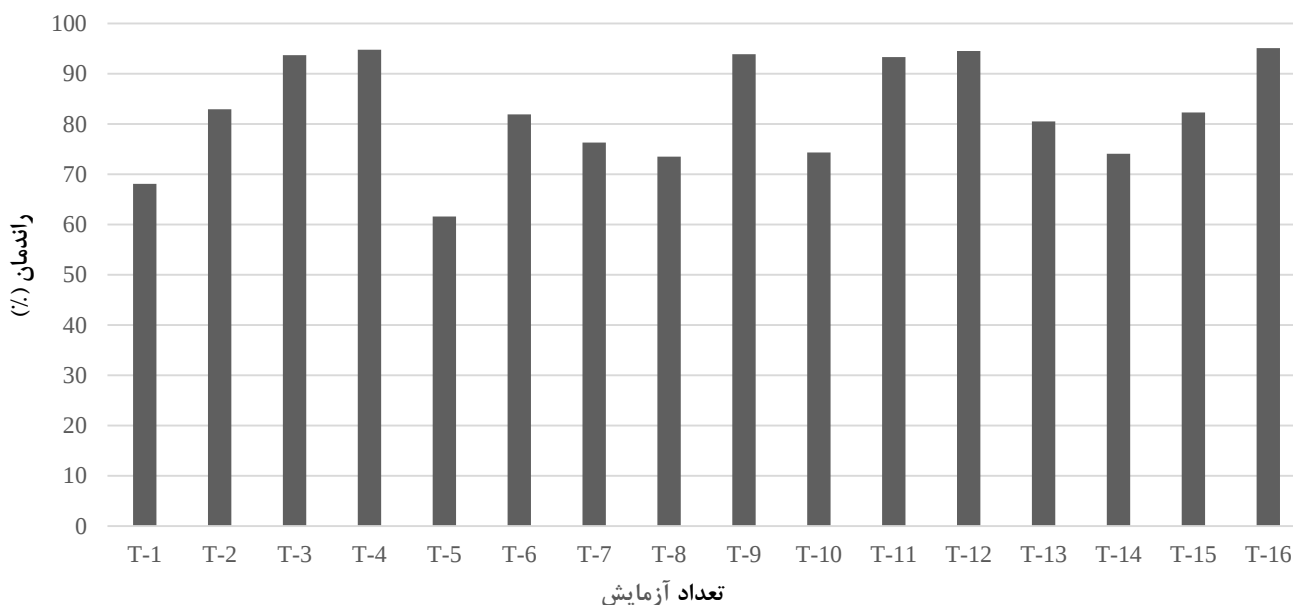
همچنین نتایج نشان داد، الکترودهای ترکیبی Fe-2Al در مقایسه با چیدمان‌های صرفاً آهنی، در اکثر شرایط، عملکرد بهینه‌تری داشتند، به‌ویژه در زمان‌های کوتاه و شدت جریان‌های مختلف. اگرچه افزایش شدت جریان به‌طور مطلق منجر به افزایش راندمان حذف نشد، اما در برخی چیدمان‌ها (نظیر Fe-2Al)



شکل ۴- نمودار درصد حذف TSS منطبق با چیدمان طرح آزمایش تاگوچی

در شدت جریان‌های بالا، راندمان بالاتری داشت. چیدمان الکترو د ترکیبی Fe-2Al نیز در بسیاری از شرایط، به خصوص در pH پایین و جریان بالا، عملکرد پایداری از خود نشان داد. در خصوص زمان واکنش، مشخص شد که زمان‌های کوتاه‌تر (۳۰ دقیقه) در بسیاری از ترکیب‌ها نتایج بهتری داشته‌اند، هرچند در برخی موارد افزایش زمان، بهبود عملکرد برخی الکترودها را به دنبال داشت. هم‌چنین افزایش شدت جریان تا حدود مشخصی باعث افزایش راندمان می‌شود، اما از یک نقطه به بعد، تأثیر pH غالب‌تر بوده و کارایی جریان بالا کاهش می‌یابد یا به حالت یکنواخت می‌رسد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که کنترل دقیق pH در کنار انتخاب بهینه نوع الکترو د و تنظیم شدت جریان و زمان ماند می‌تواند عملکرد فرآیند انعقاد الکتریکی را در حذف TSS از پساب بهینه سازد.

بررسی اثرات متقابل متغیرهای عملیاتی بر حذف TSS از پساب توسط پایلوت انعقاد الکتریکی نشان داد که بیش‌ترین راندمان حذف (۸۷/۴٪) در شرایط بهینه شامل pH برابر ۳، زمان ماند ۳۰ دقیقه، شدت جریان ۳ آمپر و استفاده از الکترو د آلومینیوم حاصل شده است. کم‌ترین راندمان (۵۶/۶٪) نیز در شرایط pH برابر ۵، زمان ۶۰ دقیقه، شدت جریان ۰/۷۵ آمپر و همان الکترو د مشاهده شد. نتایج حاکی از آن است که pH نقش مؤثرتری نسبت به سایر پارامترها مانند زمان، جریان و نوع الکترو د در کنترل فرآیند انعقاد الکتریکی دارد. محیط‌های اسیدی (به‌ویژه در pH برابر با ۳) با افزایش فعالیت یونی و تسهیل واکنش‌های اکسیداسیون، بیش‌ترین کارایی را در حذف ذرات معلق نشان دادند. هم‌چنین، الکترو د آلومینیوم نسبت به سایر چیدمان‌ها، به‌ویژه



شکل ۵- نمودار درصد حذف BOD منطبق با چیدمان طرح آزمایش تاگوچی

اغلب موارد بیشترین کارایی را از خود نشان دادند و افزایش بیش از حد آن لزوماً به بهبود راندمان منجر نشد. همچنین، اثرات ترکیبی شدت جریان و زمان واکنش نشان داد که اگرچه در زمان کوتاه، راندمان پایین است؛ اما با افزایش زمان، راندمان نیز بهطور پیوسته بهبود می‌یابد، به‌ویژه در شدت جریان‌های میانه تا بالا. در مجموع، بهینه‌سازی پارامترهای pH، زمان، جریان و نوع الکتروود برای دستیابی به حداکثر راندمان حذف BOD ضروری است. از سوی دیگر، این نتایج نشان می‌دهند که طراحی مناسب سیستم و کنترل شرایط عملیاتی می‌تواند نقش مؤثری در ارتقای عملکرد فرایند انعقاد الکتریکی ایفا نماید.

### ۳-۲- بررسی رابطه آماری بین متغیرها

در این قسمت از مطالعه تعیین رابطه رگرسیون بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل بیان شده است. متغیر وابسته در این پژوهش راندمان حذف مواد آلی و غلظت اولیه بر حسب COD، شدت جریان، الکتروود، زمان ماند واکنش و pH محلول به‌عنوان متغیرهای مستقل توسط رگرسیون خطی چندمتغیره مورد تحلیل قرار گرفتند.

جدول ۶- تحلیل رگرسیون چندمتغیره در این بررسی

| متغیر           | $\beta$ (ضریب X) | $\beta$ استاندارد شده | T     | سطح معنی‌داری |
|-----------------|------------------|-----------------------|-------|---------------|
| غلظت اولیه (X1) | ۰/۰۳۲            | ۰/۶۳                  | ۳/۵   | ۰/۰۰۵***      |
| شدت جریان (X2)  | ۰/۰۳۹            | ۰/۵۹                  | ۲/۳۳  | ۰/۰۰۹***      |
| الکتروود (X3)   | ۰/۰۲۹            | ۰/۰۴۳                 | ۰/۳۱  | ۰/۷۹۸         |
| زمان واکنش (X4) | ۰/۳۳             | ۰/۱۲                  | ۰/۸   | ۰/۵           |
| pH محلول (X5)   | -۱/۳             | -۰/۰۶۳                | -۰/۳۲ | ۰/۷۵۸         |
| عرض از مبدا     | ۰/۶۰۵۴           | -                     | ۴/۲   | ۰/۰۰۲***      |

\*\*\* نشان‌دهنده سطح معنی‌داری در سطح ۱ درصد

جدول ۷، میزان همبستگی بین راندمان حذف مواد آلی برحسب COD با سایر متغیرها را نشان می‌دهد. درواقع همه این متغیرها را با ضریب تبیین ۰/۷۹ می‌توان پیش‌بینی نمود.

### ۳-۳- بررسی قابلیت تجزیه‌پذیری بیولوژیکی

با به‌دست آوردن نسبت BOD به COD، میزان کارایی فرایندهای متداول تصفیه فاضلاب مانند لجن فعال و سایر فرایندهای بیولوژیکی مشخص می‌شود. هرچه این نسبت به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده مطلوب بودن فرایندهای بیولوژیکی به‌عنوان گزینه مناسب برای تصفیه تکمیلی فاضلاب است. نتایج این بخش به‌ترتیب در جدول ۸ و شکل ۶ بیان شده است. در این بررسی با توجه به جدول ۸ و شکل ۶، این نسبت در محدوده ۰/۸۶ تا ۱/۵ قرارگرفت که این دامنه وسیع، نشان‌دهنده

بررسی اثرات متقابل پارامترهای عملیاتی شامل pH، زمان واکنش، شدت جریان و نوع الکتروود بر راندمان حذف BOD در فرایند انعقاد الکتریکی نشان داد که شرایط بهینه حذف این آلاینده در اغلب موارد در pH اسیدی (حدود ۳)، زمان ماند ۶۰ دقیقه، شدت جریان ۲/۲۵ آمپر و استفاده از ترکیب الکتروود آهن و آلومینیوم به‌وجود آمد که منجر به دستیابی به راندمانی معادل ۹۵/۱ درصد شد. در مقابل، کم‌ترین راندمان (۶۱/۶ درصد) در شرایط غیربهینه شامل pH برابر ۵، زمان ماند ۳۰ دقیقه و شدت جریان ۱/۵ آمپر مشاهده شد.

نتایج نشان داد که pH محیط، به‌ویژه در بازه اسیدی، نقش کلیدی در افزایش راندمان حذف BOD دارد. همچنین مشخص شد که زمان ماند طولانی‌تر (۶۰ دقیقه) موجب بهبود عملکرد فرایند می‌شود، درحالی‌که زمان‌های کوتاه‌تر (۳۰ دقیقه) در اغلب موارد منجر به راندمان پایین‌تر شدند. از نظر جنس الکتروود، چیدمان آلومینیوم و آهن، به‌ویژه در جریان‌های بالاتر عملکرد بهتری نسبت به سایر ترکیب‌ها داشت و در برخی شرایط، چیدمان آلومینیوم به‌تنهایی نیز عملکرد یکنواخت‌تری نشان داد. درخصوص شدت جریان، جریان‌های میانه (۲/۲۵ آمپر) در

معادله رگرسیون چندمتغیره بر اساس راندمان حذف (رابطه (۱۰)).

$$Y = -1.3X5 + 0.33X4 + 0.029X3 + 0.039X2 + 0.032X1 + 60.54 \quad (10)$$

با توجه به جدول ۶، جنس الکتروود و مقدار شدت جریان، دو عامل تعیین‌کننده در واکنش اکسیداسیون با فرایند انعقاد الکتریکی هستند که این نتایج با سایر مطالعات در این خصوص مطابقت دارد.

جدول ۷- همبستگی و ضریب تبیین متغیرهای وابسته و مستقل

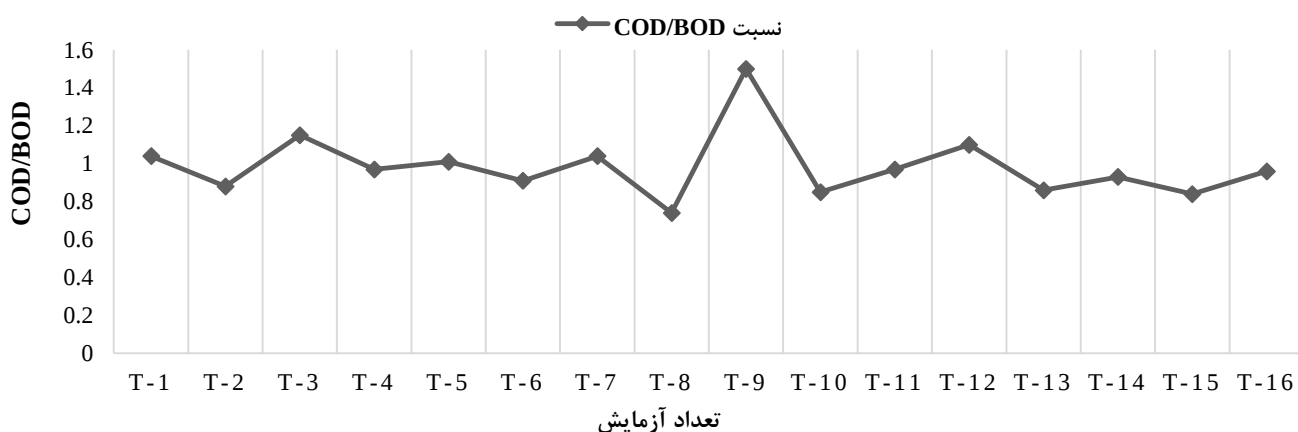
| ضریب همبستگی (R) | ضریب تبیین (R <sup>2</sup> ) |
|------------------|------------------------------|
| ۰/۸۹             | ۰/۷۹                         |

الکتریکی، از فرآیندهای بیولوژیکی برای تکمیل فرآیند استفاده شود و یا پساب حاصل از روش تصفیه را به سمت تصفیه‌خانه‌های متداول هدایت نمود.

راندمان مناسب فرایندهای بیولوژیکی است. همان‌طور که مشاهده شد اکثر نسبت‌ها در حدود یک هستند و می‌توان نتیجه گرفت که برای حذف فاضلاب صنایع تولید بستنی بعد از فرآیند انعقاد

جدول ۸- قابلیت تجزیه‌پذیری بیولوژیکی نسبت BOD به COD

| BOD/COD | آزمایش | BOD/COD | آزمایش | BOD/COD | آزمایش | BOD/COD | آزمایش |
|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| ۰/۸۶    | T-13   | ۱/۵     | T-9    | ۱/۰۱    | T-5    | ۱/۰۴    | T-1    |
| ۰/۹۳    | T-14   | ۰/۸۵    | T-10   | ۰/۹۱    | T-6    | ۰/۸۸    | T-2    |
| ۰/۸۴    | T-15   | ۰/۹۷    | T-11   | ۱/۰۴    | T-7    | ۱/۱۵    | T-3    |
| ۰/۹۶    | T-16   | ۱/۱     | T-12   | ۰/۷۴    | T-8    | ۰/۹۷    | T-4    |



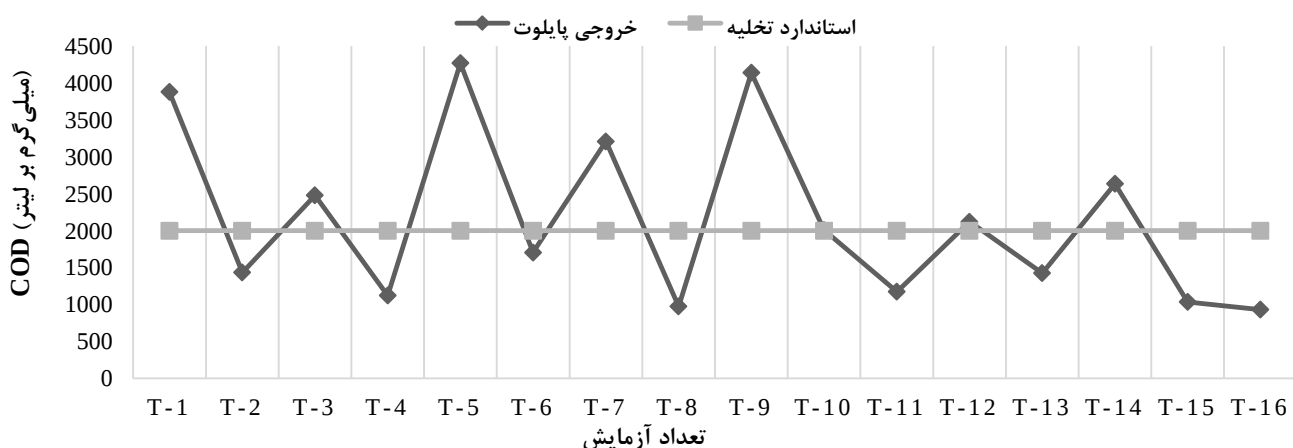
شکل ۶- نمودار نسبت BOD به COD

آزمایش‌های انجام‌شده در این بخش به‌منظور مقایسه پارامترهای مؤثر در انتخاب پساب در جدول ۹ و شکل‌های ۷ الی ۹، مقایسه کیفیت پایلوت با استانداردهای تخلیه به تصفیه‌خانه ارائه شد.

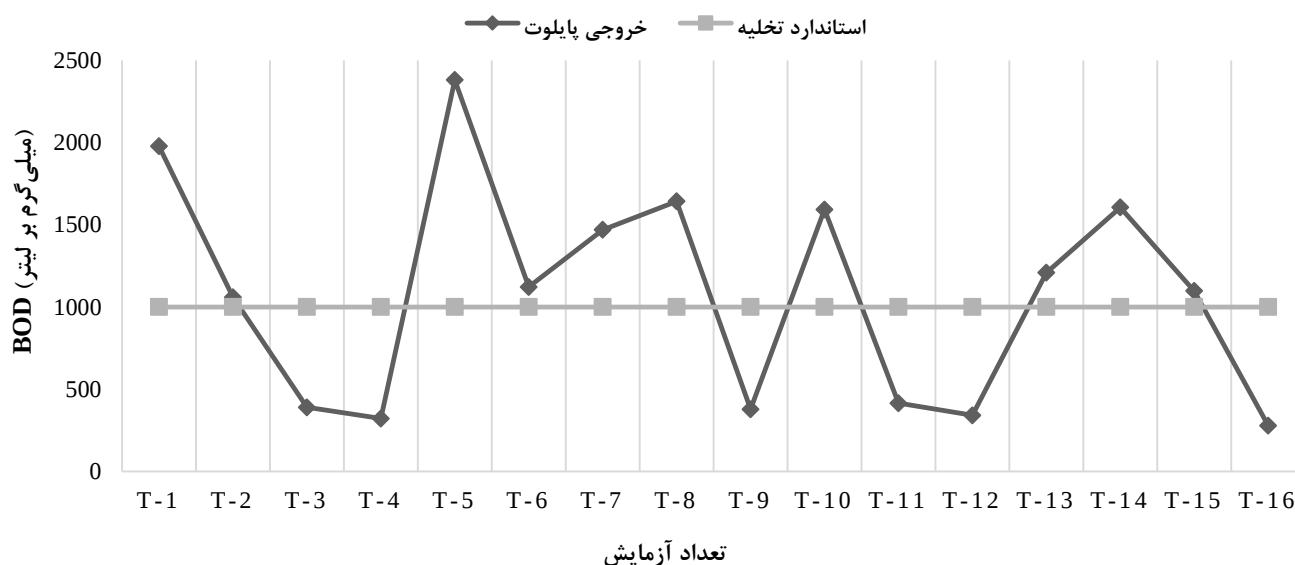
۳-۴- مقایسه کیفیت پساب در مورد تخلیه به تصفیه‌خانه مرکزی  
با توجه به استاندارد تخلیه به شبکه شهرک، هم‌چنین

جدول ۹- مقایسه کیفیت پایلوت با استانداردهای تخلیه به تصفیه‌خانه

| استاندارد تخلیه | حداکثر نتایج                                      | میانگین نتایج | حداقل نتایج | واحد | پارامتر | ردیف |
|-----------------|---------------------------------------------------|---------------|-------------|------|---------|------|
| ۸/۶-۵/۵         | پایلوت بعد از ته‌نشینی نیاز به تعدیل اسیدیته دارد |               |             |      | pH      | ۱    |
| ۲۰۰۰            | ۴۲۷۲                                              | ۲۱۶۰          | ۹۳۱         | mg/L | COD     | ۲    |
| ۱۰۰۰            | ۲۳۸۱                                              | ۱۰۸۲          | ۳۰۴         | mg/L | BOD     | ۳    |
| ۳۰۰             | ۱۲۵۹                                              | ۷۲۷           | ۳۶۶         | mg/L | TSS     | ۴    |



شکل ۷- نمودار مقایسه کیفیت COD خروجی پایلوت با استانداردهای تخلیه به تصفیه‌خانه



شکل ۸- نمودار مقایسه کیفیت BOD خروجی پایلوت با استانداردهای تخلیه به تصفیه‌خانه



شکل ۹- نمودار مقایسه کیفیت TSS خروجی پایلوت با استانداردهای تخلیه به تصفیه‌خانه

#### ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

فاکتور کلیدی و مؤثر در فرآیندهای انعقاد شیمیایی محسوب می‌شود (کریمی و همکاران، ۱۴۰۱). یافته‌های اصلی این تحقیق به شرح زیر است:

بیش‌ترین مقدار حذف COD در آزمایش T-16 که میزان pH برابر ۳، با زمان واکنش ۶۰ دقیقه و الکترو د ترکیبی آهن و آلومینیوم با نسبت تعداد برابر و در شدت جریان ۲/۲۵ آمپر برابر با درصد ۸۹/۳ و کم‌ترین مقدار حذف این پارامتر در آزمایش T-5 که میزان pH برابر ۵، با زمان واکنش ۳۰ دقیقه و الکترو د ترکیبی آهن و آلومینیوم با نسبت تعداد برابر و در شدت جریان ۱/۵ آمپر برابر با ۵۰/۹٪ به‌دست آمد. درخصوص اثر متقابل pH و زمان ماند واکنش بر راندمان حذف این پارامتر، مشاهده شد اسیدیته تأثیر بیش‌تری نسبت به زمان واکنش دارد. در pHهای

این پژوهش با هدف بهینه‌سازی فرآیند انعقاد الکتریکی برای تصفیه پساب صنایع لبنی انجام شد. در این مطالعه از فاضلاب صنعتی شرکت بستنی مهر، واقع در شهرک صنعتی جی اصفهان در پایلوت استفاده شد و هدف آن کاهش بار آلاینده‌های این واحد و بررسی تخلیه پساب به تصفیه‌خانه مرکزی آن شهرک بود. نتایج به‌دست آمده نه‌تنها کارایی بالای این روش را در کاهش بار آلودگی COD، BOD و TSS تأیید می‌کند، بلکه با تحلیل دقیق تأثیر متقابل پارامترهای عملیاتی کلیدی، یک مدل جامع برای بهینه‌سازی و تفسیر علمی فرآیند ارائه می‌دهد و در این خصوص، باید به این نکته هم توجه نمود که فاکتور pH در آزمایش یک

برابر ۵، با زمان واکنش ۳۰ دقیقه و الکترو د ترکیبی آهن و آلومینیوم با نسبت تعداد برابر و در شدت جریان ۱/۵ آمپر برابر با ۶۱/۶٪ به‌دست آمد. درخصوص اثر متقابل pH و شدت جریان، می‌توان گفت آزاد شدن یون هیدروکسیل برای کاهش BOD اثر مطلوبی دارد.

در مورد نقش محوری pH، نتایج به‌وضوح نشان داد که pH یک عامل حیاتی و تعیین‌کننده در راندمان فرآیند انعقاد الکتریکی است. بیش‌ترین راندمان حذف مواد آلی در pH اسیدی برابر با ۳ به‌دست آمد. این پدیده را می‌توان به دو مکانیسم اصلی نسبت داد: الف) افزایش انحلال الکترودها و تولید منعقدکننده‌ها: در pH پایین، آند فلزی آهن و آلومینیوم با سرعت بیش‌تری حل می‌شود. این مورد موجب تولید بیش‌تر یون‌های  $Fe^{3+}$  و  $Fe^{2+}$  یا  $Al^{3+}$  می‌شود که برای انعقاد ضروری هستند. از طرفی یون‌ها هیدرولیز شده و به تولید هیدروکسیدهای فلزی کمک می‌کند که با ذرات معلق ترکیب می‌شوند و ته‌نشینی این ذرات صورت می‌گیرد؛ ب) تشکیل مؤثرتر لخته‌ها و کاهش تشکیل رسوبات نامطلوب: هیدروکسیدهای فلزی در pH اسیدی، کلئیدهای باردار را بهتر خنثی می‌کنند و باعث ناپایداری الکتریکی ذرات و لخته‌های درشت‌تر می‌شوند. در pH بالاتر، تشکیل گونه‌های آفوتر مانند  $Al(OH)_4^-$  و  $Fe(OH)_4^-$  باعث کاهش کارایی انعقاد می‌شود. بنابراین، کنترل دقیق pH برای دستیابی به حداکثر راندمان ضروری است.

از طرفی با توجه به هم‌افزایی الکترو د ترکیبی Fe-2Al می‌توان گفت، الکترودها به‌واسطه مکانیسم جذب سطحی، تعویض یونی و پلیمری شدن موجب به‌دام انداختن ذرات آلی شده و عمل انعقاد را انجام می‌دهند. در این بررسی یافته‌ها مبین این هستند که استفاده از الکترو د ترکیبی آهن و آلومینیوم به‌طور قابل‌توجهی عملکرد فرآیند را بهبود می‌بخشد. بیش‌ترین راندمان برای حذف COD و BOD در این ترکیب به‌دست آمد و نشان‌دهنده یک اثر هم‌افزایی مثبت بین دو الکترو د بود، که از مزایای هر دو فلز بهره‌گیری شد. یون‌ها و کمپلکس‌های آلومینیوم، به‌دلیل خواص منعقدکنندگی عالی، به‌ویژه در حذف مواد کلئیدی و جامدات معلق، مؤثر هستند و یون‌های آهن علاوه‌بر ایجاد لخته، می‌توانند با تشکیل گونه‌های واکنشی (مانند رادیکال‌های هیدروکسیل در حضور اکسیژن محلول) به اکسیداسیون مستقیم و شکستن زنجیره‌های مولکول‌های آلی پیچیده کمک کنند. ترکیب این دو مکانیسم باعث تولید لخته‌هایی با ساختار فیزیکی متراکم‌تر و پایدارتر می‌شود که کارایی به‌دام انداختن آلاینده‌ها و در نتیجه، راندمان حذف را به حداکثر می‌رساند.

هم‌چنین نتایج این تحقیق نشان داد که شدت جریان و زمان

اسیدی و قلیایی فعالیت یونی داخل محیط آبی بیش‌تر بوده و به تبع آن واکنش اکسیداسیون بهتر صورت گرفته است. این مورد در pH برابر با ۳ بهترین نتایج را نشان داد. در مورد اثر متقابل اسیدیته با جنس الکترو د نتایج نشان دادند، چیدمان الکترو د آهن نسبت به سایر چیدمان‌ها تأثیر کم‌تری دارد و چیدمان Fe-2Al راندمان بهینه‌تری نسبت به سایر چیدمان‌ها در تمام حالت‌های مختلف pH داشته است. درخصوص اثر متقابل pH و شدت جریان، می‌توان گفت افزایش شدت جریان لزوماً موجب ارتقای راندمان در این پیلوت نمی‌شود و تأثیر pH نسبت به جریان عبوری، فعالیت اکسیداسیون را بهتر کنترل می‌کند.

بیش‌ترین درصد حذف TSS در آزمایش T-16 که میزان pH برابر ۳، با زمان واکنش ۶۰ دقیقه و الکترو د ترکیبی آهن و آلومینیوم با نسبت تعداد برابر و در شدت جریان ۲/۲۵ آمپر برابر با ۸۲/۵٪ به‌دست آمد. کم‌ترین درصد این پارامتر در آزمایش T-15 که میزان pH برابر ۵، با زمان واکنش ۶۰ دقیقه و الکترو د آلومینیوم و در شدت جریان ۰/۷۵ آمپر برابر با ۵۶/۶٪ به‌دست آمد. درخصوص اثر متقابل اسیدیته با جنس الکترو د، نتایج نشان دادند چیدمان Fe-2Al راندمان بهینه‌تری در حالت اسیدی نسبت به سایر چیدمان‌ها دارد. در رابطه با اثر متقابل pH و شدت جریان، می‌توان گفت آزاد شدن یون هیدروکسیل برای کاهش ذرات معلق اثر مطلوبی دارد. هم‌چنین با مشاهده نمودار می‌توان گفت افزایش شدت جریان لزوماً موجب ارتقای راندمان در این پیلوت نمی‌شود و تأثیر pH نسبت به جریان عبوری، فعالیت اکسیداسیون را بهتر کنترل می‌کند. در این نمودار مشاهده شد جریان ۲/۲۵ آمپر راندمان مناسب‌تری در مقایسه با سایر ولی در تمامی حالت‌های اسیدیته داشته و تقریباً نمودار یکنواختی دارد. با توجه به زمان واکنش و جنس الکترو د می‌توان بیان نمود، چیدمان الکترو د آهن و آلومینیوم در زمان‌های پایین نسبت به سایر چیدمان‌ها تأثیر کم‌تری دارد، ولی با زمان دادن بیش‌تر به این الکترو د، رفتار کاملاً برعکسی نسبت به سایر چیدمان‌ها از خود نشان می‌دهد. هم‌چنین درخصوص زمان واکنش و شدت جریان الکتریکی، بیش‌ترین میزان حذف TSS از پیلوت انعقاد الکتریکی در زمان ماند ۳۰ دقیقه و شدت جریان عبوری ۳/۰۰ آمپر با مقدار ۸۷/۴٪ به‌دست آمد و کم‌ترین مقدار در مدت زمان ۶۰ دقیقه و شدت جریان عبوری ۰/۷۵ آمپر با مقدار ۵۶/۶٪ مشاهده شد.

نتایج حاصل از آزمایش BOD نشان داد که بیش‌ترین مقدار حذف این پارامتر در آزمایش T-16 که میزان pH برابر ۳، با زمان واکنش ۶۰ دقیقه و الکترو د ترکیبی آهن و آلومینیوم با نسبت تعداد برابر و در شدت جریان ۲/۲۵ آمپر برابر با ۹۵/۱٪ به‌دست آمد. کم‌ترین مقدار حذف BOD در آزمایش T-5 که میزان pH

به دلیل حسن خلق و تمامی اپراتورهای تصفیه‌خانه شهرک صنعتی جی که در این امر ما را یاری نمودند، قدردانی می‌کنند.

#### ۷- مراجع

- پورمحمود، م.، حسینی‌شکیب، م.، و خمسه، ع.، (۱۴۰۱)، "فناوری‌های هوشمند و نوآوری سبز در صنعت تصفیه فاضلاب: نقش میانجی پایداری شرکت و استراتژی‌های پایداری"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۷(۴)، ۶۰-۷۴، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2022.289711.1277>.
- رضایی، م. (۱۴۰۱)، "بحران آب: دوراهی اجتماعی"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۷(۴)، ۴-۱۶، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2022.330611.1311>.
- رئوف، ر.، و ضمیر، س. م. (۱۴۰۴)، "ارزیابی عملکرد یک پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد زیستی برای نمک‌زدایی از آب شور"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۱۰(۱)، ۴۱-۴۸، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2024.469397.1410>.
- کریمی، س.، رضانی اعتدالی، ه.، و ستوده‌نیا، عباس. (۱۴۰۱)، "بررسی حذف آرسنیک از آب آشامیدنی با استفاده از ماده منعقدکننده کلروفریک"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۷(۱)، ۵۵-۶۱، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2021.284006.1271>.
- Ankolyam, D., Mudgal, A., Sinha, M.K., Patel, V., and Patel, J., (2023), "Application of electrocoagulation process for the treatment of dairy wastewater: A mini review", *Materials Research Proceedings*, 77(1), 117-124, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.254>.
- Asaithambi, P., Yesuf, M.B., Govindarajan, R., Selvakumar, P., Niju, S., Pandiyarajan, T., Abudukeremu Kadier, D., Nguyen, D., and Alemayehu, S., (2023), "Industrial wastewater treatment using batch recirculation electrocoagulation (BRE) process: Studies on operating parameters", *Sustainable Chemistry for the Environment*, 2, 100014, <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100014>.
- Ates, H., Ozay, Y., and Dizge, N., (2017), "Treatment of dairy industry cleaning-in-place wastewater by electrocoagulation supported with immersed membrane process", *CLEAN Soil Air Water*, 45(11), 1-9, <https://doi.org/10.1002/clen.201600654>.
- Bazrafshan, E., Moein, H., Kord Mostafapour, F., and Nakhaie, Sh., (2013), "Application of electrocoagulation process for dairy wastewater treatment", *Journal of Chemistry*, Hindawi Publishing Corporation, 640139, 1-8, <https://doi.org/10.1155/2013/640139>.
- Benazzi, T.L., Luccio, M.D., Dallago, R.M., Steffens, J., Mores, R., Nascimento, M.S., Krebs, J., and Ceni, G., (2016), "Continuous flow electrocoagulation in the treatment of wastewater from dairy industries", *Water Science and Technology*, 73(6), 1418-1425, <https://doi.org/10.2166/wst.2015.620>.

واکنش باید به‌صورت بهینه و هم‌زمان با pH تنظیم شوند. با افزایش شدت جریان، سرعت انحلال آند و تولید یون‌های فلزی بیش‌تر می‌شود، اما این رابطه تا یک حد مشخصی کارایی را افزایش می‌دهد. افزایش بیش از حد جریان (مثلاً بالاتر از ۲/۲۵ آمپر) می‌تواند منجر به پدیده‌هایی مانند تشکیل لخته‌های کوچک‌تر و ناپایداری رسوب‌گذاری روی الکترودها و کاهش سطح ویژه صفحات شود که کارایی فرایند را کاهش می‌دهد. از طرفی زمان واکنش کافی (تا ۶۰ دقیقه) برای تکمیل فرایند انعقاد، رشد لخته‌ها و ته‌نشینی آن‌ها حیاتی است. در این زمان، لخته‌های کوچک به یکدیگر پیوسته و لخته‌های بزرگ‌تری تشکیل می‌دهند که ته‌نشینی آن‌ها آسان‌تر است.

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این مطالعه، تأثیر فرایند انعقاد الکتریکی بر قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری پساب بود. افزایش چشم‌گیر نسبت BOD/COD به مقادیر نزدیک به ۱ پس از تصفیه، نشان می‌دهد که این فرایند آلاینده‌های آلی مقاوم و غیرقابل تجزیه بیولوژیکی را حذف کرده و پساب را به ترکیبی با قابلیت تجزیه بیولوژیکی بالا تبدیل می‌کند. این یافته دارای کاربرد صنعتی مهمی است. پساب تصفیه‌شده با این روش، می‌تواند به‌عنوان یک خوراک با کیفیت مناسب به واحدهای تصفیه بیولوژیکی (مانند تصفیه‌خانه‌های مرکزی شهرک‌های صنعتی) هدایت شود. این امر نه تنها موجب کاهش هزینه‌های تصفیه در مراحل بعدی می‌شود، بلکه کارایی کلی سیستم تصفیه را به میزان قابل توجهی ارتقا می‌بخشد.

در نهایت، این پژوهش یک راهنمای عملی برای طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های تصفیه پساب با فناوری انعقاد الکتریکی در صنایع لبنی ارائه می‌دهد و تأکید می‌کند که کنترل دقیق پارامترهای عملیاتی (به‌ویژه pH و نوع الکترود) نقش کلیدی در دستیابی به حداکثر کارایی و تبدیل پساب به یک جریان قابل مدیریت برای تصفیه‌خانه‌های متمرکز دارد.

#### ۵- پی‌نوشت‌ها

- 1- Electrocoagulation
- 2- Biochemical Oxygen Demand
- 3- Chemical Oxygen Demand
- 4- Total Suspended Solid
- 5- Orthogonal Arrays

#### ۶- قدردانی

نویسندگان پژوهش، از جناب آقای دکتر سید علیرضا مؤمنی و حمایت‌های معنوی‌شان، هم‌چنین از واحد صنعتی بستنی مهر

- wastewater by photo-Fenton and electrocoagulation process: Multicriteria optimization by desirability function", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 427, 11382, <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.113820>.
- TriGueros, D.E., Daniela E.G., Braunm, L., and Hinterholz, C.L., (2023), "Optimal electrocoagulation as a post-treatment to photochemical oxidation: Minimal electrical energy consumption and lower acute toxicity of dairy wastewater", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 437, 114496, <https://doi.org/10.2139/ssrn.4182784>.
- Valente, G.D.F.S., Mendonça, R.C.S., and Pereira, J.A.M., (2015), "The efficiency of electrocoagulation using aluminum electrodes in treating wastewater from a dairy industry", *Ciência Rural, Santa Maria*, 45(9), 1713-1719, <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20141172>.
- Venzke, C.D., Rodrigues, M.A.S., Giacobbo, A, Bacher, L.E., Lemmert, I.S., Viegas, Ch, Striving, J., and Pozzebon, Sh., (2017), "Application of reverse osmosis to petrochemical industry wastewater treatment aimed at water reuse", *Management of Environmental Quality An International Journal*, 28(1), 70-77, <https://doi.org/10.1108/MEQ-07-2015-0149>.
- Yip, J., Cheng, L., Meng, N.C., Phaik, P.E., Vieritz, A., Talei, A., and Chow, M.F., (2018), "Quantification of mains water savings from decentralised rainwater, greywater, and hybrid rainwater-greywater systems in tropical climatic conditions", *Journal of Cleaner Production*, 176(1), 946-958, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.020>.
- Yuliani, G., Mitasari, K., and Setiabudi, A., (2017), "The use of electrocoagulation technique for paper mill wastewater treatment", *Materials Science Forum*, 901, 149-153, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.901.149>, 2017.
- Boinpally, S., Kolla, A., Kainthola, J., Kodali, R., and Vemuri, J., (2023), "A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment", *Water Cycle*, 4, 26-36, <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.01.001>.
- Faraj, H., Jamrah, A., Al-Omari, S., and Al-Zghoul, T.M., (2024), "Optimization of an electrocoagulation-assisted adsorption treatment system for dairy wastewater", *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100574, <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100574>.
- Geraldino, H.C.L., Simionato, J.I., Souza Freitas, T.K.F., Garcia, J.C., Júnior, O.C., and Correr, C.J., (2015), "Efficiency and operating cost of electrocoagulation system applied to the treatment of dairy industry wastewater", *Acta Scientiarum Technology*, 37(3), 401-408, <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v37i3.26452>.
- Gerson D.F., Valente, S., Mendonca, R.C.S., and Felix, L.B., (2020), "Electrocoagulation using zinc electrodes for dairy industry wastewater treatment", *Desalination and Water Treatment*, 206, 58-65, <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26294>.
- Ghazouani, M., Akrou, H., Jellali, S., and Bousselmi, L., (2019a), "Comparative study of electrochemical hybrid systems for the treatment of real wastewaters from agri-food activities", *Science of The Total Environment*, 647(10), 1651-1664, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.023>.
- Melchior, M.S., Piovesan, M., Becegato, V.R., Becegato, V.A., Tambourgi, E.B., and Paulino, A.T., (2016), "Treatment of wastewater from the dairy industry using electroflocculation and solid whey recovery", *Journal of Environmental Management*, 182(1), 574-580, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.022>.
- Nazari, R., Eslamian, S., and Khanbilvardi, R., (2012), "Water reuse and sustainability", *Ecological Water Quality-Water Treatment and Reuse*, 241-254, <https://doi.org/10.5772/34428>.
- Rahul Krishna, B., Bhuvaneshwari, S., Majeed, F., and Aravind, S.P., (2022), "Development and applicability of Aluminium - Copper alloy electrodes for dairy wastewater treatment", *Journal of Water Process Engineering*, 48, 102915, <https://doi.org/10.2139/ssrn.4065596>.
- Reilly, M., Cooley, AP., Tito, D., Tassou, S.A., and Theodorou, M.K., (2019), "Electrocoagulation treatment of dairy processing and slaughterhouse wastewaters", *Energy Procedia*, 161, 343-351, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.106>.
- Saeed, O.F., Hameed, K.W., and Abbar, A.H., (2023), "Treatment of vegetable oil refinery wastewater by sequential electrocoagulation-electrooxidation process", *Journal of Environmental Management*, 342, 118362, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118362>.
- Taguchi, G., (1986), *Introduction to quality engineering: Designing quality into products and processes*, Asian Productivity Organization.
- TriGueros, D.E., Daniela E.G., Braunm, L., and Hinterholz, C.L., (2022), "Environmental and economic feasibility of the treatment of dairy industry



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

Research Paper

مقاله پژوهشی

## Leakage Detection and Localization in Water Distribution Networks Using SMA

Maryam Nasiri Dahaj<sup>1</sup>, Mohammadreza Jalili Ghazizadeh<sup>2\*</sup>, Ebrahim Jabbari<sup>3</sup> and Reza Moasheri<sup>4</sup>

1- M.Sc. Student, Water and Hydraulic Structures Engineering Department, School of Civil Engineering, University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Water and Environmental Engineering Department, School of Civil Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3- Professor, Water and Hydraulic Structures Engineering Department, School of Civil Engineering, University of Science and Technology, Tehran, Iran.

4- Ph.D. Student, Water and Environmental Engineering Department, School of Civil Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

\*Corresponding Author, Email: [m\\_jalili@sbu.ac.ir](mailto:m_jalili@sbu.ac.ir)

Received: 08/04/2023

Revised: 25/10/2023

Accepted: 28/10/2023

© IWWA

## Abstract

The occurrence of leakage in water supply systems, in addition to water loss, increases the costs of operation as well as pollution entering the network. Therefore, finding leaks is a crucial challenge for water utilities. In most of the conventional methods, leak detection is costly and time consuming. In this paper, a calibration-optimization method is presented using a new meta-heuristic algorithm (SMA). The proposed method is based on comparing simulated and field data of pressure and flow. This method was implemented for 15 different scenarios of single leak in three water distribution networks. The amount and location of leakage in all scenarios were defined automatically. The results showed that the presented method is able to estimate the location and amount of leakage in the networks with high accuracy and independent of the dimensions and specifications of the networks and also without dependence on the amount and location of the leakage. In the studied networks, the algorithm has reached convergence in less than 90 iterations fast and the leak detection has been performed accurately. Based on the obtained results, leak location in water networks can be found with very high accuracy using the proposed powerful algorithm.

**Keywords:** Leak Detection, Optimization, Metaheuristic Algorithms, Water Distribution Network, Calibration.

## یافتن محل و مقدار نشت در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم SMA

مریم نصیری دهج<sup>۱</sup>، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده<sup>۲\*</sup>، ابراهیم جباری<sup>۳</sup> و رضا معاشری<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

۲- دانشیار دانشگاه شهید بهشتی، گروه آب و محیط‌زیست، دانشکده عمران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳- استاد دانشگاه علم و صنعت، گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

۴- دانشجوی دکترای دانشگاه شهید بهشتی، گروه آب و محیط‌زیست، دانشکده عمران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

\*نویسنده مسئول، ایمیل: [m\\_jalili@sbu.ac.ir](mailto:m_jalili@sbu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۹

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۸/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۶

© انجمن آب و فاضلاب ایران

## چکیده

وقوع نشت در سامانه‌های آبرسانی علاوه بر هدررفت آب، باعث افزایش هزینه‌های بهره‌برداری و همچنین ورود آلودگی به شبکه می‌شود. از این‌رو یافتن نشت، چالشی مهم برای شرکت‌های آب و فاضلاب است. اکثر روش‌های مرسوم نشت‌یابی، مستلزم صرف زمان و هزینه بالا برای یافتن نشت هستند. در مقاله حاضر، یک روش واسنجی-بهینه‌یابی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری جدید SMA ارائه شده است. روش پیشنهادی براساس مقایسه داده‌های فشار یا دبی شبیه‌سازی‌شده در مدل و داده‌های اندازه‌گیری‌شده میدانی، محل نشت را برآورد می‌کند. این روش در ۱۵ سناریوی مختلف وجود نشت در سه شبکه توزیع آب پیاده‌سازی شد. محل و مقدار نشت در تمامی سناریوها به‌صورت خودکار تعیین شد. نتایج نشان داد روش ارائه‌شده قادر است محل و مقدار نشت موجود در شبکه‌ها را با دقت بالا و مستقل از ابعاد و مشخصات شبکه و همچنین بدون وابستگی به مقدار و محل نشت، تخمین بزند. در شبکه‌های مورد مطالعه به‌طور میانگین با کم‌تر از ۹۰ تکرار، الگوریتم به‌سرعت به همگرایی رسیده و عمل نشت‌یابی به‌دقت انجام گرفته‌است. با استناد به نتایج حاصله، با استفاده از این الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی قدرتمند، نشت موجود در شبکه‌های آب را با دقت بسیار بالا می‌توان یافت.

کلمات کلیدی: نشت‌یابی، بهینه‌یابی، الگوریتم‌های فراابتکاری، شبکه‌های توزیع آب، واسنجی.

آن‌ها در دو مثال با داده‌های میدانی موجود نیز، روش خود را مورد صحت‌سنجی قرار دادند.

مغربی و همکاران (۱۳۹۰) پژوهشی ارائه دادند که بر مبنای آن، مقدار و موقعیت نشت در گره‌های شبکه با استفاده از واسنجی هیدرولیکی توسط الگوریتم ژنتیک و کلونی مورچه‌ها انجام می‌شود. نتایج نشان داد که الگوریتم کلونی مورچه‌ها با تعداد برداشت فشارسنجی کم‌تری به نتیجه می‌رسد. الگوریتم ژنتیک در برخی مواقع، پاسخ غیرصحیح را گزارش می‌کند و به صورت کلی الگوریتم کلونی مورچه‌ها عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک در یافتن نشت‌های شبکه دارد.

در تحقیق دیگری مغربی و همکاران (۱۳۹۲)، روشی برای تعیین مقدار و محل نشت با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی بهبود یافته با الگوریتم خفاش پیشنهاد دادند. نتایج آن‌ها نشان داد استفاده از الگوریتم خفاش، نتیجه بهتری در آموزش شبکه عصبی نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد.

Sousa et al. (2015) روشی برای شناسایی نشت در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و نظریه گراف پیشنهاد دادند. تابع هدف در این پژوهش، مجموع قدرمطلق اختلاف فشارهای میدانی و فشارهای شبیه‌سازی شده است و نتایج کلی، حاکی از رضایت‌بخش بودن این روش بود.

Wachla et al. (2015) از یک روش عصبی-فازی برای تعیین محل نشت‌های شبکه استفاده کردند. در این روش شبکه موجود به چند زیرناحیه تقسیم شد. سپس به تعداد زیرناحیه‌ها، از طبقه‌بندکننده‌های فازی-عصبی، برای شناسایی نشت در هر ناحیه استفاده شد. این روش در تعیین محل نشت‌های شبکه آبرسانی در لهستان به کار برده شد و نتایج خروجی نشان‌دهنده رضایت از این روش است.

حاجی‌بنده و نظیف (۱۳۹۶) روشی را با عنوان روش منطقه‌بندی فشاری به‌منظور تعیین نشت در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان چندهدفه ارائه دادند. کارایی روش پیشنهادی در دو شبکه مورد بررسی قرار گرفت. شکفته و همکاران (۱۳۹۸) تحقیقی برای یافتن نشت با استفاده از تئوری گراف و شبکه عصبی ارائه دادند. در این روش ابتدا با استفاده از تئوری گراف، شبکه به صورت فرضی به دو ناحیه مجزا تقسیم شده و توسط شبکه‌های عصبی و نتایج فشارسنجی، نشت در هر ناحیه تخمین زده می‌شود.

معاشری و جلیلی قاضی‌زاده (۱۳۹۸) روشی برای واسنجی هم‌زمان زبری لوله‌ها و نشت‌های مدل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب ارائه دادند. در روش پیشنهادی، نشت به عنوان مصرف

شبکه‌های توزیع آب از جمله زیرساخت‌های مهم شهری هستند که نقشی اساسی را در تأمین آب با فشار کافی و کیفیت مناسب ایفا می‌کنند. اکثر شبکه‌های توزیع آب در کشورهای توسعه‌یافته، در دهه‌های قبل ساخته شده‌اند و در حال حاضر، علاوه بر قدمت اجزای شبکه، به دلایلی هم‌چون کیفیت پایین مواد اولیه، عدم انجام دوره‌های تعمیر و نگهداری به‌طور مداوم، خوردگی تأسیسات و فشار بالای سامانه با هدررفت آب مواجه هستند (Capelo et al., 2021). علت اصلی هدررفت آب در شبکه‌های آبرسانی، وقوع نشت است که تقریباً ۷۰٪ از کل هدررفت آب را به خود اختصاص می‌دهد (El-Zahab and Zayed, 2019). مقدار نشت، تابع شرایط مختلف بوده و مقادیر گوناگونی را می‌تواند داشته باشد؛ برای مثال در کشور هلند مقدار نشت بین ۳٪ تا ۷٪ گزارش شده است در حالی که در برخی از کشورهای در حال توسعه، این مقدار به بیش از ۵۰٪ نیز می‌رسد (Puust et al., 2010).

به‌طور کلی وجود نشت در شبکه‌های توزیع آب موجب کاهش کیفیت آب به دلیل افزایش احتمال ورود آلودگی، کاهش فشار، اتلاف انرژی و افزایش هزینه‌ها می‌شود؛ از این رو تشخیص به موقع نشت و اقدام برای رفع آن، چالش اصلی شرکت‌های خدمات آبرسانی است. روش‌های متنوعی برای شناسایی نشت (ها) وجود دارد که بنابر طبقه‌بندی مرسوم، روش‌های نشت‌یابی به دو گروه اصلی "فیزیکی" و "شبیه‌سازی-میدانی" تقسیم می‌شوند. نشت‌یابی فیزیکی، خود به دو دسته روش‌های صوتی و غیرصوتی تقسیم‌بندی می‌شود. روش‌های صوتی شامل روش‌هایی مانند میله‌های شنیداری و دستگاه ارتباط‌دهنده نشت و صدا است. روش‌های غیرصوتی نیز شامل روش‌هایی مانند استفاده از گاز ردیاب و ترموگرافی است (Wan et al., 2022).

نشت‌یابی می‌تواند با به کارگیری روش‌های فیزیکی با دقت نسبتاً مناسبی انجام شود، اما این امر مستلزم استفاده از تجهیزات خاص و پیشرفته است. هم‌چنین عوامل دیگری همچون زمان‌بر بودن، نیاز به نیروی متخصص، هزینه‌بر بودن و وجود محدودیت‌های خاص هر روش باعث شده است که در سال‌های اخیر به روش‌های غیرفیزیکی از جمله شبیه‌سازی شبکه‌های آبرسانی توجه ویژه‌ای شود. از جمله روش‌های شبیه‌سازی-میدانی به انجام فرآیند واسنجی-بهینه‌یابی و استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توان اشاره نمود.

Wu and Sage (2008) واسنجی شبکه آب را به‌منظور شناسایی نشت‌های آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام دادند.

Chakraborty and Ray (2023) با استفاده از الگوریتم SMA هزینه یک ریزش‌بکه را کمینه‌سازی نمودند. در پژوهش دیگری (Bardhan and Asteris (2023 برای ساخت شبکه عصبی مصنوعی از چهار الگوریتم استفاده کردند که یکی از آن‌ها، الگوریتم SMA بود. مطالعه‌ای که توسط Farhat et al. (2023 انجام شد نیز نمونه دیگری از تحقیقات انجام‌شده با استفاده از الگوریتم SMA است. در تحقیق حاضر نیز قابلیت این الگوریتم در مسائل حوزه نشت‌یابی بررسی می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق ابتدا مدل هیدرولیکی شبکه‌های مورد مطالعه در نرم‌افزار EPANET مدل‌سازی شده، سپس مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی به اجزای آن‌ها اختصاص داده می‌شود. تحلیل شبکه‌ها براساس نرم‌افزار ایپانت انجام می‌شود. این نرم‌افزار از روش گرادیان برای تحلیل شبکه‌های آب‌رسانی استفاده می‌کند. در مطالعه حاضر، نشت‌ها، مبتنی بر فشار و تقاضاها ثابت در نظر گرفته می‌شوند. در گام بعدی، سناریوهای وجود نشت در شبکه‌ها به صورت تصادفی و خودکار تعریف شده‌اند. بدین معنا که فرض می‌شود در هر شبکه، ۵ سناریوی وجود تک‌نشت با مقداری در حدود ۵ تا ۱۰٪ دبی ورودی به شبکه و در گره‌های تصادفی وجود دارد. نشت باتوجه به رابطه (۱) محاسبه می‌شود. پس از تعریف سناریوهای وجود نشت در هر شبکه، در نقاط مختلفی از شبکه‌ها و ورودی مخازن، عمل فشارسنجی و دبی‌سنجی انجام گرفته و داده‌ها به عنوان داده‌های میدانی برداشت می‌شوند. همچنین فرض بر این است که در هر سه شبکه مورد بررسی، فشارهای موجود از فشار استاندارد کم‌تر نیست.

$$Q = KP^\alpha \quad (1)$$

که  $Q$ : مقدار دبی نشت،  $K$ : مقدار ضریب نشت گرهی،  $P$ : مقدار فشار موجود در شبکه در حالت وجود نشت و  $\alpha$ : توان فشار است. الگوریتم SMA با تعریف تابع هدفی که در رابطه (۲) آورده شده است، در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی شد و پارامترهای الگوریتم با انجام تحلیل حساسیت تعیین شدند. سپس برای ارتباط بین دو نرم‌افزار متلب و ایپانت از یک ابزار جانبی که نخستین بار توسط Eliades et al. (2016) معرفی شد، استفاده شد. در گام آخر، واسنجی مدل هیدرولیکی شبکه‌ها و بهینه‌یابی تابع هدف تعریف‌شده، انجام و در نهایت محل و مقدار نشت

اضافی گرهی تلقی شده و بعد از گروه‌بندی لوله‌ها به منظور تعیین زبری هر گروه لوله، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری، اختلاف فشار و دبی‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده، کمینه می‌شوند.

Hu et al. (2021) روش جدیدی برای نشت‌یابی شبکه‌های آب‌رسانی پیشنهاد دادند. در این روش، ابتدا شبکه آب توسط الگوریتم خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی، به چندین ناحیه تقسیم می‌شود. در ادامه به وسیله شبکه‌های عصبی پیچشی کامل دارای چند مقیاس، محدوده‌های دارای نشت یافت می‌شوند. روش پیشنهادی با روش‌هایی از قبیل ماشین بردار پشتیبان مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج حاکی از برتری آن نسبت به سایر روش‌ها است. از دیگر پژوهش‌های انجام‌شده پیرامون روش شبیه‌سازی-میدانی می‌توان به Lijuan et al. (2012)، بوستانی و خدانشناس (۱۳۹۴)، Pérez-Pérez et al. (2021) و (Marzola et al. (2022 اشاره نمود.

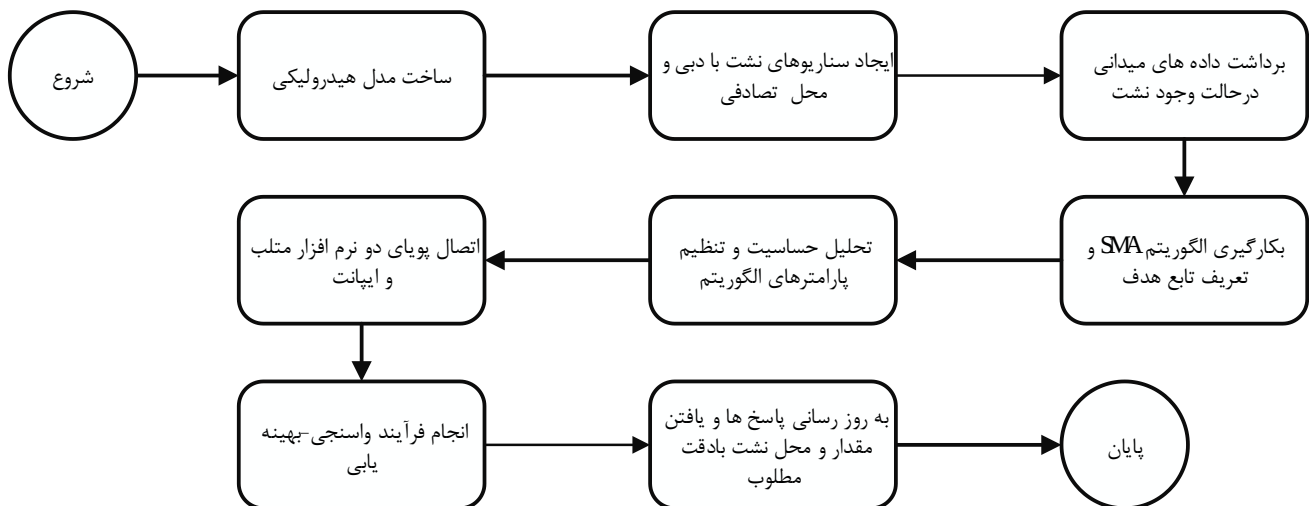
بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده پیرامون موضوع نشت‌یابی با استفاده از روش شبیه‌سازی-میدانی، بر روی یک شبکه پیاده‌سازی شده‌اند؛ درحالی‌که برای اطمینان از عملکرد روش، باید از شبکه‌های مختلف و مقادیر متفاوت نشت استفاده شود. شایان ذکر است که در اکثر تحقیقات صورت گرفته، نشت به عنوان مصرف اضافی در گره در نظر گرفته شده است. درواقع در نظر گرفتن یک دبی ثابت برای نشت صحیح نیست و بهتر است مقدار نشت به گونه‌ای در نظر گرفته شود که حتماً وابسته به فشار باشد. همچنین استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی، مستلزم در دسترس بودن داده‌های فراوان برای آموزش شبکه عصبی است. اگر در مرحله آموزش، مقدار و دقت داده‌ها در حد کافی نباشند، موجب ایجاد نتیجه نامطلوب خواهند شد.

در پژوهش حاضر، سعی شده است تا حدی محدودیت‌ها و مشکلات تحقیقات پیشین پوشش داده شود و روش جدیدی برای تعیین مقدار و محل دقیق نشت در شبکه‌های توزیع آب ارائه شود. در روش پیشنهادشده، نشت به صورت تابعی از فشار و ضریب نشت گرهی در سه شبکه معروف پولاکیس، هانوی و بالرما در نظر گرفته می‌شود. در ادامه با استفاده از الگوریتم جدید Slime Mould Algorithm که اخیراً توسعه داده شده است و به واسطه اعتبارسنجی‌های انجام‌شده برای آن در مقاله مربوطه، عملکرد بسیار خوبی در حل مسائل پیچیده بهینه‌یابی دارد، واسنجی شبکه و یافتن نشت، صورت می‌گیرد (Li et al., 2020). الگوریتم مذکور در زمینه‌های مختلف علوم و مهندسی به کار گرفته شده و عملکرد آن در حوزه‌های متنوع بررسی شده است.

که  $f(x)$ : تابع هدف،  $nh$ : شمارشگر فشارسنج‌های شبکه،  $NH$ : تعداد کل فشارسنج‌های شبکه،  $Hsim_{nh}$ : تراز هیدرولیکی شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار در گره دارای فشارسنج  $nh$ ،  $Hobs_{nh}$ : تراز هیدرولیکی مشاهداتی در گره دارای فشارسنج  $nh$ ،  $nf$ : شمارشگر دبی‌سنج‌های شبکه،  $NF$ : تعداد کل دبی‌سنج‌های شبکه،  $Fsim_{nf}$ : دبی جریان شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار در لوله دارای دبی‌سنج  $nf$ ،  $Fobs_{nf}$ : دبی اندازه‌گیری شده میدانی در لوله دارای دبی‌سنج  $nf$  هستند.

مشخص می‌شود. روندنمای روش پیشنهادی در شکل ۱ ارائه شده است.

$$f(x) = \text{Minimize} \left( \frac{\sum_{nh=1}^{NH} \left| \frac{Hsim_{nh} - Hobs_{nh}}{Hobs_{nh}} \right| + \sum_{nf=1}^{NF} \left| \frac{Fsim_{nf} - Fobs_{nf}}{Fobs_{nf}} \right|}{NH + NF} \right) \quad (2)$$



شکل ۱- روندنمای روش پیشنهادی برای یافتن نشت

موقعیت کپک مخاطی است.  $\vec{X}_A$  و  $\vec{X}_B$ : بیانگر دو نمونه است که به صورت تصادفی از کپک مخاطی انتخاب شده‌اند و  $\vec{W}$ : وزن کپک مخاطی است.  $p$  و  $\vec{vb}$  از روابط (۴) و (۵) و  $\vec{W}$  نیز از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$p = \tanh|S(i) - DF| \quad (4)$$

$$\vec{vb} = [-a, a] \rightarrow a = \arctanh\left(-\left(\frac{t}{\max_t}\right) + 1\right) \quad (5)$$

که  $S(i)$ : برازندگی  $\vec{X}$ ،  $DF$ : بیانگر بهترین برازندگی به دست آمده در کلیه تکرارها و  $\max_t$ : حداکثر تکرار است.

$$\overline{W(SmellIndex(i))} = \begin{cases} 1 + r \cdot \log\left(\frac{bF - S(i)}{bF - \omega F} + 1\right) & \text{شرایط} \\ 1 - r \cdot \log\left(\frac{bF - S(i)}{bF - \omega F} + 1\right) & \text{دیگر} \end{cases} \quad (6)$$

## ۲-۱- معرفی الگوریتم SMA

ایده اصلی این الگوریتم، براساس رفتار نوسانی کپک مخاطی در طبیعت است. درواقع ایده این الگوریتم عمدتاً رفتار و تغییرات مورفولوژیکی کپک مخاطی در جست‌وجوی علوفه را شبیه‌سازی می‌کند. الگوریتم SMA از وزن‌های تطبیقی برای شبیه‌سازی فرآیند تولید بازخورد مثبت و منفی موج انتشار کپک مخاطی مبتنی بر موج بیولوژیکی استفاده می‌کند تا مسیر بهینه برای اتصال مواد غذایی را با توانایی جست‌وجوی بالای خود فراهم کند. کپک مخاطی می‌تواند با توجه به بوی موجود در هوا به غذا نزدیک شود. برای بیان این رفتار به صورت ریاضی، روابط زیر پیشنهاد شده است.

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}_b(t) + \vec{vb} \cdot (\vec{W} \cdot \vec{X}_A(t) - \vec{X}_B(t)), & r < p \\ \vec{vc} \cdot \vec{X}(t), & r \geq p \end{cases} \quad (3)$$

که  $\vec{vb}$ : یک پارامتر در محدوده  $[-a, a]$  است و به طور خطی از یک تا صفر روند کاهشی دارد. هم‌چنین  $t$ : شماره تکرار،  $\vec{X}_b$ : مکان با بیش‌ترین غلظت بو که تاکنون یافت شده است و  $\vec{X}$ :

که "شرایط" بیانگر آن است که رتبه  $S(i)$  در نیمه اول جمعیت قرار دارد،  $r$ : یک مقدار تصادفی بین ۰ و ۱ است،  $bF$ : بهترین مقدار به‌دست‌آمده در تکرار جاری،  $\omega F$ : بدترین مقدار به‌دست‌آمده در تکرار جاری و  $SmellIndex$ : نشان‌دهنده دنباله‌ای صعودی از برازندگی‌های به‌دست‌آمده است. برای توصیف به‌روزرسانی موقعیت کپک مخاطی نیز رابطه (۷) ارائه شده است.

$$\vec{X}^* = \begin{cases} rand.(UB - LB) + LB, rand < z \\ \vec{X}_b(t) + \vec{vb} \cdot (W \cdot \vec{X}_A(t) - \vec{X}_B(t)), r < p \\ \vec{vc} \cdot \vec{X}(t), r \geq p \end{cases} \quad (7)$$

که  $\vec{X}^*$ : بیانگر موقعیت جدید کپک مخاطی،  $UB$  و  $LB$ : حدود بالا و پایین محدوده جست‌وجو و  $rand$  و  $r$ : مقدار تصادفی بین ۰ و ۱ هستند.

این الگوریتم نیز همانند سایر الگوریتم‌های فراابتکاری، با دریافت جمعیت اولیه و حداکثر تکرار، شروع به کار می‌کند. پس از آن، موقعیت اولیه کپک مخاطی و در ادامه برازندگی کلیه کپک‌های مخاطی محاسبه می‌شود. در گام بعدی، برازندگی‌های به‌دست‌آمده، مرتب‌سازی شده و بهترین و بدترین برازندگی به‌روزرسانی می‌شود. سپس وزن براساس روابط ریاضی محاسبه می‌شود. در مرحله آخر نیز بهترین برازندگی و بهترین موقعیت، به‌روزرسانی شده تا به بهترین پاسخ برسد (Li et al., 2020).

در تحقیق مربوط به معرفی این الگوریتم، عملکرد SMA با بررسی ۳۷ مسئله شامل توابع متنوع ریاضی و مسائل مختلف مهندسی اعتبارسنجی شده است؛ که نتایج، بیانگر عملکرد بسیار موفق آن در به‌دست آوردن مقدار بهینه مسائل مختلف در مقایسه با رقبا است. لذا در پژوهش حاضر نیز از این الگوریتم برای بهینه‌یابی تابع هدف استفاده می‌شود.

## ۲-۲- نشت‌یابی با استفاده از الگوریتم SMA

روش‌های بهینه‌یابی دیگری نیز توسط نصیری دهج (۱۴۰۲) مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج نشان داد الگوریتم SMA در بین دیگر روش‌ها در یافتن تک‌نشت موجود در شبکه‌ها عملکرد بهتری دارد. لذا از نتایج آن در تحقیق حاضر استفاده شده است. به‌طور کلی الگوریتم SMA در انجام فرآیند نشت‌یابی، روندی مطابق با مراحل زیر دارد.

- ۱- دریافت جمعیت اولیه و حداکثر تعداد تکرار به‌عنوان ورودی؛
- ۲- در نظر گرفتن مقدار ضریب نشت گرهی تصادفی ( $k$ ) در رابطه (۱) برای هر گره (تولید متغیرهای تصادفی اولیه)؛
- ۳- محاسبه تفاوت فشارهای شبیه‌سازی شده و میدانی و محاسبه تابع هدف از طریق رابطه (۲) (محاسبه برازندگی هر جواب)؛

۴- به‌روزرسانی بهترین برازندگی؛

۵- محاسبه وزن کپک مخاطی ( $\vec{W}$ ) براساس رابطه (۶)؛

۶- به‌روزرسانی پارامترهای  $vc$  و  $vb$  براساس توضیحات بخش ۲-۲؛

۷- تولید ضرایب نشت گرهی جدید (به‌روزرسانی موقعیت کپک مخاطی) با توجه به رابطه (۷)؛

۸- در صورت ارضا نشدن شرایط توقف، به مرحله ۳ بازگشته و روند الگوریتم تکرار می‌شود؛ در غیراین صورت، بهینه‌یابی پایان‌یافته و بهترین جواب یافت‌شده، ارائه می‌شود.

فرآیند واسنجی و بهینه‌یابی تابع هدف (رابطه (۱)) در هریک از سناریوها به‌وسیله الگوریتم مذکور، با دریافت مقدار جمعیت اولیه برابر با ۵۰ شروع می‌شود. در صورتی که مقدار تابع هدف به صفر همگرا شود، فرآیند به پایان رسیده و نشت‌یابی انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر، شرایط خاتمه الگوریتم دو مورد شامل ۱- رسیدن به مقدار حداکثر تکرار (۵۰۰ تکرار) و ۲- حاصل‌شدن مقدار صفر برای تابع هدف، در نظر گرفته شده است. اگر هریک از شرایط خاتمه رخ دهند، روند الگوریتم متوقف شده و بهترین جواب حاصل ارائه خواهد شد.

تعداد متغیرهای مسئله در هر شبکه برابر با تعداد گره‌های آن شبکه است. برای شبکه پولاکیس، بالما و هانوی تعداد متغیرها به ترتیب برابر با ۳۰، ۴۴۳ و ۳۱ است و حدود بالا و پایین این متغیرها در الگوریتم به صورت بازه صفر تا حداکثر مقدار ضریب نشت گرهی تعریف می‌شوند. خلاصه‌ای از مشخصات مسائل نشت‌یابی مورد بررسی، در جدول ۱ ارائه شده است.

به منظور افزایش کیفیت پاسخ‌های حاصل از الگوریتم، پارامترهای تنظیم‌کننده جست‌وجوی گسترده (Explore) و جست‌وجوی محلی (Exploit) در الگوریتم SMA تحت تحلیل حساسیت قرار داده شده‌اند. مقادیر مختلف این پارامترها با در نظر گرفتن حدود پیشنهادی توسط Li et al. (2020) بر روی یکی از شبکه‌ها (بالما) بررسی شد. سه پارامتر شامل اندازه جمعیت، تعداد تکرار و پارامتر  $Z$  به عنوان عوامل مؤثر بر عملکرد الگوریتم در نظر گرفته شدند. مقادیر جمعیت برابر با ۱۰۰، ۵۰ و ۲۰، تعداد تکرار برابر با ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ و مقدار  $Z$  برابر با ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ بر روی یکی از مسائل شبکه بالما بررسی شدند. در این شرایط ۲۷ ترکیب مختلف از پارامترها شکل گرفت که بر روی هر کدام پنج بار اجرا انجام شد. نتایج نشان داد، بهترین عملکرد الگوریتم در جمعیت ۵۰، تکرار ۵۰۰ و  $Z$  برابر با ۰/۰۳ حاصل می‌شود. لذا از این مقادیر برای پیش‌برد تحقیق حاضر استفاده شد.

جدول ۱- خلاصه‌ای از مشخصات مسائل نشت‌یابی مورد بررسی

| شماره | حداکثر ضریب نشت | شبکه مورد بررسی | تعداد متغیرها | تابع هدف  |
|-------|-----------------|-----------------|---------------|-----------|
| ۱     | ۱۰/۱۴           | پولاکیس         | ۳۰            | رابطه (۲) |
| ۲     | ۱۱/۲۵           |                 |               |           |
| ۳     | ۶/۰۸            |                 |               |           |
| ۴     | ۹/۱۲            |                 |               |           |
| ۵     | ۶/۷۶            |                 |               |           |
| ۶     | ۱۷/۴۲           | بالرما          | ۴۴۳           |           |
| ۷     | ۱۹/۳۶           |                 |               |           |
| ۸     | ۱۰/۴۵           |                 |               |           |
| ۹     | ۱۵/۶۸           |                 |               |           |
| ۱۰    | ۱۱/۶۱           |                 |               |           |
| ۱۱    | ۷۷/۵۲           | هانوی           | ۳۱            |           |
| ۱۲    | ۸۶/۱۴           |                 |               |           |
| ۱۳    | ۴۶/۵۱           |                 |               |           |
| ۱۴    | ۶۹/۷۷           |                 |               |           |
| ۱۵    | ۵۱/۶۸           |                 |               |           |

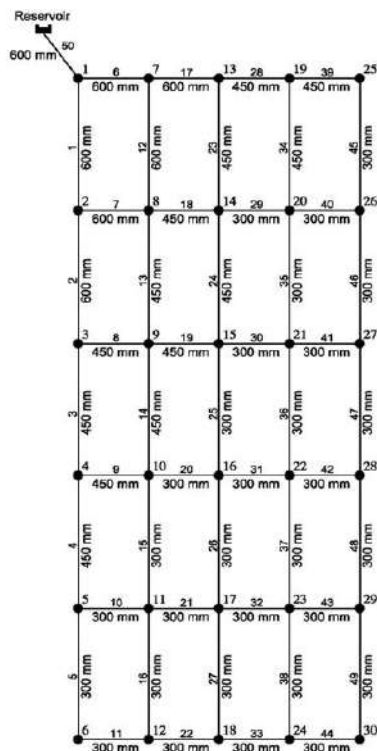
حلقه، ۳۰ گره، ۵۰ لوله و یک مخزن (با ارتفاع سطح آب برابر ۱۰۰ متر) است. دبی متوسط مصرف در کلیه گره‌های این شبکه برابر ۲۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در شبکه پولاکیس فرض شده است در گره‌های ۱۳، ۱۵ و ۱۸ فشارسنج و در ورودی شبکه دبی‌سنج وجود دارد.

شبکه مورد مطالعه بعدی، شبکه بالرما است که در استان آلمریا (کشور اسپانیا) قرار دارد. شبکه بالرما نخستین بار توسط Reza and Martínez (2006) ارائه شد. این شبکه دارای چهار مخزن آب، ۴۴۳ گره، ۴۵۴ لوله و ۸ حلقه است. متوسط سالانه دبی مصرف این شبکه برابر ۲۵/۲ میلیون گالن در روز (حدود ۱/۱۵ مترمکعب بر ثانیه) است. در این شبکه نیز در گره‌های ۱۴۵، ۱۸۰، ۳۵۷ و ۳۹۲ فشارسنج و در ورودی‌های شبکه، دبی‌سنج با هدف پایش شبکه قرار گرفته است. شبکه سوم، شبکه هانوی است که نمای کلی آن در شکل ۲-ج مشاهده می‌شود (Fujiwara and Khang, 1990). این شبکه شامل ۳۱ گره، ۳۴ لوله، ۳ حلقه و دارای یک مخزن با رقوم ثابت سطح آب برابر ۱۰۰ متر است. ضرایب هیزن ویلیامز لوله‌ها برابر ۱۳۰ است. در شبکه هانوی نیز برای پایش دبی و فشار در شبکه، فرض شده است در گره‌های ۵، ۱۲ و ۳۰ فشارسنج و در ورودی شبکه دبی‌سنج وجود دارد.

باتوجه به این‌که الگوریتم‌های فراابتکاری دارای ماهیت تصادفی هستند و معمولاً به نتایج حاصل از یک‌بار اجرای الگوریتم بر روی یک مسئله اکتفا نمی‌شود، در این تحقیق الگوریتم SMA بر روی هر سناریوی وجود نشت تنها یک‌بار اجرا شده است؛ زیرا هدف از این تحقیق، سنجش توانایی این الگوریتم در یافتن دقیق محل تک‌نشت با کم‌ترین هزینه محاسباتی و زمانی است. بنابراین نتایج حاصل از یک بار اجرای الگوریتم بر روی سناریوهای متنوع وجود تک‌نشت در سه شبکه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هم‌چنین باید توجه داشت با بررسی ۳۷ مسئله مجزا و انجام چندین اجرا بر روی آن‌ها، اثبات شده که الگوریتم SMA دارای انحراف معیار کوچکی در نتایج بوده و لذا نتایج تک‌اجرای آن تا حد زیادی قابل اعتماد است (Li et al., 2020).

### ۳- شبکه‌های مورد مطالعه

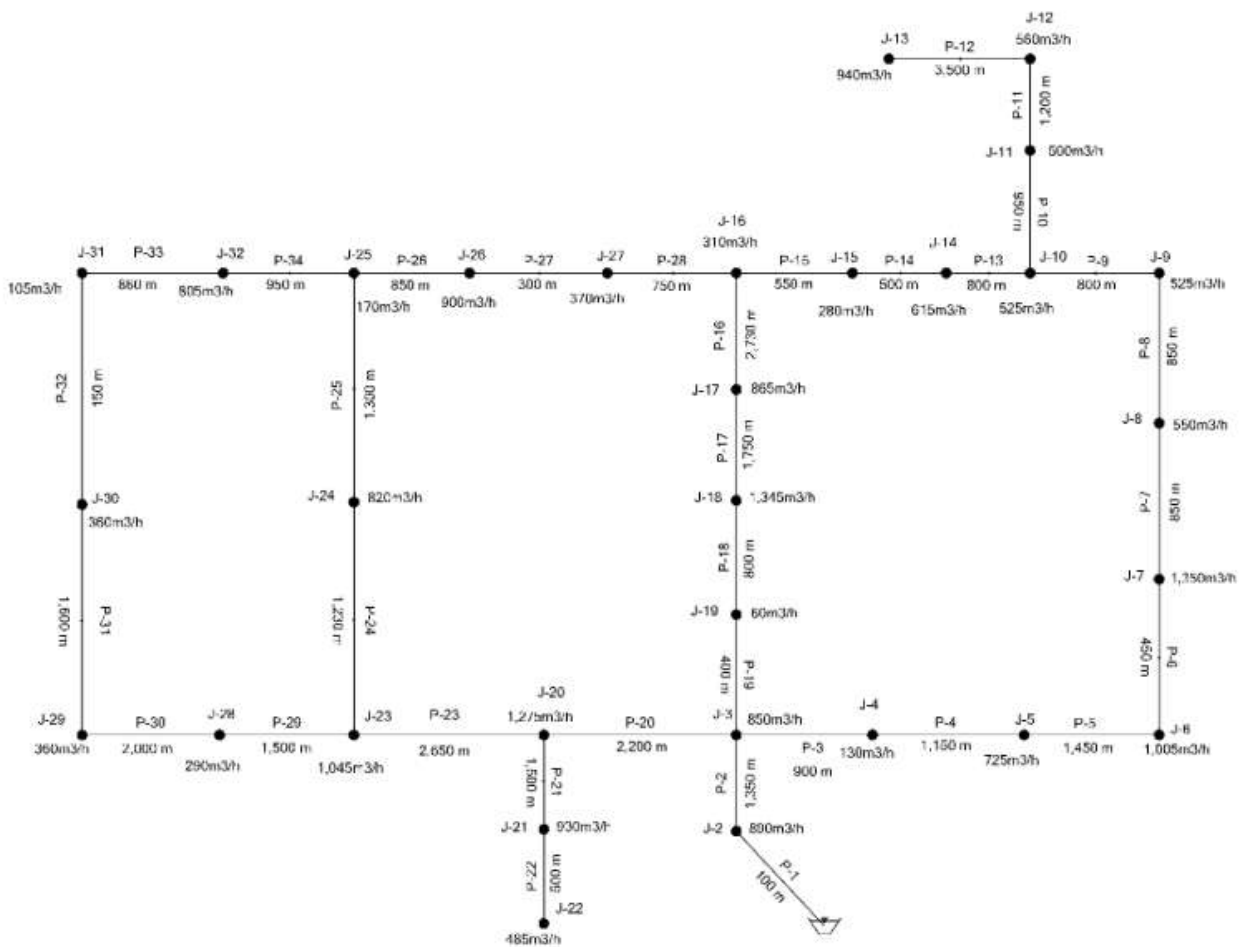
در این مطالعه، از سه شبکه برای بررسی روش پیشنهادی استفاده شده است. اولین شبکه، پولاکیس است که نمای کلی آن در شکل ۲-الف آورده شده است (Poulakis et al., 2003). در این شبکه، طول لوله‌های افقی و عمودی به ترتیب برابر ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متر، ضریب هیزن-ویلیامز هر لوله برابر ۱۳۰ بوده و دارای ۲۰



(الف) شبکه پولاکیس



(ب) شبکه بالرما



(ج) شبکه هانوی

### شکل ۲- نمای شبکه‌های مورد مطالعه

#### ۴- نتایج و بحث

هدف در زمان کوتاهی به صفر رسیده است. صفر بودن مقدار تابع هدف بیانگر کیفیت الگوریتم SMA در نشتیابی و یافتن مقدار و محل دقیق نشت است. با افزایش تعداد گره‌های شبکه، تعداد متغیرهای مسئله افزایش یافته و مسئله پیچیده‌تر شده است. بنابراین الگوریتم طی تعداد تکرار بیش‌تری توانسته محل نشت را بیابد و مقدار تابع هدف به صفر برسد. درواقع در شبکه بالما با صرف زمان محاسبات بالاتر و تعداد ارزیابی بیش‌تر تابع هدف، مقدار بهینه مسئله را به دست آورده است. درحالی که در شبکه‌های پولاکیس و هانوی که به مراتب تعداد گره‌های کم‌تری دارند، همگرایی در تعداد تکرار پایین و با صرف زمان محاسبات کم‌تر صورت گرفته است.

در پژوهش حاضر، مقدار و محل نشت در هریک از سناریوها به صورت تصادفی تعیین و روش پیشنهادی طی ۱۵ سناریوی وجود تک‌نشت در سه شبکه پیاده‌سازی شد. هر سناریو بر روی الگوریتم SMA، با استفاده از یک لپ‌تاپ دارای هفت هسته با سرعت پردازش ۲/۸ گیگاهرتز و ۱۶ گیگ رم، یکبار اجرا شد. نتایج حاصل از اجرای سناریوهای مختلف در سه شبکه توزیع آب در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در کلیه سناریوها مقدار تابع

جدول ۲- نتایج نشتیابی با استفاده از الگوریتم SMA

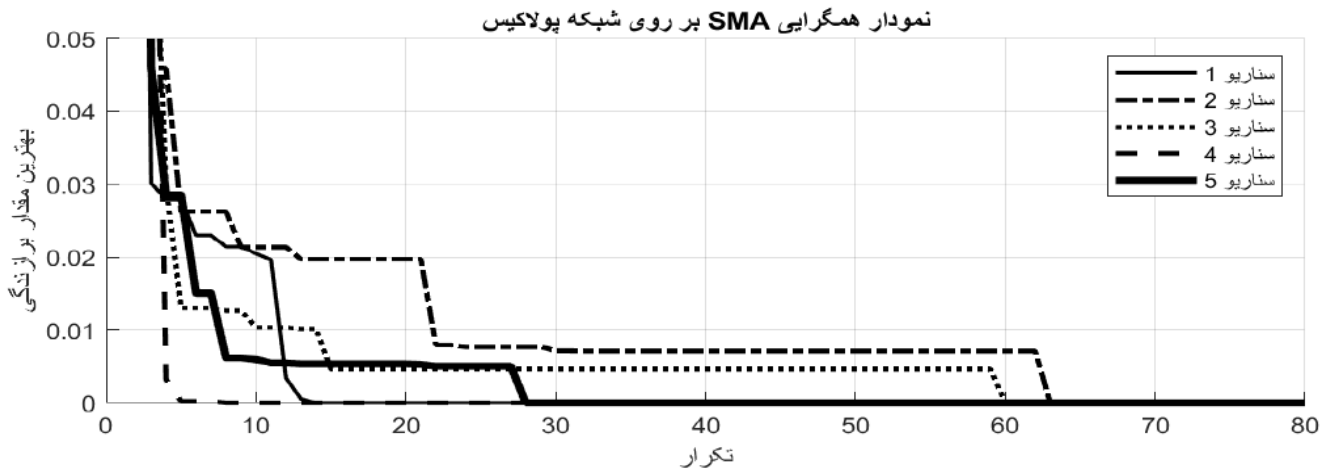
| نام شبکه | مشخصات مسئله |               |                                                  | مشخصات الگوریتم |            |               | نتایج          |                          |
|----------|--------------|---------------|--------------------------------------------------|-----------------|------------|---------------|----------------|--------------------------|
|          | شماره اجرا   | گره دارای نشت | مقدار ضریب نشت<br>( <sup>۵</sup> متر/ثانیه/لیتر) | تعداد جمعیت     | تکرار توقف | تعداد ارزیابی | مقدار تابع هدف | مدت زمان اجرا<br>(ثانیه) |
| پولاکیس  | ۱            | ۲۰            | ۱۰/۱۴                                            | ۵۰              | ۲۵         | ۱۲۵۰          | ۰              | ۲۸                       |
|          | ۲            | ۹             | ۱۱/۲۵                                            | ۵۰              | ۶۳         | ۳۱۵۰          | ۰              | ۷۵                       |
|          | ۳            | ۲۴            | ۶/۰۸                                             | ۵۰              | ۶۰         | ۳۰۰۰          | ۰              | ۶۸                       |
|          | ۴            | ۶             | ۹/۱۲                                             | ۵۰              | ۸          | ۴۰۰           | ۰              | ۱۱                       |
|          | ۵            | ۲۲            | ۶/۷۶                                             | ۵۰              | ۲۸         | ۱۴۰۰          | ۰              | ۳۲                       |
| بالما    | ۱            | ۴۳            | ۱۷/۴۲                                            | ۵۰              | ۲۴۳        | ۱۲۱۵۰         | ۰              | ۵۳۶                      |
|          | ۲            | ۳۵۱           | ۱۹/۳۶                                            | ۵۰              | ۱۱۴        | ۵۷۰۰          | ۰              | ۱۶۹                      |
|          | ۳            | ۱۱۴           | ۱۰/۴۵                                            | ۵۰              | ۱۵۲        | ۷۶۰۰          | ۰              | ۳۱۸                      |
|          | ۴            | ۴۰۳           | ۱۵/۶۸                                            | ۵۰              | ۱۱۱        | ۵۵۵۰          | ۰              | ۲۲۷                      |
|          | ۵            | ۲۰۸           | ۱۱/۶۱                                            | ۵۰              | ۳۳۷        | ۱۶۸۵۰         | ۰              | ۵۷۹                      |
| هانوی    | ۱            | ۲             | ۷۷/۵۲                                            | ۵۰              | ۱۴         | ۷۰۰           | ۰              | ۸                        |
|          | ۲            | ۷             | ۸۶/۱۴                                            | ۵۰              | ۲۲         | ۱۱۰۰          | ۰              | ۱۳                       |
|          | ۳            | ۲۵            | ۴۶/۵۱                                            | ۵۰              | ۱۰         | ۵۰۰           | ۰              | ۵                        |
|          | ۴            | ۱۱            | ۶۹/۷۷                                            | ۵۰              | ۱۳         | ۶۵۰           | ۰              | ۶                        |
|          | ۵            | ۲۲            | ۵۱/۶۸                                            | ۵۰              | ۱۲         | ۶۰۰           | ۰              | ۶                        |

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که در شبکه‌های مورد بررسی، هرچه گره دارای نشت، از مخزن دورتر بوده و به عبارتی گره دارای نشت به انتهای شبکه نزدیک‌تر باشد، به دلیل افزایش افت‌های ناشی از طول مسیر، عمل نشتیابی سریع‌تر انجام شده و الگوریتم بهتر توانسته است محل و مقدار نشت را بیابد. متفاوت بودن مقدار نشت در هریک از سناریوها و عملکرد موفق الگوریتم در یافتن نشت در کلیه سناریوها، بیانگر آن است که کوچک و یا بزرگ بودن مقدار نشت تأثیر قابل توجهی در سرعت و دقت نشتیابی با

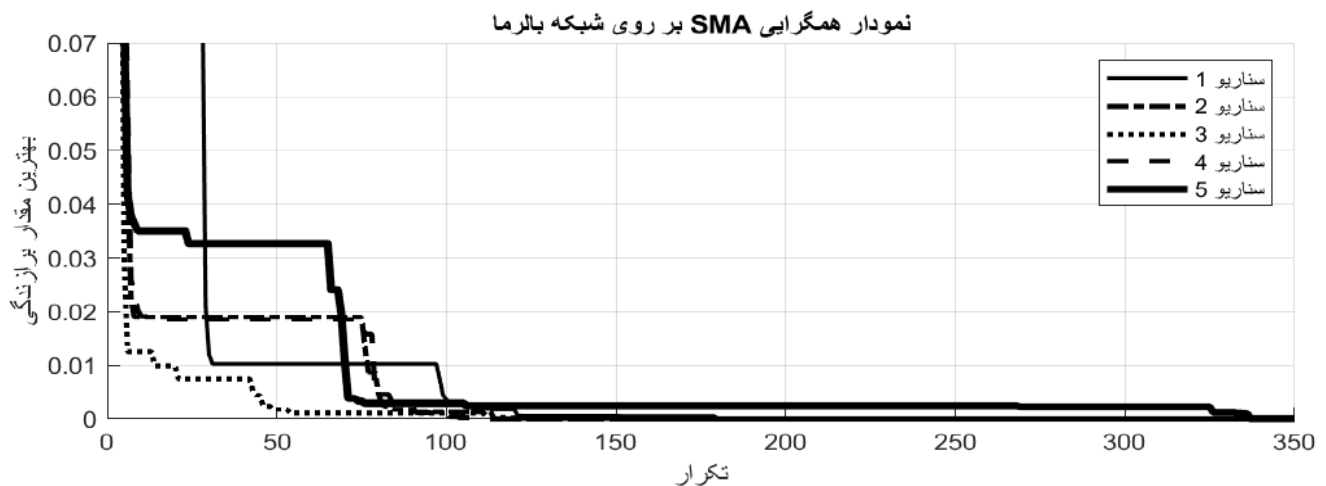
استفاده از روش پیشنهادی در این تحقیق ندارد. به‌طورکلی با استناد به نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی سه شبکه مختلف با شرایط متفاوت می‌توان دریافت، روش مذکور مستقل از تعداد گره‌ها، شرایط شبکه، محل و مقدار نشت عمل می‌کند و تحت هر شرایطی قادر به یافتن مقدار و محل نشت به‌طور دقیق و با سرعت قابل قبول است. ولی باید توجه داشت حجم محاسباتی الگوریتم با افزایش تعداد گره‌های شبکه رابطه مستقیم، و با افزایش فاصله نشت از مخازن

درحالی‌که در شبکه بالرما به‌علت وسعت شبکه و تعداد زیاد گره‌ها، همگرایی طی تعداد تکرار بیش‌تری از روند الگوریتم انجام‌شده است. اما به‌طور کلی، در هر سه شبکه عملیات واسنجی-بهینه‌یابی با استفاده از الگوریتم SMA به‌طور دقیق و با تعداد ارزیابی مناسب انجام‌شده است.

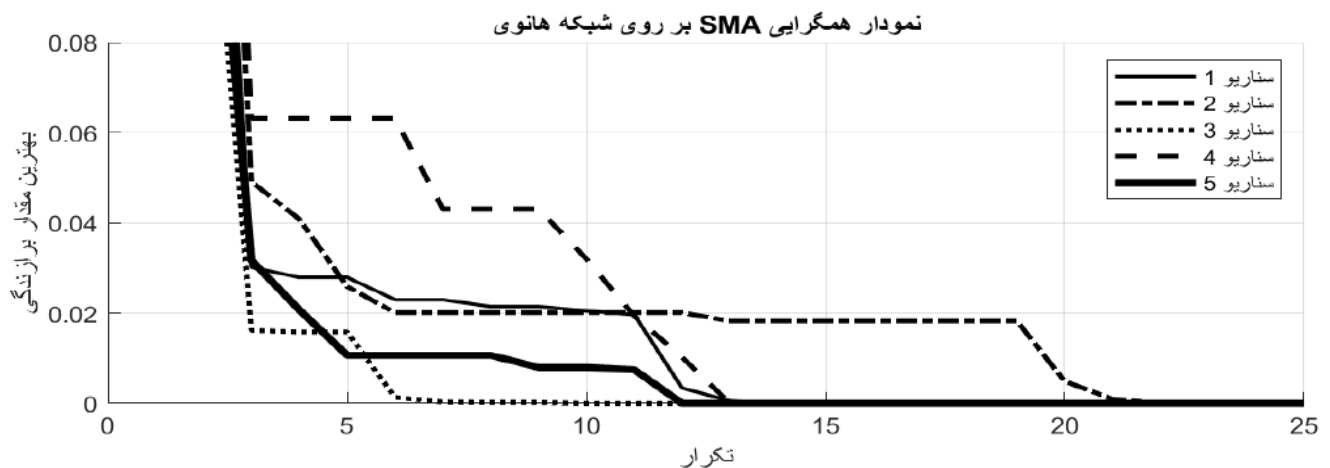
رابطه عکس دارد. در شکل‌های ۳ الی ۵، نمودار همگرایی ۱۵ سناریو در سه شبکه یادشده نشان داده شده است. با استناد به این نتایج می‌توان دریافت در کلیه سناریوهای اجراشده بر روی شبکه هانوی، به‌علت کوچک بودن ابعاد شبکه، همگرایی به‌سرعت صورت گرفته است.



شکل ۳- نمودار همگرایی الگوریتم SMA طی ۵ سناریو بر روی شبکه پولاکیس



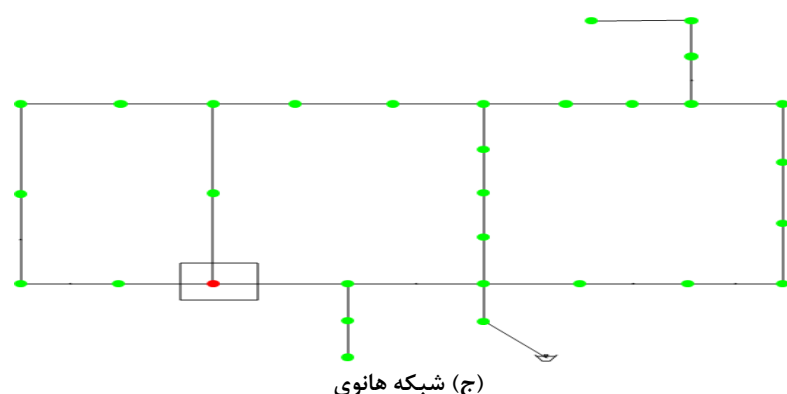
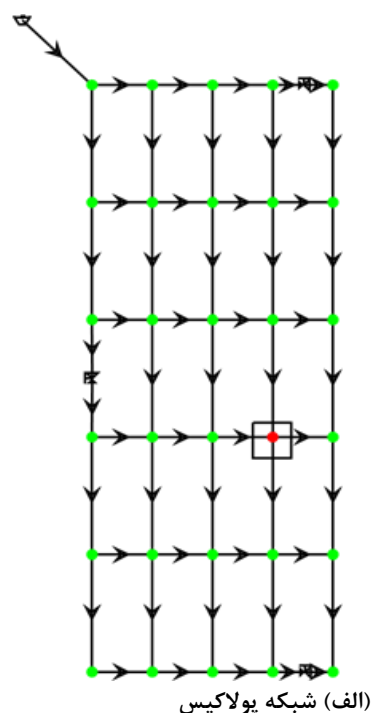
شکل ۴- نمودار همگرایی الگوریتم SMA طی ۵ سناریو بر روی شبکه بالرما



شکل ۵- نمودار همگرایی الگوریتم SMA طی ۵ سناریو بر روی شبکه هانوی

نشت‌یابی توسط روش ارائه‌شده در پژوهش حاضر، بدون خطا صورت گرفته است و محل نشت در نظر گرفته‌شده و نشت تشخیص داده‌شده توسط روش پیشنهادی، بر یکدیگر منطبق هستند. با توجه به نتایج حاصل از یافتن نشت موجود در شبکه‌ها با استفاده از الگوریتم SMA و دقت این الگوریتم در مسائل نشت‌یابی، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی عملکرد این الگوریتم در شبکه‌های آبرسانی دارای بیش از یک نشت نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

در شکل ۶ برای هریک از شبکه‌ها، شمایی از نتایج حاصل از نشت‌یابی به روش مذکور برای یک سناریو به عنوان نمونه (سناریوهای شماره ۱، ۱ و ۵ به ترتیب در شبکه پولاکیس، بالرما و هانوی) آورده شده است. در این شکل‌ها نماد مربع، بیانگر محل نشت در نظر گرفته‌شده طی سناریوی مورد نظر؛ گره دارای رنگ قرمز، بیانگر محل نشت یافت‌شده توسط روش پیشنهادی و گره‌های دارای رنگ سبز، بیانگر عدم وجود نشت هستند که توسط الگوریتم تشخیص داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عمل



- راهنمای شکل
- محل نشت
  - گره دارای نشت
  - گره فاقد نشت

شکل ۶- نمایش تصویری نشت‌یابی توسط روش پیشنهادی

یافت می‌شود. سناریوهای وجود نشت به صورت تصادفی تعریف شده و از الگوریتم SMA برای بهینه‌یابی تابع هدف استفاده شد. کارایی روش پیشنهادی در سه شبکه توزیع آب با ابعاد متفاوت طی ۱۵ سناریوی وجود تک‌نشت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد این روش در یافتن تک‌نشت موجود در شبکه‌ها، عملکرد

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک روش جدید برای تعیین مقدار و محل وقوع نشت در شبکه‌های توزیع آب پیشنهاد شد. در روش ارائه‌شده، محل نشت‌های مخفی با استفاده از روش واسنجی-بهینه‌یابی

- water distribution systems using Artificial Neural Networks", *Water*, 13(13), 1841, <https://doi.org/10.3390/w13131841>.
- Chakraborty, A., and Ray, S., (2023), "Operational cost minimization of a microgrid with optimum battery energy storage system and plug-in-hybrid electric vehicle charging impact using slime mould algorithm", *Energy*, 278, 127842, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127842>.
- Eliades, D.G., Kyriakou, M., Vrachimis, S., and Polycarpou, M.M., (2016), "EPANET-MATLAB toolkit: An open-source software for interfacing EPANET with MATLAB", *Proceedings of 14th International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI2016)*, Amsterdam, The Netherlands, (pp. 7-9)
- El-zahab, S., and Zayed, T., (2019), "Leak detection in water distribution networks: An introductory overview", *Smart Water*, 4(1), 1-23, <https://doi.org/10.1186/s40713-019-0017-x>.
- Farhat, M., Kamel, S., Atallah, A.M., Abdelaziz, A.Y., and Tostado-Veliz, M., (2023), "Developing a strategy based on weighted mean of vectors (INFO) optimizer for optimal power flow considering uncertainty of renewable energy generation", *Neural Computing and Applications*, 35(19), 13955-13981, <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08427-x>.
- Fujiwara, O., and Khang, D.B., (1990), "A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks", *Water Resources Research*, 26(4), 539-549, <https://doi.org/10.1029/wr026i004p00539>.
- Hajibandeh, E., and Nazif, S., (2018), "Pressure zoning approach for leak detection in water distribution systems based on a multi objective ant colony optimization", *Water Resources Management*, 32(7), 2287-2300, <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1929-1>.
- Hu, X., Han, Y., Yu, B., Geng, Z., and Fan, J., (2021), "Novel leakage detection and water loss management of urban water supply network using multiscale neural networks", *Cleaner Production*, 278, 123611, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123611>.
- Li, S., Chen, H., Wang, M., Heidari, A.A., and Mirjalili, S., (2020), "Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization", *Future Generation Computer Systems*, 111, 300-323, <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.055>.
- Lijuan, W., Hongwei, Z., and Hui, J., (2012), "A leak detection method based on EPANET and genetic algorithm in water distribution systems", In: *Software Engineering and Knowledge Engineering: Theory and Practice*, 1, 459-465, [https://doi.org/10.1007/978-3-642-03718-4\\_57](https://doi.org/10.1007/978-3-642-03718-4_57).
- Maghrebi, M.F., Aghaebrahimi, M.R., Taherian, H., and Attari, M., (2014), "Determining the amount and location of leakage in water supply networks using a neural network improved by the Bat optimization algorithm", *Civil Engineering and Urbanism*, 4(3), 322-327.

بسیار مناسبی دارد و قادر به یافتن محل و مقدار نشت به‌طور دقیق است. در شبکه بالارما به‌طور میانگین طی ۱۹۱ تکرار و صرف ۳۶۶ ثانیه زمان، الگوریتم به همگرایی رسیده و عمل نشت‌یابی انجام گرفته است. درحالی‌که در شبکه هانوی به‌علت کوچک بودن ابعاد شبکه و کم‌تر بودن تعداد گره‌ها به‌طور میانگین طی ۱۴ تکرار و صرف ۷ ثانیه زمان، همگرایی صورت گرفته است. زمانی که محل نشت در موقعیتی دورتر از ورودی شبکه باشد، تشخیص نشت توسط الگوریتم به‌دلیل افزایش افت‌های ناشی از طول مسیر، ساده‌تر بوده و طی تعداد تکرار کم‌تری، الگوریتم به نتیجه مطلوب می‌رسد. نشت‌یابی با استفاده از روش مذکور، مستقل از ابعاد و شرایط شبکه، مقدار و محل نشت بوده و تحت هر شرایطی محل و مقدار تک‌نشت موجود با دقت مناسبی تشخیص داده می‌شود. به‌طور کلی با استناد به نتایج حاصل با استفاده از ظرفیت این الگوریتم فراابتکاری قدرتمند، نشت موجود در شبکه را با دقت بسیار بالا و با صرف کم‌ترین زمان می‌توان یافت و برای رفع آن اقدام نمود.

## ۶- مراجع

- بوستانی، آ.، و خدانشناس، س.، (۱۳۹۴)، "بررسی روش نشت‌یابی در شبکه آب تحت فشار بر مبنای رابطه فشار-نشت (ارائه کد بهینه‌یابی مکان‌یابی نشت)", *آب و توسعه پایدار*, ۱۰(۱)، ۵۹-۶۶.
- شکفته، م.، جلیلی قاضی‌زاده، م.، و یزدی، ج.، (۱۳۹۹)، "تئوری شناسایی محدوده نشت در نواحی مجزای مجازی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی"، *تحقیقات منابع آب ایران*, ۱۶(۳)، ۴۷-۶۲.
- مغربی، ف.، حسن‌زاده، ی.، و یزدانی، س.، (۱۳۹۰)، "کالیبراسیون مدل‌های شبکه توزیع آب شهری با استفاده از روش بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها"، *آب و فاضلاب*, ۲۴(۱)، ۱۰۱-۱۱۱.
- نصیری دهج، م.، (۱۴۰۲)، "یافتن محل شکستگی در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تحلیل داده‌های فشار"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
- Bardhan, A., and Asteris, P.G., (2023), "Application of hybrid ANN paradigms built with nature inspired meta-heuristics for modelling soil compaction parameters", *Journal of Transportation Geotechnics*, 41, 100995, <https://doi.org/10.1016/j.jtrgeo.2023.100995>.
- Capelo, M., Brentan, B., Monteiro, L., and Covas, D., (2021), "Near-real time burst location and sizing in



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

- Marzola, I., Mazzoni, F., Alvisi, S., and Franchini, M., (2022), "Leakage detection and localization in a water distribution network through comparison of observed and simulated pressure data", *Water Resources Planning and Management*, 148(1), 04021096, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001503](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001503).
- Moasheri, R., and Jalili-Ghazizadeh, M., (2020), "Locating of probabilistic leakage areas in water distribution networks by a calibration method using the imperialist competitive algorithm", *Water Resources Management*, 34(1), 35-49, <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02388-4>.
- Perez-Perez, E., Lopez-Estrada, F.R., Valencia-Palomo, G., Torres, L., Puig, V., and Mina-Antonio, J., (2021), "Leak diagnosis in pipelines using a combined artificial neural network approach", *Control Engineering Practice*, 107, 104677, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104677>.
- Poulakis, Z., Valougeorgis, D., and Papadimitriou, C., (2003), "Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 18(4), 315-327, [https://doi.org/10.1016/s0266-8920\(03\)00045-6](https://doi.org/10.1016/s0266-8920(03)00045-6).
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D., and Koppel, T., (2010), "A review of methods for leakage management in pipe networks", *Urban Water Journal*, 7(1), 25-45, <https://doi.org/10.1080/15730621003610878>.
- Reca, J., and Martinez, J., (2006), "Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks", *Water Resources Research*, 42(5), 1-9, <https://doi.org/10.1029/2005WR004383>.
- Sousa, J., Ribeiro, L., Muranho, J., and Marques, A.S., (2015). "Locating leaks in water distribution networks with simulated annealing and graph theory", *Journal of Procedia Engineering*, 119, 63-71, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.854>.
- Wachla, D., Przystalka, P., and Moczulski, W., (2015), "A method of leakage location in water distribution networks using artificial neuro-fuzzy system", *IFAC-PapersOnLine*, 48, 1216-1223, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.692>.
- Wan, X., Kuhanestani, P.K., Farmani, R., and Keedwell, E., (2022), "Literature review of data analytics for leak detection in water distribution networks: A focus on pressure and flow smart sensors", *Water Resources Planning and Management*, 148(10), 03122002, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001597](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001597).
- Wu, Z.Y., and Sage, P., (2008), "Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration", *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, pp. 1-11, Cincinnati, Ohio, USA, August 27-30, [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)180](https://doi.org/10.1061/40941(247)180).

**Research Paper**

**مقاله پژوهشی**

**Study on the Ability of *Scenedesmus Obliquus* in the Bio-Removal of Polyethylene Microplastics from Aquatic Environments and Optimization of the Bio-removal Effective Parameters**

**امکان سنجی توانایی ریز جلبک سندسموس  
آبلیکوس در حذف زیستی میکروپلاستیک  
پلی اتیلن از محیط آبی و بهینه سازی پارامترهای  
مؤثر بر حذف زیستی**

Seyyed Hesam Sharif Vaghefi<sup>1</sup>, Roya Mafigholami<sup>2\*</sup>, Omid Tavakoli<sup>3</sup> and Hamid Moghimi<sup>4</sup>

1- PhD Student, Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

4- Associate Professor, Department of Microbiology, School of Biology, University of Tehran, Tehran, Iran.

\*Corresponding Author, Email: [r.mafigholami@wtiau.ac.ir](mailto:r.mafigholami@wtiau.ac.ir)

Received: 14/12/2024

Revised: 06/03/2025

Accepted: 13/07/2025

Accepted: 26/05/2025

© IWWA

سیدحسام شریف‌واقفی<sup>۱</sup>، رویا مافی غلامی<sup>۲\*</sup>، امید توکلی<sup>۳</sup> و  
حمید مقیمی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۳- استادیار دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۴- دانشیار گروه میکروبیولوژی، دانشکده زیست‌شناسی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

\*نویسنده مسئول، ایمیل: [r.mafigholami@wtiau.ac.ir](mailto:r.mafigholami@wtiau.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۱۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲

© انجمن آب و فاضلاب ایران

**Abstract**

Microplastics refer to plastic particles with a diameter of less than 5 mm, which create significant environmental problems due to their small size, the lack of sufficient technology for removal, and the potential to cause side effects. The microalga *scenedesmus obliquus* has the ability to secrete ligninolytic enzymes and exopolysaccharides, enabling it to degrade microplastics and utilize them as a carbon source. In the present study, by optimizing the cultivation conditions of *scenedesmus obliquus*, the growth rate of the microalgae was enhanced, and subsequently, the feasibility of polyethylene microplastics bioremoval and the effects of various parameters on this process were investigated. According to the results obtained, the highest percentage of polyethylene microplastic removal was achieved at an optical density of 1 for *scenedesmus*, a stirring speed of 150 rpm, and a microplastic size of 45  $\mu\text{m}$ . Gel chromatography analysis showed that the molecular weight of the microplastic decreased by approximately 14% after bioremoval process. Additionally, FTIR analysis indicated that the removal of the carbonyl functional group in the wavelength range of 1400-1600 nm could be considered as a factor confirming the bioremoval of polyethylene microplastics.

**Keywords:** Bioremoval, Design Expert, Microalgae, Microplastic, Polyethylene.

**چکیده**

میکروپلاستیک‌ها به ذرات پلاستیکی با قطر کوچک‌تر از ۵ میلی‌متر گفته می‌شود که به دلیل کوچک بودن، عدم وجود فناوری کافی در حذف و همچنین پتانسیل ایجاد عوارض جانبی، مشکلات محیط‌زیستی عمده‌ای ایجاد می‌کنند. ریز جلبک سندسموس آبلیکوس به دلیل توانایی ترشح آنزیم‌های لیگنینولیتیک و آگزوپلی ساکارید قابلیت تجزیه میکروپلاستیک‌ها و مصرف آن به عنوان منبع کربنی را دارد. در مطالعه حاضر با بهینه‌سازی شرایط کشت ریز جلبک سندسموس آبلیکوس، رشد ریز جلبک بهینه‌شده و در ادامه امکان‌سنجی حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن و تأثیر پارامترهای مؤثر بر حذف زیستی پلی‌اتیلن توسط ریز جلبک سندسموس آبلیکوس بررسی شد. با توجه به نتایج، بالاترین درصد حذف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن در چگالی نوری سندسموس ۱، سرعت هم‌زدن ۱۵۰ دور بر دقیقه و اندازه میکروپلاستیک ۴۵ میکرومتر به دست آمد. آنالیز ژل کروماتوگرافی نشان داد که وزن مولکولی میکروپلاستیک پس از حذف زیستی حدود ۱۴٪ کاهش یافت. همچنین آنالیز FTIR نشان داد که حذف گروه عاملی کربونیل در محدوده طول موج ۱۴۰۰-۱۶۰۰ نانومتر می‌تواند به عنوان المان تأیید حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن مورد توجه قرار گیرد.

**کلمات کلیدی:** پلی‌اتیلن، حذف زیستی، ریز جلبک، طراحی آزمایش، میکروپلاستیک.

پلاستیکی است. بسیاری از کشورها و سازمان‌ها مجبور به صرف هزینه‌های بالا برای جمع‌آوری و تصفیه آب‌های آلوده به میکروپلاستیک هستند. همچنین، این آلودگی‌ها می‌توانند به کاهش کیفیت منابع آب و محصولات کشاورزی منجر شوند که در نهایت تأثیر منفی بر امنیت غذایی و سلامت جامعه دارد (Magalhães et al., 2020). اگرچه میکروپلاستیک‌ها در محیط شناسایی می‌شوند، اما در مورد خطرات آن‌ها مطالعات کافی وجود ندارد. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در ارزیابی خطرات این ذرات بر روی انسان و محیط‌زیست، متغیر بودن ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، ترکیب و غلظت آن‌ها است. علاوه بر آن، شناسایی میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی کار دشواری است و روش‌های استاندارد برای آن تعریف نشده است (Prata et al., 2021).

میکروپلاستیک‌ها به‌طور کلی به دو دسته اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند. میکروپلاستیک‌های اولیه، قطعات ریز پلاستیکی هستند که به‌طور هدفمند در اندازه کوچکی ساخته می‌شوند. این میکروپلاستیک‌ها معمولاً در پاک‌کننده‌های صورت و لوازم آرایشی و در برخی موارد، در پزشکی به‌عنوان حامل دارو استفاده شده‌اند. به‌عنوان مثال، گلوله‌های پلاستیکی، به‌عنوان مواد اولیه برای ساخت محصولات پلاستیکی و میکروبیدها، در کالاهای مراقبت از سلامت انسان به‌کار رفته‌اند (Wu et al., 2022). گلوله‌های پلاستیکی از پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌استایرن (PS) و ذرات پلی‌الفین تشکیل شده و ماهیتی چربی‌دوست دارند؛ یعنی به‌راحتی مواد شیمیایی مضر و سمی را از آب اطراف سطح خود جذب می‌کنند (An et al., 2020).

میکروپلاستیک‌های ثانویه، قطعات کوچک پلاستیکی هستند که از تجزیه زباله‌های پلاستیکی بزرگ‌تر، هم در دریا و هم در خشکی به‌دست می‌آیند. با گذشت زمان، اوج گرفتن تخریب فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی و همچنین اکسیداسیون نوری ناشی از قرار گرفتن در معرض نور خورشید، می‌تواند یکپارچگی ساختاری زباله‌های پلاستیکی را به اندازه‌ای کاهش دهد که در نهایت با چشم غیرمسلح قابل تشخیص نباشد. یکی از عوامل تخریب پلاستیک‌ها به قطعات کوچک‌تر، فرآیند تخریب نوری توسط اشعه ماورای بنفش نور خورشید است که منجر به شکستن پیوند شیمیایی پلیمری از طریق فرآیند اکسیداسیون می‌شود. همچنین هوا نیز باعث تجزیه پلاستیک‌های بزرگ به قطعات کوچک می‌شود (Cutroneo et al., 2020).

در حال حاضر، از میان پلاستیک‌ها بیش‌ترین تقاضا به‌ترتیب مربوط به پلی‌اتیلن (۳۶٪)، پلی‌پروپیلن (۲۱٪)، پلی‌وینیل کلراید (۱۲٪) و بقیه برای پلی‌استایرن، پلی‌اتیلن ترفتالات، پلی‌اورتان و

استفاده از پلاستیک در جامعه امروزی مزایای بسیاری برای سلامت انسان و محیط‌زیست دارد. بسته‌بندی‌های پلاستیکی باعث جلوگیری از هدر رفتن مواد غذایی و آلوده شدن آن‌ها شده و در نتیجه موجب صرفه‌جویی در منابع می‌شود. وزن سبک بسته‌بندی‌های پلاستیکی در مقایسه با سایر مواد نفتی باعث کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل و نقل می‌شود. مواد پلاستیکی با چگالی کم، جایگزین قطعات فلزی در اتومبیل و هواپیما شده است که مصرف سوخت و انتشار آلودگی را کاهش می‌دهد. لباس‌های حفاظت فردی و تجهیزات ایمنی مانند کلاه، کیسه‌های هوا و غیره مانعی در مقابل صدمه به انسان هستند (Boucher and Friot, 2017). همچنین در علم پزشکی از پلاستیک برای تولید کیسه‌های خون، لوله‌ها، سرنگ‌های یک‌بار مصرف و پروتزها استفاده می‌شود. با وجود مزایای زیاد پلاستیک‌ها، افزایش تولید آن طی سال‌های اخیر موجب تولید انبوهی از زباله‌های پلاستیکی در محیط‌زیست شده که دوام، ماندگاری و سرعت پایین بازیافت آن‌ها موجب بروز معضلات محیط‌زیستی شده است. امروزه حضور این مواد در محیط‌زیست، به‌عنوان آلاینده‌های نوظهور شناخته شده و در محیط‌های آبی در سراسر جهان یافت می‌شوند (Yu et al., 2018).

پلاستیک‌ها به‌دلیل دفع غیرسیستماتیک وارد محیط‌های آبی شده و تأثیرات نامطلوبی بر روی حیات موجودات دریایی می‌گذارند که طی چند دهه اخیر این موضوع، نگرانی‌های زیادی را به‌وجود آورده است. این مواد پلاستیکی با روش‌های مختلف تخریب شده و استحکام ساختاری خود را از دست می‌دهند. تخریب گسترده پلاستیک‌ها در نهایت منجر به ایجاد قطعات و تکه‌های مختلف پودری یا پلاستیک‌هایی با اندازه میکروسکوپی می‌شود که میکروپلاستیک نامیده می‌شوند (Chia et al., 2021).

میکروپلاستیک‌ها معمولاً به‌عنوان پلاستیک‌هایی با قطر کوچک‌تر از ۵ میلی‌متر تعریف می‌شوند که به‌دلیل کوچک بودن، عدم وجود فناوری کافی در حذف و همچنین پتانسیل ایجاد عوارض جانبی، از اهمیت بیش‌تری برخوردارند. یکی از مهم‌ترین مضرات میکروپلاستیک‌ها، تأثیر منفی آن‌ها بر اکوسیستم‌های آبی است. این ذرات می‌توانند به‌راحتی توسط موجودات دریایی بلعیده شوند و در زنجیره غذایی تجمع یابند. با ورود این ذرات به بدن موجودات زنده، خطراتی برای سلامت آن‌ها ایجاد می‌شود و در نهایت ممکن است به انسان‌ها نیز منتقل شوند. از دیگر معایب میکروپلاستیک‌ها، هزینه‌های اقتصادی ناشی از پاک‌سازی و مدیریت آلودگی‌های

میکروپلاستیک‌ها نرخ رشد بالاتری در مقایسه با جلبک در شرایط رشد عادی دارند (Cunha et al., 2019).

سندسموس آلیکوس یک جلبک تک‌سلولی سبز متعلق به شاخه کلروفیتا بوده که در اکثر منابع آب شیرین یافت می‌شود. سندسموس آلیکوس توانایی فتوسنتز بالایی داشته و از طرفی پتانسیل جذب کربن زیادی دارد. از طرفی سندسموس به‌دلیل توانایی ترشح آنزیم‌های لیگنینولیتیک و اگزوپلی ساکارید قابلیت تجزیه میکروپلاستیک‌ها و مصرف آن به‌عنوان منبع کربنی را دارد (Silambarasan et al., 2023).

میزان زیست‌توده فعال جلبک در فرآیند حذف زیستی میکروپلاستیک‌ها پارامتر مؤثری بوده و تأثیر مستقیمی بر راندمان حذف دارد. در مطالعه حاضر با بهینه‌سازی شرایط کشت ریزجلبک سندسموس آلیکوس، رشد ریزجلبک بهینه شده و در ادامه امکان‌سنجی حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن و تأثیر پارامترهای مؤثر بر حذف زیستی پلی‌اتیلن توسط ریزجلبک سندسموس آلیکوس بررسی شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد و تجهیزات

در مطالعه حاضر استوک سندسموس آلیکوس از بانک ملی جلبک ایران تهیه شده و برای کشت از محیط کشت BG-11 مطابق با جدول ۱ استفاده شد (López-Pacheco et al., 2021).

جدول ۱- اجزای شیمیایی محیط کشت BG-11

| غلظت (گرم بر لیتر) | ترکیب شیمیایی                        |
|--------------------|--------------------------------------|
| ۱/۵                | NaNO <sub>3</sub>                    |
| ۰/۰۷۵              | MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O |
| ۰/۰۳۶              | CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O |
| ۰/۰۲               | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>      |
| ۱/۰                | Trace Metal Mixture                  |
| ۰/۰۴               | K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>      |
| ۰/۶                | Citric acid                          |
| ۰/۶                | Ferric ammonium citrate              |

کلیه مواد مورد نیاز محیط کشت از شرکت مرک آلمان تهیه شد. محیط کشت و کلیه لوازمی که در کشت جلبک مورد استفاده قرار گرفتند در اتوکلاو با فشار ۱/۵ اتمسفر معادل دمای ۱۲۱ °C به مدت ۱۵ دقیقه استریل شدند. تمامی مراحل کار در زیر هود بیولوژیکی و در کنار شعله با رعایت دقیق شرایط استریل انجام شد. پلاستیک پلی‌اتیلن کم‌چگالی (LDPE) محصول شرکت آریاساسول به شکل گرانول تهیه شده، با استفاده از آسیاب

سایر پلیمرها است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که نوع پلیمرهای شناسایی‌شده در محیط آبی نیز مطابق با بیش‌ترین تقاضای این پلاستیک‌ها است (Geyer et al., 2017).

در سال‌های اخیر روش‌های مختلف و متعددی برای حذف میکروپلاستیک‌ها از محیط‌زیست پیشنهاد شده و مورد بررسی قرار گرفته است. از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به انعقاد و لخته‌سازی، هضم بیولوژیکی و شیمیایی، روش‌های تجزیه‌ای و تخریبی و همچنین فرآیندهای غشایی اشاره نمود. این روش‌ها هر کدام مزایا و معایب خاص خود را داشته و انتخاب روش حذف به عواملی مانند مورفولوژی، پارامترهای محیطی، چگالی و نوع محیط آبی وابسته است (Park and Park, 2021). با این حال اکثر روش‌های مورد استفاده برای حذف میکروپلاستیک‌ها شامل روش‌های سطح اول به معنی بازگرداندن ضایعات پلاستیکی به چرخه گرمایش پلاستیک برای بازیافت و تبدیل زباله‌های پلاستیکی به محصولات پلاستیکی جدید بوده و عملاً موجب تجزیه و حذف میکروپلاستیک از محیط نمی‌شود (Iyare et al., 2020).

در سال‌های اخیر استفاده از فناوری‌های زیستی برای حذف میکروپلاستیک به‌عنوان روشی مقرون‌به‌صرفه، پایدار، کارآمد و دوست‌دار محیط‌زیست مورد توجه قرار گرفته است (Miloloža et al., 2022). تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها مبتنی بر هیدرولیز آنزیمی بوده، لذا راندمان حذف زیستی میکروپلاستیک به گونه‌های بیولوژیکی استفاده‌شده برای تجزیه زیستی وابسته است. از جمله سایر عوامل مؤثر بر افزایش راندمان حذف زیستی توانایی تشکیل کلنی بر روی ساختار میکروپلاستیک بوده که با توجه به مطالعات ریزجلبک‌ها قابلیت بالایی برای تشکیل این کلنی‌ها دارند (Priya et al., 2022). از طرفی میکروپلاستیک‌ها به‌عنوان منبع کربن می‌تواند مورد استفاده جلبک‌ها قرار گرفته و میکروپلاستیک در فرآیند حذف زیستی به‌طور کامل توسط جلبک مصرف شود (Hadian-Ghazvini et al., 2022).

مطالعات نشان می‌دهد که جلبک‌ها توانایی تغذیه از میکروبیوم کلونیزه‌شده روی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن را داشته، کربن را از ساختار میکروپلاستیک پلی‌اتیلن جدا کرده و به اسیدهای چرب غیراشباع در ساختار سلول خود تبدیل می‌کند (Fan et al., 2024). هم‌چنین جلبک‌ها علاوه بر فتوسنتز قادر به استفاده از مواد آلی به‌عنوان منبع انرژی بوده و در نتیجه با غلبه بر افت انرژی ناشی از کاهش فتوسنتز و حتی افزایش بهره‌وری انرژی نسبت به سایر گونه‌ها، انرژی لازم برای رشد و گسترش خود را فراهم می‌سازند. هم‌چنین جلبک‌های کلونیزه‌شده روی

اسید نیتریک ۱ مولار به میزان ۱۰ درصد و در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد هیدرولیز شده و ذرات میکروپلاستیک باقی مانده با استفاده از فیلتر غشایی از نمونه‌ها جداسازی و وزن شد. درصد حذف میکروپلاستیک در هر نمونه محاسبه شد و نتایج آزمایش بهینه‌سازی شد.

تغییر در پیوندها و گروه‌های عاملی پلی اتیلن پیش و پس از حذف زیستی با استفاده از آنالیز FTIR تعیین و مورد بررسی قرار گرفت (FT-IR/NIR FRONTIER-USA). برای بررسی تغییر وزن مولکولی پلی اتیلن پس از حذف زیستی از آنالیز کروماتوگرافی نفوذ ژل (GPC) با استفاده از Agilent 1260 DAD VL+) Infinity Binary LC مجهز به آرایه دیود (DAD VL+) (1260/G1315C) به همراه دو آشکارساز فلورسانس (FLD) (1260/G1321B) استفاده شد.

### ۲-۳- طراحی آزمایش

برای بررسی شرایط بهینه حذف زیستی میکروپلاستیک پلی اتیلن با استفاده از ریز جلبک سندسموس آلیکوس، طراحی آزمایش با استفاده از متد سطح پاسخ (RSM) و طراحی مرکزی (CCD) انجام شد. برای طراحی آزمایش سه پارامتر غلظت جلبک براساس چگالی نوری (OD)، اندازه میکروپلاستیک و سرعت هم‌زدن در سه سطح تعریف شده ( $\alpha = 1$ ) و تعداد نقاط مرکزی ۳ در نظر گرفته شد. طراحی آزمایش، آنالیز واریانس و رسم نمودارها با استفاده از نرم افزار Design Expert Version 10.0.7.0 انجام شد. آزمایش‌های تعیین شده پس از طراحی آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است.

سیاره‌ای در ابعاد میکرومتری متناسب با پارامترهای آزمایش خرد شده و ذرات میکروپلاستیک در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

### ۲-۲- طراحی و اجرای آزمایش

جلبک سندسموس در ارلن‌های ۲۵۰ میلی لیتری تحت دمای ۲۵ درجه سانتی گراد در انکوباتور شیکردار کشت داده شد. میزان تلقیح اولیه جلبک به محیط کشت ۱۰٪ بوده و نور به میزان ۳۵۰۰ لوکس با استفاده از لامپ فلوروسنت سفید تأمین شد. میزان رشد روزانه جلبک در نمونه‌ها با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۸۰ نانومتر اندازه‌گیری شده و نمونه‌های میکروپلاستیک با غلظت ۳۰ میلی گرم بر لیتر در چگالی نوری مورد نظر (متناسب با طراحی آزمایش) به نمونه‌ها اضافه شد. با توجه به بررسی سایر مطالعات و در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر حذف زیستی، در مطالعه حاضر پارامترهای چگالی نوری جلبک (تراکم سلولی)، اندازه میکروپلاستیک پلی اتیلن و سرعت هم‌زدن نمونه‌ها به عنوان پارامترهای مؤثر آزمایش در نظر گرفته شد و پس از طراحی آزمایش، آزمایش‌ها انجام شد. در این پژوهش، حذف زیستی میکروپلاستیک پلی اتیلن با استفاده از ریز جلبک سندسموس در محدوده چگالی نوری ۰/۲ تا ۱، اندازه میکروپلاستیک در محدوده ۴۵ تا ۱۰۵ میکرومتر و سرعت هم‌زدن در محدوده ۱۵۰ تا ۲۰۰ دور بر دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. ذرات میکروپلاستیک با غلظت و ابعاد مشخص در ابتدای شروع فرآیند کشت به نمونه‌ها اضافه شده، جلبک در حضور میکروپلاستیک رشد کرده و فرآیند حذف زیستی انجام شد. پس از اتمام فرآیند حذف بیولوژیکی، نمونه‌ها با استفاده از

جدول ۲- طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ

| ردیف | چگالی نوری | دور میکسر (rpm) | اندازه میکروپلاستیک (um) |
|------|------------|-----------------|--------------------------|
| ۱    | ۱          | ۲۰۰             | ۴۵                       |
| ۲    | ۰/۶        | ۱۵۰             | ۷۵                       |
| ۳    | ۱          | ۱۵۰             | ۱۰۵                      |
| ۴    | ۰/۲        | ۲۰۰             | ۴۵                       |
| ۵    | ۰/۶        | ۲۰۰             | ۷۵                       |
| ۶    | ۱          | ۱۷۵             | ۷۵                       |
| ۷    | ۱          | ۲۰۰             | ۱۰۵                      |
| ۸    | ۰/۲        | ۲۰۰             | ۱۰۵                      |
| ۹    | ۰/۶        | ۱۷۵             | ۷۵                       |
| ۱۰   | ۰/۶        | ۱۷۵             | ۴۵                       |
| ۱۱   | ۱          | ۱۵۰             | ۴۵                       |
| ۱۲   | ۰/۲        | ۱۵۰             | ۴۵                       |
| ۱۳   | ۰/۶        | ۱۷۵             | ۷۵                       |
| ۱۴   | ۰/۶        | ۱۷۵             | ۷۵                       |
| ۱۵   | ۰/۲        | ۱۵۰             | ۱۰۵                      |
| ۱۶   | ۰/۲        | ۱۷۵             | ۷۵                       |
| ۱۷   | ۰/۶        | ۱۷۵             | ۱۰۵                      |

### ۳- نتایج و بحث

حذف میکروپلاستیک توسط ریزجلبک مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به طراحی آزمایش، تعداد ۱۷ تست انجام شد و نتایج حذف زیستی در جدول ۳ آورده شده است.

پس از کشت جلبک‌ها و رسیدن به چگالی نوری مورد نظر، نمونه‌های میکروپلاستیک به ارلن‌های کشت جلبک اضافه شده و

جدول ۳- راندها حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن توسط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس

| ردیف | چگالی نوری | دور میکسر (rpm) | اندازه میکروپلاستیک (um) | حذف میکروپلاستیک (%) |
|------|------------|-----------------|--------------------------|----------------------|
| ۱    | ۱          | ۲۰۰             | ۴۵                       | ۳۶/۱۱                |
| ۲    | ۰/۶        | ۱۵۰             | ۷۵                       | ۲۱/۰۴                |
| ۳    | ۱          | ۱۵۰             | ۱۰۵                      | ۱۸/۷۲                |
| ۴    | ۰/۲        | ۲۰۰             | ۴۵                       | ۲۵/۱۵                |
| ۵    | ۰/۶        | ۲۰۰             | ۷۵                       | ۲۰/۴۹                |
| ۶    | ۱          | ۱۷۵             | ۷۵                       | ۲۹/۰۲                |
| ۷    | ۱          | ۲۰۰             | ۱۰۵                      | ۱۸/۳۴                |
| ۸    | ۰/۲        | ۲۰۰             | ۱۰۵                      | ۱۱/۶۵                |
| ۹    | ۰/۶        | ۱۷۵             | ۷۵                       | ۲۵/۷۳                |
| ۱۰   | ۰/۶        | ۱۷۵             | ۴۵                       | ۳۲/۸۶                |
| ۱۱   | ۱          | ۱۵۰             | ۴۵                       | ۳۹/۸۳                |
| ۱۲   | ۰/۲        | ۱۵۰             | ۴۵                       | ۲۴/۸۷                |
| ۱۳   | ۰/۶        | ۱۷۵             | ۷۵                       | ۲۵/۵۷                |
| ۱۴   | ۰/۶        | ۱۷۵             | ۷۵                       | ۲۶/۰۵                |
| ۱۵   | ۰/۲        | ۱۵۰             | ۱۰۵                      | ۱۲/۰۸                |
| ۱۶   | ۰/۲        | ۱۷۵             | ۷۵                       | ۱۷/۹۹                |
| ۱۷   | ۰/۶        | ۱۷۵             | ۱۰۵                      | ۱۶/۹۲                |

حذف زیستی میکروپلاستیک، مدل‌سازی نتایج با استفاده از مدل Quadratic و بدون اعمال رابطه توانی انجام شد. با توجه به جدول آنالیز واریانس (جدول ۴)، مدل از نظر آماری معنادار بوده ( $P\text{-value} < 0.05$ ) و مقدار  $R^2$  برابر با ۰/۹۸ به دست آمد که بیانگر انطباق بالای مدل با داده‌های واقعی است.

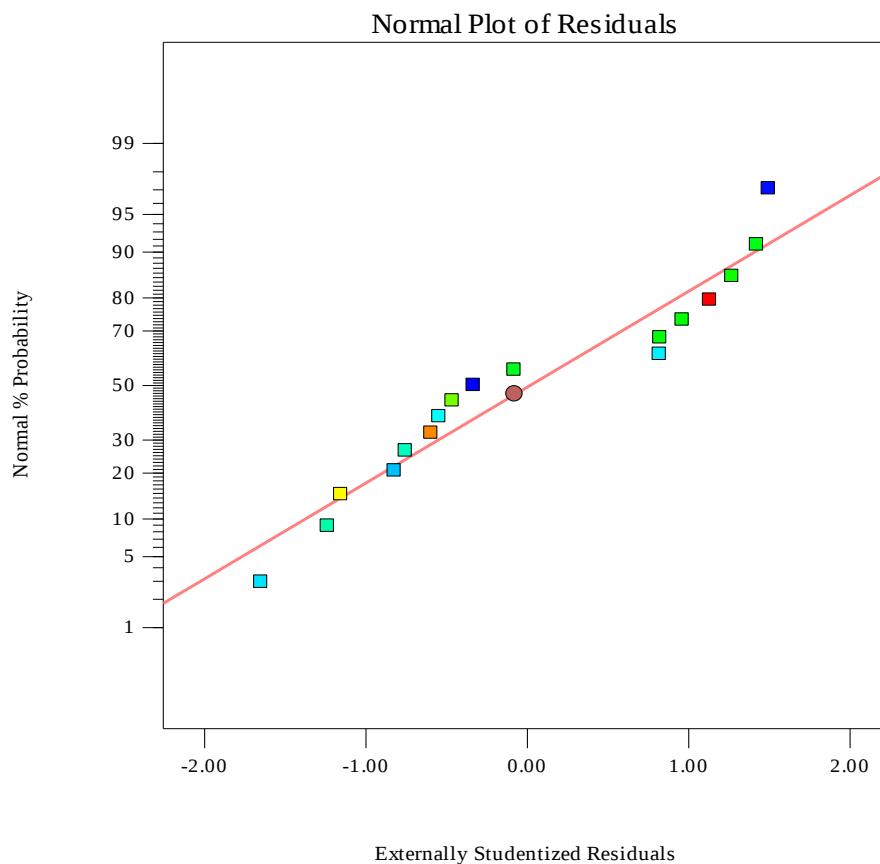
با توجه به نتایج به دست آمده، بالاترین درصد حذف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن در چگالی نوری ۱، سرعت هم‌زدن ۱۵۰ دور بر دقیقه و اندازه میکروپلاستیک ۴۵ میکرومتر به دست آمده است. با توجه به جدول ۳، در این شرایط ۳۹/۸۳ درصد از میکروپلاستیک پلی‌اتیلن توسط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس حذف شده است. برای بررسی اثر پارامترهای آزمایش بر راندها

جدول ۴- آنالیز واریانس نتایج حذف زیستی پس از مدل‌سازی آماری

| درجه اهمیت | P-value  | F-value  | میانگین مربعات | df | مجموع مربعات | منبع                |
|------------|----------|----------|----------------|----|--------------|---------------------|
| با اهمیت   | 1.31E-05 | 52.89636 | 106.5117       | 9  | 58.6051      | Model               |
|            | 1.01E-05 | 125.5507 | 252.8078       | 1  | 252.8078     | A-OD                |
|            | 0.320253 | 1.144224 | 2.304          | 1  | 2.304        | B-Shaking speed     |
|            | 3.92E-07 | 326.7212 | 657.8832       | 1  | 657.8832     | C-Microplastic size |
|            | 0.357822 | 0.968574 | 1.950313       | 1  | 1.950313     | AB                  |
|            | 0.016451 | 9.839885 | 19.81351       | 1  | 19.81351     | AC                  |
|            | 0.533224 | 0.429388 | 0.864613       | 1  | 0.864613     | BC                  |
|            | 0.990618 | 0.000148 | 0.000299       | 1  | 0.000299     | A <sup>2</sup>      |
|            | 0.015647 | 10.06664 | 20.2701        | 1  | 20.2701      | B <sup>2</sup>      |
|            | 0.15689  | 2.513567 | 5.061298       | 1  | 5.061298     | C <sup>2</sup>      |
|            |          |          | 2.013592       | 7  | 14.09514     | Residual            |
| بی اهمیت   | 0.061055 | 46.79356 | 2.795135       | 5  | 13.97568     | Lack of Fit         |
|            |          |          | 0.059733       | 2  | 0.119467     | Pure Error          |
|            |          |          |                | 16 | 972.7002     | Cor Total           |

به دست آمده رابطه (۱) برای بیان مدل به دست آمد.

بررسی نمودار نرمال پلات (شکل ۱) نیز نشان دهنده توزیع مناسب داده ها حول خط نرمال بوده و با توجه به نتایج



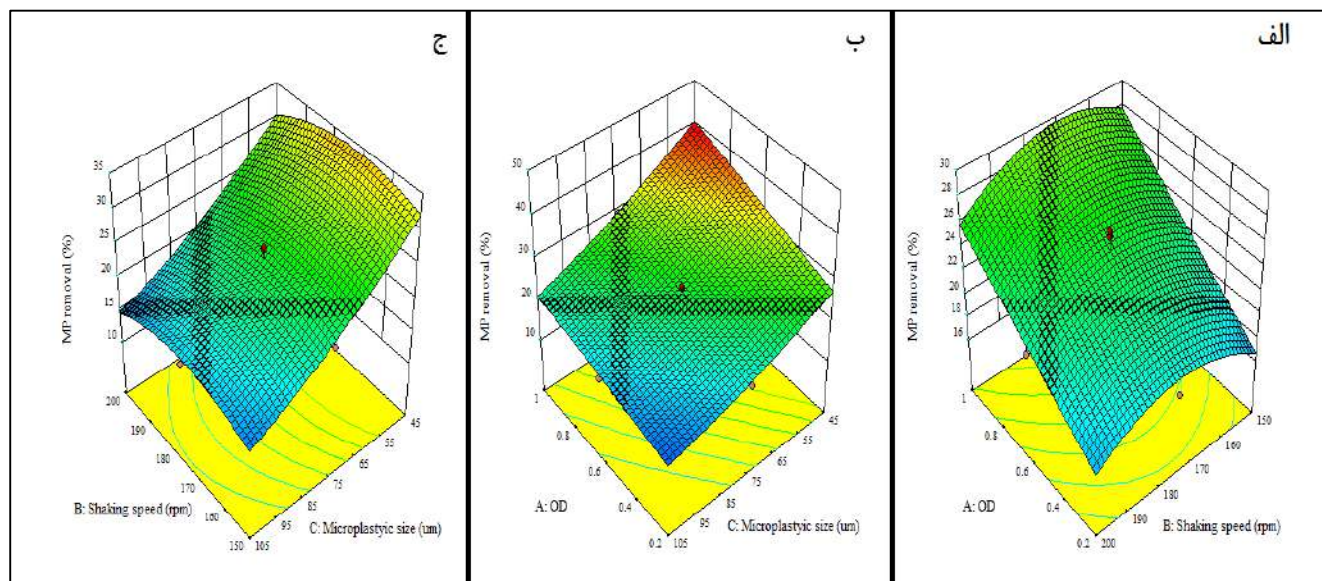
شکل ۱- نمودار نرمال نتایج حذف زیستی میکروپلاستیک پس از مدل سازی

$$MP\ removal = -90.96 + (31.12 \times A) + (1.52 \times B) - (0.49 \times C) - (0.05 \times AB) - (0.13 \times AC) + (0.00043 \times BC) - (0.066 \times A^2) - (0.0044 \times B^2) + (0.0015 \times C^2) \quad (1)$$

سلول ها در اثر واپاشی سلولی باشد و از طرف دیگر سرعت هم زدن پایین باعث عدم برهم کنش مناسب بین سلول های جلبک و ذرات میکروپلاستیک می شود (Cheng and Wang, 2022). بررسی اثر هم زمان اندازه میکروپلاستیک و چگالی نوری در شکل ۲-ب نشان می دهد که افزایش اندازه میکروپلاستیک به طور معناداری موجب کاهش راندمان حذف زیستی شده و ریز جلبک سندسموس، میکروپلاستیک پلی اتیلن با ابعاد کوچک تر را بهتر حذف می کند. با توجه به نتایج به دست آمده می توان دریافت که حذف زیستی میکروپلاستیک پلی اتیلن به چگالی نوری (غلظت سلولی) و اندازه میکروپلاستیک وابستگی بالایی داشته و اضافه کردن میکروپلاستیک در ابعاد کوچک به ارلن کشت با غلظت بالا می تواند راندمان حذف زیستی را افزایش دهد.

که A: برابر OD، B: سرعت تکان دادن و C: اندازه میکروپلاستیک هستند.

نمودارهای سه بعدی اثر برهم کنش پارامترها بر راندمان حذف زیستی در شکل ۲ آورده شده است. با توجه به شکل ۲-الف، افزایش چگالی نوری رابطه مستقیمی با درصد حذف میکروپلاستیک داشته و اضافه کردن میکروپلاستیک به جلبک در غلظت های بالا، راندمان حذف بالاتری را به همراه داشته است. از طرفی بررسی اثر سرعت هم زدن بر میزان حذف میکروپلاستیک بیانگر این است که شدت های پایین هم زدن و هم چنین شدت های بالای هم زدن موجب کاهش راندمان حذف زیستی پلی اتیلن شده است. دلیل افت راندمان در سرعت بالای هم زدن می تواند ناشی از ایجاد تنش برای سلول های جلبک و در نتیجه از بین رفتن



شکل ۲- بررسی تأثیر هم‌زمان پارامترهای: الف) چگالی نوری و سرعت هم‌زدن؛ ب) چگالی نوری و اندازه میکروپلاستیک؛ و ج) سرعت هم‌زدن و اندازه میکروپلاستیک بر میزان حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن توسط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس

تواند وابسته به اندازه باشد و میکروپلاستیک‌های با اندازه بزرگ‌تر اثرات نامطلوب قابل‌توجهی ایجاد می‌کنند. از طرفی میکروپلاستیک‌های کوچک‌تر استرس اکسیداتیو بیش‌تری ایجاد کرده و بر عملکردهای سلولی تأثیر می‌گذارند (Li et al., 2023). همچنین مطالعات بیانگر این است که هم‌زدن محیط کشت جلبک تأثیر مثبت بر راندمان حذف دارد. برخی از مطالعات به اثر شدت هم‌زدن بر میزان تشکیل توده سلولی ریزجلبک در اطراف ذرات میکروپلاستیک اشاره کرده و بیان می‌کنند هم‌زدن با سرعت زیاد می‌تواند باعث جلوگیری از تجمع سلولی و کاهش راندمان حذف زیستی شود (Cheng and Wang, 2022; Cunha et al., 2019).

بررسی راندمان حذف پلی‌اتیلن توسط ریزجلبک در سایر مطالعات نشان می‌دهد که ریزجلبک سندسموس آبلیکوس نسبت به سایر گونه‌های میکروجلبک سبز راندمان حذف میکروپلاستیک بالاتری دارد (Su et al., 2023). در پژوهشی بر روی حذف میکروپلاستیک‌های پلی‌استایرن، پلی‌متیل متاکریلات و پلی‌لاکتید مشخص شد که ریزجلبک سندسموس آبلیکوس توانایی حذف حدود ۸۵٪ از این میکروپلاستیک‌ها از محیط آبی را داشته و توانایی تجزیه بالاتری را در تماس با پلی‌متیل متاکریلات نسبت به سایر میکروپلاستیک‌ها نشان می‌دهد (Cheng and Wang, 2022). بررسی‌ها بیانگر این است که مطالعات چندانی بر روی جذب میکروپلاستیک پلی‌اتیلن توسط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس انجام نشده است و عمده مطالعات با تمرکز بر حذف میکروپلاستیک پلی‌استایرن توسط این

بررسی مطالعات مشابه نشان می‌دهد که سلول‌های ریزجلبک در مواجهه با ذرات میکروپلاستیک در اطراف آن تجمع کرده و توده تشکیل می‌دهد (Nava and Leoni, 2021). با توجه به چگالی پایین پلی‌اتیلن، سلول‌های جلبک، میکروذرات پلی‌اتیلن را تجزیه کرده و به‌عنوان منبع کربنی مصرف می‌کنند؛ لذا به‌نظر می‌رسد شیمی سطح و حالات انرژی روی سطح ریزجلبک‌ها در شروع فرآیند حذف زیستی حیاتی هستند (Sarmah and Rout, 2020). با این وجود برخی مطالعات بیان می‌کنند که بالا بودن میزان تجمع سلول‌های جلبک اطراف میکروپلاستیک چندان تأثیرگذار نبوده و غلظت سلولی تأثیر بیش‌تری بر راندمان حذف زیستی دارد (Cunha et al., 2020). این نتایج با مطالعه حاضر مطابقت بیش‌تری را نشان می‌دهد.

بررسی اثر اندازه میکروپلاستیک بر راندمان حذف زیستی بیانگر این است که اندازه ذرات و مدت‌زمان قرار گرفتن میکروپلاستیک در معرض سلول‌های جلبک بر تجمع و حذف زیستی مؤثر است. برخی مطالعات به اثر سایه در فرآیند حذف میکروپلاستیک‌ها اشاره می‌کنند. بر این اساس، ابعاد بزرگ‌تر میکروپلاستیک با ایجاد سایه، باعث کاهش نوردهی به جلبک‌ها شده و راندمان رشد و فتوسنتز جلبک کاهش پیدا می‌کند. این کاهش راندمان رشد بر میزان حذف زیستی تأثیر منفی دارد (Zhang et al., 2017; Wang et al., 2023). همچنین افزایش اندازه میکروپلاستیک باعث ایجاد زنجیره‌های پلیمری قوی‌تری شده که تجزیه آن را برای ریزجلبک‌ها سخت‌تر می‌کند (Cheng and Wang, 2022). علاوه بر این، سمیت میکروپلاستیک‌ها می‌

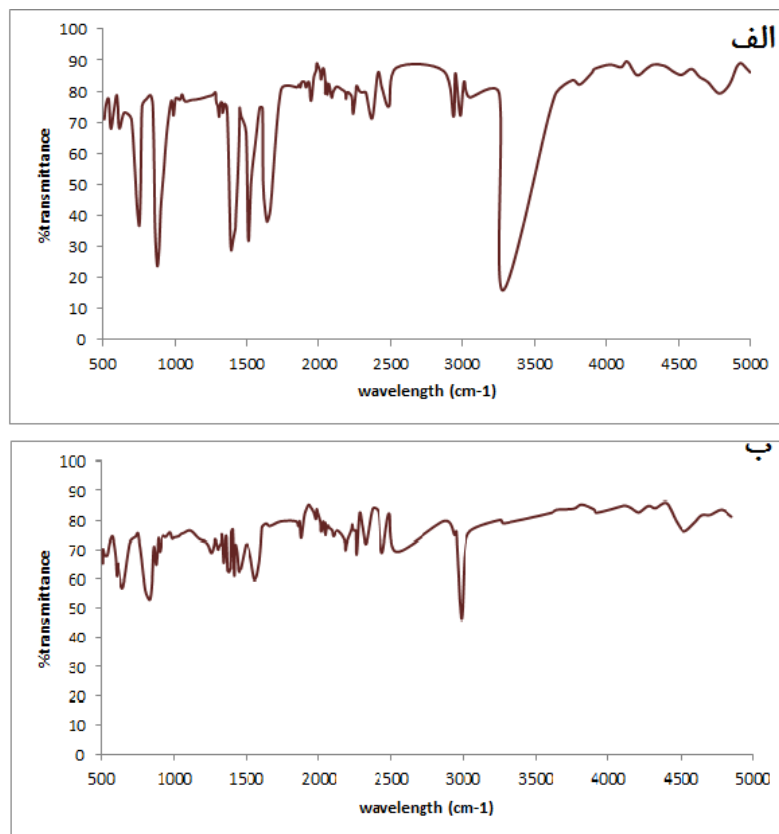
جلبک انجام شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های حذف زیستی مطالعه حاضر، بهینه‌سازی نتایج با استفاده از نرم‌افزار Design Expert در محدوده پارامترهای این پژوهش انجام شد. برای بهینه‌سازی نتایج حذف زیستی، تأثیر کلیه پارامترها یکسان در نظر گرفته شده و بهینه‌سازی با هدف حداکثر میزان حذف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی در جدول ۵ آورده شده است. براساس جدول ۵، درصد بهینه حذف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن در محدوده پارامترهای آزمایش ۴۰/۴۱٪ پیش‌بینی شد که در شرایط چگالی نوری ۰/۹۹۲، سرعت هم‌زدن ۱۷۰ دور بر دقیقه و اندازه میکروپلاستیک ۴۵/۳ میکرومتر به دست آمده است.

جدول ۵- بهینه‌سازی حذف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن در محدوده پارامترهای آزمایش

| پارامتر مؤثر | چگالی نوری | سرعت هم‌زدن (دور بر دقیقه) | اندازه (میکرومتر) | درصد حذف |
|--------------|------------|----------------------------|-------------------|----------|
| مقدار بهینه  | ۰/۹۹۲      | ۱۷۰                        | ۴۵/۳              | ۴۰/۴۱    |

آنالیز FTIR در این پژوهش، با هدف ارزیابی تغییرات در گروه‌های عاملی پلی‌اتیلن قبل و بعد از حذف زیستی (نمونه‌های شاهد و بهینه) با توجه به شکل ۳-الف انجام شد. پلی‌اتیلن در نمونه کنترل توسط گروه‌های عاملی آن شامل کشش  $\text{CH}_2$  در طول موج حدود ۳۲۵۰، ارتعاش  $\text{C}=\text{C}$  در طول موج ۱۶۰۰-۱۴۰۰ و پیوندهای  $\text{CH}$  در طول موج‌های ۸۷۶ و ۷۵۲ شناسایی شد. شکل ۳-ب نشان می‌دهد که پس از حذف زیستی پلی‌اتیلن با استفاده از ریزجلبک سندسموس، شدت پیوندهای  $\text{CH}_2$  در طول موج حدود ۳۲۵۰ کاهش پیدا کرده است. کاهش شدت پیوندهای  $\text{CH}_2$  در طول موج ۳۲۵۰ نانومتر پس از حذف زیستی نشان‌دهنده تغییراتی در ساختار پلی‌اتیلن است که احتمالاً به دلیل تجزیه یا تغییر در ساختار شیمیایی آن به وجود آمده است. این تغییرات می‌تواند ناشی از فعالیت‌های میکروجلبک باشد که به تجزیه پلیمر کمک می‌کنند. علاوه بر این، در طول موج حدود ۱۶۵۰، کاهش در شدت گروه کربونیل مشاهده شد که می‌تواند مربوط به آزاد شدن کربن از ساختار میکروپلاستیک باشد. گروه عاملی  $\text{C}=\text{C}$  که در نمونه شاهد در طول موج ۱۶۰۰-۱۴۰۰ مشاهده شده بود نیز پس از حذف زیستی توسط ریزجلبک سندسموس دچار کاهش شدت شده و پیک آن حذف شده است (Sugimoto et al., 2013; Bhuyar et al., 2021).



شکل ۳- آنالیز FTIR پلی‌اتیلن: الف) قبل؛ و ب) بعد از حذف زیستی توسط ریزجلبک سندسموس آلیکوس

- Bhuyar, P., Sundararaju, S., Feng, H.X., Rahim, M.H.A., Muniyasamy, S., Maniam, G.P., and Govindan, N., (2021), "Evaluation of microalgae's plastic biodeterioration property by a consortium of chlorella sp. and cyanobacteria sp", *Environmental Research, Engineering and Management*, 77(3), 86-98, <https://doi.org/10.5755/j01.arem.77.3.25317>.
- Boucher, J., and Friot, D., (2017), *Primary microplastics in the oceans: A global evaluation of sources*, Vol. 10, pp. 1-43, Gland, Switzerland: Iucn. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.01.en>.
- Cheng, Y.R., and Wang, H.Y., (2022), "Highly effective removal of microplastics by microalgae scenedesmus abundans", *Chemical Engineering Journal*, 435, 135079, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135079>.
- Chia, R.W., Lee, J.Y., Kim, H., and Jang, J., (2021), "Microplastic pollution in soil and groundwater: A review", *Environmental Chemistry Letters*, 19(6), 4211-4224, <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01297-6>.
- Cunha, C., Faria, M., Nogueira, N., Ferreira, A., and Cordeiro, N., (2019), "Marine vs freshwater microalgae exopolymers as biosolutions to microplastics pollution", *Environmental Pollution*, 249, 372-380, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.046>.
- Cunha, C., Silva, L., Paulo, J., Faria, M., Nogueira, N., and Cordeiro, N., (2020), "Microalgal-based biopolymer for nano-and microplastic removal: A possible biosolution for wastewater treatment", *Environmental Pollution*, 263, 114385, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114385>.
- Cutroneo, L., Reboa, A., Besio, G., Borgogno, F., Canesi, L., Canuto, S., Dara, M., Enrile, F., Forioso, I., Greco, G., and Lenoble, V., (2020), "Microplastics in seawater: Sampling strategies, laboratory methodologies, and identification techniques applied to port environment", *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 8938-8952, <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07783-8>.
- Fan, X., Kong, L., Wang, J., Tan, Y., Xu, X., Li, M., and Zhu, L., (2024), "Surface-programmed microbiome assembly in phycosphere to microplastics contamination", *Water Research*, 262, 122064, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122064>.
- Geyer, R., Jambeck, J.R., and Law, K.L., (2017), "Production, use, and fate of all plastics ever made", *Science Advances*, 3(7), 1700782, <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
- Hadian-Ghazvini, S., Hooriabad Saboor, F., and Safaee Ardekani, L., (2022), "Bioremediation techniques for microplastics removal", In: *Microplastics Pollution in Aquatic Media: Occurrence, Detection, and Removal*, 327-377, [https://doi.org/10.1007/978-981-16-8440-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-981-16-8440-1_15).
- Iyare, P.U., Ouki, S.K., and Bond, T., (2020), "Microplastics removal in wastewater treatment plants: A critical review", *Environmental Science: Water Research and Technology*, 6(10), 2664-2675, <https://doi.org/10.1039/d0ew00397b>.
- Li, J., Zheng, X., Liu, X., Zhang, L., Zhang, S., Li, Y.,

آنالیز ژل کروماتوگرافی نمونه شاهد، نشان‌داد که وزن مولکولی پلی‌اتیلن  $26/98 \pm 1/13$  گرم بر مول بود. پس از انجام پروسه حذف زیستی، وزن مولکولی میکروپلاستیک در نمونه بهینه، حدود ۱۴٪ کاهش یافته و به  $23/17$  گرم بر مول رسید. سایر مطالعات نیز کاهش وزن مولکولی را به‌عنوان عاملی برای سنجش میزان تجزیه پلی‌اتیلن گزارش کرده‌اند (Wang et al., 2023).

#### ۴- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف امکان‌سنجی حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن با استفاده از ریزجلبک سندسموس آبلیکوس و بررسی اثر غلظت جلبک، سرعت هم‌زدن و اندازه ذرات میکروپلاستیک بر راندمان حذف زیستی انجام‌شد. نتایج نشان‌داد که حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن وابستگی زیادی به غلظت جلبک و اندازه میکروپلاستیک داشته و افزودن میکروپلاستیک در اندازه‌های کوچک به محیط کشت ریزجلبک سندسموس در غلظت بالا، باعث حذف زیستی بالاتری می‌شود. نتایج نشان‌داد که در چگالی نوری جلبک برابر با ۱، اندازه میکروپلاستیک ۴۵ میکرومتر و سرعت هم‌زدن ۱۵۰ دور بر دقیقه، درصد حذف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن به  $39/83$  رسید. هم‌چنین با بررسی نتایج حاصل از آنالیز FTIR مشخص شد که حذف گروه عاملی کربونیل در محدوده طول موج  $1600-1400$  می‌تواند به‌عنوان المان تأیید حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن موردتوجه قرارگیرد. با توجه به نتایج به‌نظر می‌رسد که نیاز است مطالعات بیش‌تری بر روی اثر پارامترهای سلولی جلبک بر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن صورت‌گیرد و داده‌های کامل‌تری در رابطه با اثر سمیت سلولی، تأثیر مواد پلیمری خارج سلولی ریزجلبک (EPS) و اثر غلظت میکروپلاستیک بر راندمان حذف گردآوری شود. هم‌چنین برای بررسی بیش‌تر تأثیر اندازه میکروپلاستیک بر راندمان حذف، اثر سایه باید در مطالعات آتی مورد توجه قرارگیرد. از طرفی با توجه به عدم وجود مطالعات کافی در رابطه با مکانیزم‌های حذف زیستی میکروپلاستیک‌ها توسط ریزجلبک، بررسی مکانیسم‌های تجزیه در مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.

#### ۵- مراجع

- An, L., Liu, Q., Deng, Y., Wu, W., Gao, Y., and Ling, W., (2020), "Sources of microplastic in the environment", In: *Microplastics in Terrestrial Environments: Emerging Contaminants and Major Challenges*, 143-159, Cham: Springer International Publishing.

- Su, Y., Gao, L., Peng, L., Diao, X., Lin, S., Bao, R., and Mehmood, T., (2023), "Heterogeneous aggregation between microplastics and microalgae: May provide new insights for microplastics removal", *Aquatic Toxicology*, 261, 106638, <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2023.106638>.
- Sugimoto, M., Shimada, A., Kudoh, H., Tamura, K. and Seguchi, T., (2013), "Product analysis for polyethylene degradation by radiation and thermal ageing", *Radiation Physics and Chemistry*, 82, 69-73, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.08.009>.
- Wang, C., Liu, Y., Chen, W.Q., Zhu, B., Qu, S., and Xu, M., (2021), "Critical review of global plastics stock and flow data", *Journal of Industrial Ecology*, 25(5), 1300-1317, <https://doi.org/10.1111/jiec.13125>.
- Wang, X., Zhao, Y., Zhao, L., Wan, Q., Ma, L., Liang, J., Li, H., Dong, J., and Zhang, M., (2023), "Effects of microplastics on the growth, photosynthetic efficiency and nutrient composition in freshwater algae *Chlorella vulgaris* Beij", *Aquatic Toxicology*, 261, 106615, <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2023.106615>.
- Wang, Z., Chen, H., Zhang, Y., and Wang, Q., (2023), "Study on the mechanism of molecular weight reduction of polyethylene based on Fe-montmorillonite and its potential application", *Polymers*, 15(6), 1429, <https://doi.org/10.3390/polym15061429>.
- Wu, X., Zhao, X., Chen, R., Liu, P., Liang, W., Wang, J., Teng, M., Wang, X., and Gao, S., (2022), "Wastewater treatment plants act as essential sources of microplastic formation in aquatic environments: A critical review", *Water Research*, 221, 118825, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118825>.
- Yu, Y., Zhou, D., Li, Z., and Zhu, C., (2018), "Advancement and challenges of microplastic pollution in the aquatic environment: A review", *Water, Air and Soil Pollution*, 229, 1-18, <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3788-z>.
- Zhang, C., Chen, X., Wang, J., and Tan, L., (2017), "Toxic effects of microplastic on marine microalgae *Skeletonema costatum*: Interactions between microplastic and algae", *Environmental Pollution*, 220, 1282-1288, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.005>.
- Zhang, W., Li, Q., Zhao, Y., Chen, X., and Wang, X., (2023), "Effect and mechanism of microplastics exposure against microalgae: Photosynthesis and oxidative stress", *Science of the Total Environment*, 905, 167017, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167017>.
- López-Pacheco, I.Y., Castillo-Vacas, E.I., Castañeda-Hernández, L., Gradiz-Menjivar, A., Rodas-Zuluaga, L.I., Castillo-Zacarías, C., Sosa-Hernández, J.E., Barceló, D., Iqbal, H.M., and Parra-Saldívar, R., (2021), "CO<sub>2</sub> biocapture by *Scenedesmus* sp. grown in industrial wastewater", *Science of the Total Environment*, 790, 148222, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148222>.
- Magalhães, S., Alves, L., Medronho, B., Romano, A., and Rasteiro, M.D.G., (2020), "Microplastics in ecosystems: From current trends to bio-based removal strategies", *Molecules*, 25(17), 3954, <https://doi.org/10.3390/molecules25173954>.
- Miloloža, M., Cvetnić, M., Kučić Grgić, D., Ocelić Bulatović, V., Ukić, Š., Rogošić, M., Dionysiou, D.D., Kučić, H., and Bolanča, T., (2022), "Biotreatment strategies for the removal of microplastics from freshwater systems, A review", *Environmental Chemistry Letters*, 20(2), 1377-1402, <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01370-0>.
- Nava, V., and Leoni, B., (2021), "A critical review of interactions between microplastics, microalgae and aquatic ecosystem function", *Water Research*, 188, 116476, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116476>.
- Park, H., and Park, B., (2021), "Review of microplastic distribution, toxicity, analysis methods, and removal technologies", *Water*, 13(19), 2736, <https://doi.org/10.3390/w13192736>.
- Prata, J.C., da Costa, J.P., Lopes, I., Andrady, A.L., Duarte, A.C., and Rocha-Santos, T., (2021), "A one health perspective of the impacts of microplastics on animal, human and environmental health", *Science of the Total Environment*, 777, 146094, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146094>.
- Priya, A.K., Jalil, A.A., Dutta, K., Rajendran, S., Vasseghian, Y., Karimi-Maleh, H., and Soto-Moscato, M., (2022), "Algal degradation of microplastic from the environment: Mechanism, challenges, and future prospects", *Algal Research*, 67, 102848, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102848>.
- Sarmah, P., and Rout, J., (2020), "Role of algae and cyanobacteria in bioremediation: Prospects in polyethylene biodegradation", In: *Advances in Cyanobacterial Biology*, 333-349, Academic Press, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819311-2.00022-X>.
- Silambarasan, S., Logeswari, P., Sivaramakrishnan, R., Incharoensakdi, A., Kamaraj, B., and Cornejo, P., (2023), "Scenedesmus sp. strain SD07 cultivation in municipal wastewater for pollutant removal and production of lipid and exopolysaccharides", *Environmental Research*, 218, 115051, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115051>.



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

Research Paper

مقاله پژوهشی

## The Application of Generative Artificial Intelligence in Evaluating and Ranking the Key Factors Influencing the Performance of Rainwater Harvesting Systems

Mohammad Javad Emami-Skardi<sup>1\*</sup>, Reza Hedayati Marzooni<sup>2</sup> and Yasaman Samaei<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

2- M.Sc. Student, Biotic Architecture Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

3- M.Sc. in Water Resources Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

\*Corresponding Author, Email: [mje.skardi@umz.ac.ir](mailto:mje.skardi@umz.ac.ir)

Received: 20/01/2025

Revised: 30/03/2025

Accepted: 08/06/2025

© IWWA

### Abstract

Rainwater harvesting systems have been recognized as one of the fundamental strategies in water resource management. Considering climate change and the growing demand for water, many regions are facing water scarcity. These systems can be utilized as a sustainable and cost-effective approach to address these issues. This study aims to identify and rank suitable areas for rainwater harvesting. Using the Generative Artificial Intelligence, Analytical Hierarchy Process (AHP) and geographic data analysis in GIS software, potential areas in Mazandaran province have been identified for this purpose. ChatGPT-4 artificial intelligence was employed to simulate expert opinions in pairwise comparisons. The results of this research, in addition to aiding the development of rainwater harvesting systems, can also evaluate the use of AI in the water resources management and engineering. Among the obtained results, slope had the highest weight with a final value of 0.2412, while geomorphology had the lowest weight with a final value of 0.0372. The findings indicate that the use of AI can facilitate decision-making under uncertainty and challenges in water resource engineering and management.

**Keywords:** Rainwater Harvesting, Artificial Intelligence, Multi-Criteria Decision Making, Prioritization.

## کاربرد هوش مصنوعی مولد در ارزیابی و رتبه‌بندی عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد سامانه‌های جمع‌آوری آب باران

محمدجواد امامی اسکاردی<sup>۱\*</sup>، رضا هدایتی مرزونی<sup>۲</sup> و یاسمن سمائی<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد فناوری معماری بیوتیک، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

۳- کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه امام خمینی (ره).

\*نویسنده مسئول، ایمیل: [mje.skardi@umz.ac.ir](mailto:mje.skardi@umz.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸

© انجمن آب و فاضلاب ایران

### چکیده

سامانه‌های جمع‌آوری آب باران به‌عنوان یکی از راهبردهای اساسی در مدیریت منابع آب، موردتوجه قرار گرفته‌اند. با درنظرگرفتن تغییرات اقلیمی و رشد تقاضای آب، بسیاری از مناطق جهان با بحران کمبود آب روبه‌رو هستند. این سامانه‌ها می‌توانند به‌عنوان رویکردی پایدار و مقرون‌به‌صرفه برای مقابله با این مشکلات به‌کار گرفته شوند. این پژوهش با هدف شناسایی و رتبه‌بندی مناطق مناسب برای استحصال آب باران انجام شده است. با استفاده از هوش مصنوعی مولد، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و تحلیل داده‌های جغرافیایی در نرم‌افزار GIS، مناطق مستعد استان مازندران برای این هدف مشخص شده‌اند. از هوش مصنوعی ChatGPT-4 برای شبیه‌سازی نظرات کارشناسان در مقایسه‌های زوجی استفاده شده است. نتایج این تحقیق علاوه بر کمک به توسعه سامانه‌های جمع‌آوری آب باران، می‌تواند رویکرد استفاده از هوش مصنوعی را در مهندسی و مدیریت منابع آب نیز مورد سنجش قرار دهد. در نتایج به‌دست‌آمده شیب با وزن نهایی ۰/۲۴۱۲ و ژئومورفولوژی با وزن نهایی ۰/۰۳۷۲ به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین وزن را داشتند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند تصمیم‌گیری‌های همراه با عدم قطعیت و چالش در مهندسی و مدیریت منابع آب را تسهیل نماید.

**کلمات کلیدی:** جمع‌آوری آب باران، هوش مصنوعی مولد، تصمیم‌گیری چندمعیاره، اولویت‌بندی.

## ۱- مقدمه

قرار گرفته‌اند. در مناطقی که با دوره‌های خشکسالی مکرر مواجه هستند، این سامانه‌ها می‌توانند به‌عنوان یک منبع آب پایدار و قابل‌اتکا عمل نمایند (Bojer et al., 2024).

Zheng et al. (2023) از تکنیک‌های عوامل چندگانه مؤثر (MIF) و هم‌پوشانی فازی (Fuzzy Overlay) برای شناسایی مکان‌های مناسب جمع‌آوری آب باران در استان خیبر پختون‌خواه پاکستان استفاده کردند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که سامانه‌های جمع‌آوری آب باران یا Rainwater Harvesting (RWH) می‌توانند به کمبود آب در مناطق کوهستانی کمک کرده و تولید محصولات کشاورزی را بهبود بخشند. این تحقیق اهمیت تحلیل جغرافیایی در بهینه‌سازی اجرای سامانه‌های RWH برای مقاصد کشاورزی را نشان می‌دهد. برای مواجهه با عدم قطعیت‌های عمیق مرتبط با سامانه‌های RWH، مطالعه‌ای توسط Alves and Pacheco (2024) تأثیر تقاضای آب، تعرفه و نرخ تنزیل را بر قابلیت اجرایی سامانه‌های RWH در برزیل ارزیابی کرد. پژوهش عملکرد سامانه‌های RWH را برای پیکربندی‌های مختلف شبیه‌سازی کرده و نتایج نشان داد که تعرفه آب و نرخ تنزیل، تأثیر زیادی بر معیارهای عملکرد دارند. این مطالعه اهمیت در نظر گرفتن عوامل اقتصادی در طراحی و اجرای سامانه‌های RWH را برجسته می‌کند.

Rao et al. (2024) با بهره‌گیری از شبکه‌های حافظه بلند-کوتاه مدت (LSTM) Long Short-Term Memory و الگوریتم انتخاب کلونی یا Clonal Selection Algorithm (CSA)، بهره‌وری سامانه‌های برداشت آب باران را بررسی کردند. این پژوهش با بهبود کارایی این سیستم‌ها، نقش مهمی در مدیریت پایدار منابع آبی ایفا می‌کند.

توسعه سامانه‌های جمع‌آوری آب باران برای مدیریت پایدار منابع آب ضروری است. هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری کلیدی به مهندسان در تحلیل داده‌ها در زمینه‌های مختلف مانند مدیریت پایدار منابع آب کمک می‌کند تا تصمیمات بهتری بگیرند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین، دقت و سرعت تحلیل‌ها را افزایش می‌دهد و منجر به کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی می‌شود. در مهندسی عمران، هوش مصنوعی در طراحی سازه‌های هوشمند و پیش‌بینی شکست‌ها مؤثر است. در مهندسی برق و مکانیک، سامانه‌های هوشمند بهره‌وری را بهبود می‌بخشند و ضایعات را کاهش می‌دهند. هم‌چنین هوش مصنوعی در ربات‌ها و سامانه‌های خودکار برای انجام وظایف خطرناک کاربرد دارند. به‌طور کلی، این فناوری به نوآوری و کاهش ریسک‌ها در پروژه‌های مهندسی کمک می‌کند.

محدودیت منابع آبی، افزایش جمعیت و توسعه صنعتی که منجر به افزایش تقاضا برای آب می‌شود، همراه با کمبود فضاهای مناسب برای ایجاد زیرساخت‌های بزرگ‌مقیاس مانند سد‌ها و پیامدهای محیط‌زیستی آن‌ها، هم‌چنین چالش‌های توسعه شبکه‌های آبرسانی و میزان بالای هدررفت آب در این سیستم‌ها، ضرورت بهره‌گیری از رویکردهای پایدار و سازگار با محیط‌زیست را بیش از پیش نمایان می‌سازد (امامی اسکاردی و همکاران، ۱۴۰۱). در این راستا، جمع‌آوری آب باران به‌عنوان یک راه‌کار مؤثر می‌تواند به‌طور جدی مورد توجه قرار گیرد.

سامانه‌های جمع‌آوری آب باران، به‌عنوان یکی از راهبردهای مهم در مدیریت منابع آب، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند (شریفیان و همکاران، ۱۴۰۱). با توجه به این که بسیاری از مناطق جهان با مشکلات کمبود آب مواجه هستند، سامانه‌های جمع‌آوری آب باران می‌توانند به‌عنوان رویکردی پایدار و اقتصادی در مقابله با این چالش‌ها به‌کار گرفته شوند. این سامانه‌ها به ذخیره و استفاده از آب باران در محیط‌های شهری و روستایی کمک می‌کنند و به کاهش فشار بر منابع آب زیرزمینی و سطحی می‌انجامند (Raimondi et al., 2023).

یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از سامانه‌های جمع‌آوری آب باران، بهبود مدیریت منابع آب است. در بسیاری از مناطق شهری، بارش‌های سنگین باعث سیلاب‌های ناگهانی و ایجاد خسارت‌های زیادی به زیرساخت‌ها می‌شوند. با استفاده از سامانه‌های جمع‌آوری آب باران، می‌توان از این آب‌ها به‌عنوان منبع جایگزین استفاده کرد و هم‌زمان از خطرات سیلاب جلوگیری نمود (Soh et al., 2023). این سامانه‌ها هم‌چنین به کاهش تقاضای آب شرب کمک می‌کنند؛ زیرا آب باران می‌تواند برای مصارف غیرشرب مانند آبیاری فضای سبز و شست‌وشو مورد استفاده قرار گیرد (Nandi and Gonela, 2022).

علاوه بر این، سامانه‌های جمع‌آوری آب باران می‌توانند به حفاظت از محیط‌زیست کمک کنند. این سامانه‌ها با کاهش مصرف آب از منابع طبیعی، به حفظ تنوع زیستی و کاهش تأثیرات محیط‌زیستی ناشی از برداشت بی‌رویه آب کمک می‌کنند (Ward et al., 2012). هم‌چنین استفاده از این سامانه‌ها موجب کاهش انرژی مورد نیاز برای تصفیه و توزیع آب می‌شود، که به‌نوبه خود به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود (Li et al., 2010).

در نهایت، سامانه‌های جمع‌آوری آب باران به‌عنوان یک راه‌حل مؤثر برای مدیریت بحران‌های آبی در مناطق کم‌آب مورد توجه

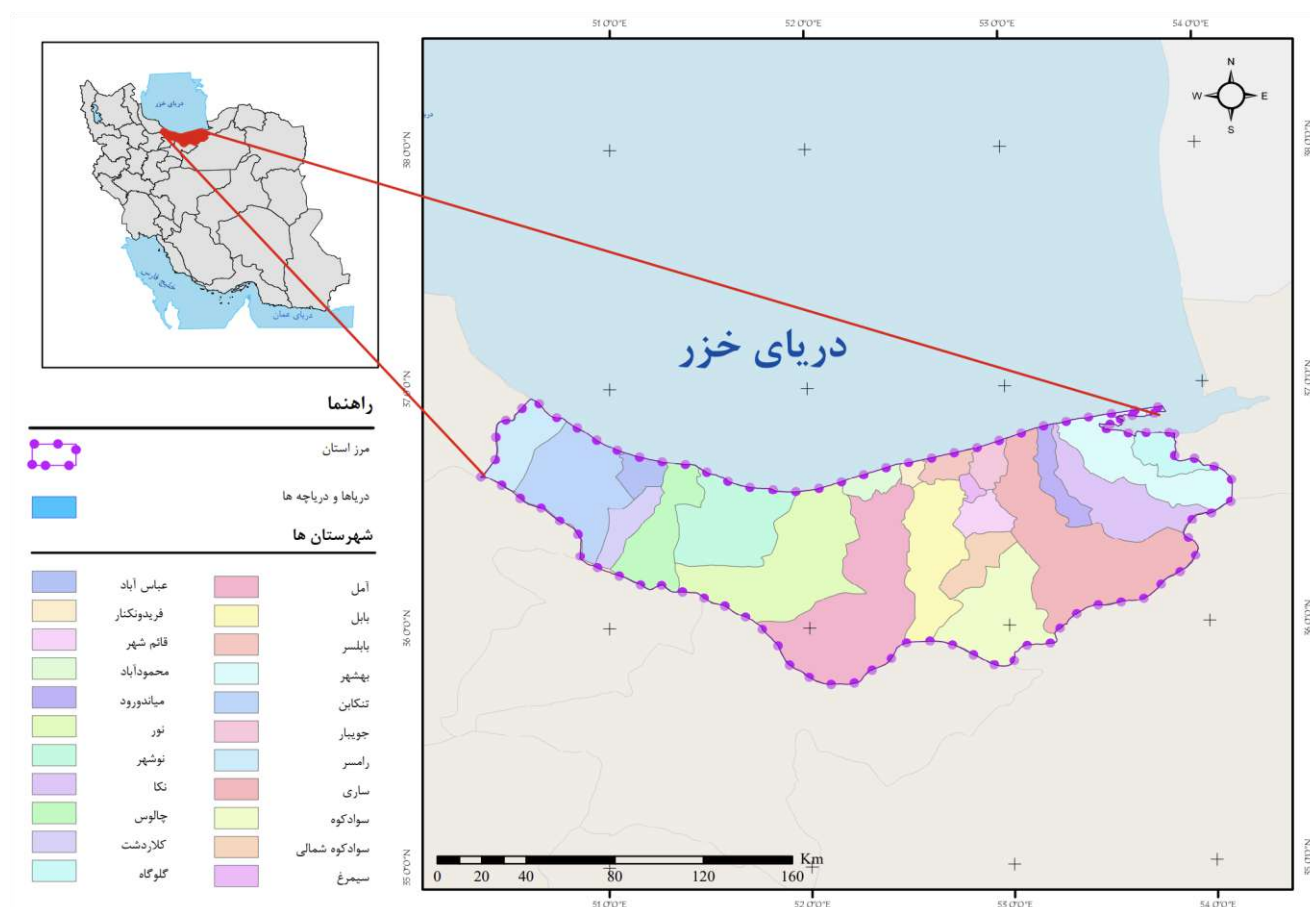
## ۲- روش‌شناسی

این پژوهش با هدف شناسایی و رتبه‌بندی مناطق مناسب برای استحصال آب باران در استان مازندران انجام شده است. روش‌شناسی تحقیق شامل تحلیل مقالات علمی، شبیه‌سازی نظرات کارشناسان با استفاده از هوش مصنوعی مولد، به‌ویژه ChatGPT-4 و به‌کارگیری فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای اولویت‌بندی معیارها و تحلیل‌های مکانی است. هدف نهایی این مطالعه، شناسایی و رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر بر سامانه‌های استحصال آب باران با بهره‌گیری از هوش مصنوعی و تهیه نقشه‌ای از مناطق مناسب در استان مازندران است. در مرحله نخست، ۱۰۰۰ مقاله مرتبط با سامانه‌های جمع‌آوری آب باران شناسایی شد؛ سپس ۲۰۰ مقاله برتر با بیش‌ترین ارتباط به موضوع، توسط پژوهشگران انتخاب شد. پس از بررسی این مقالات، ۵۰ معیار کلیدی در توسعه سامانه‌های جمع‌آوری آب باران شناسایی شد، که یکی از مهم‌ترین ملاک‌های انتخاب این معیارها، میزان تکرار آن‌ها در مطالعات مختلف بود. در گام بعد، ۱۰ کارشناس مجازی مبتنی بر هوش مصنوعی مولد (ChatGPT-4) تعریف شدند و مقایسه گزینه‌ها به‌صورت دوه‌دو براساس رویکرد AHP با استفاده

از این مدل انجام شد. درنهایت، ماتریس نهایی با میانگین‌گیری هندسی از جدول‌های حاصل تهیه شد. پس از وزن‌دهی معیارها، ارزیابی و محاسبه نرخ ناسازگاری نیز انجام شد. نتایج پژوهش، به‌ویژه بخش‌هایی که قابلیت نمایش بصری داشتند، به‌صورت نقشه‌های تحلیلی ارائه شد تا مناطق مناسب برای استحصال آب باران به‌طور دقیق مشخص شوند.

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

مازندران، در شمال ایران، منطقه‌ای با ظرفیت بالای استحصال آب باران است. این استان با جمعیت حدوداً ۳/۳ میلیون نفر و وسعت ۲۳,۰۰۰ کیلومترمربع، از شمال به دریای خزر و از جنوب به رشته‌کوه‌های البرز محدود می‌شود. اقلیم مازندران با بارش سالانه ۸۰۰ تا ۱,۲۰۰ میلی‌متر، به‌خصوص در پاییز و زمستان، منابع آب سطحی و زیرزمینی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. تنوع زمین‌شناسی و خاک‌های غنی این استان، جذب و نگهداری آب باران را تسهیل می‌کند. هم‌چنین پوشش گیاهی و اکوسامانه‌های طبیعی باعث افزایش رطوبت خاک و بهبود شرایط استحصال آب باران برای مدیریت منابع آب و استفاده‌های کشاورزی، باغداری و دامپروری می‌شوند.



شکل ۱- نقشه محدوده استان مازندران و شهرهای آن

## ۲-۲- روش فرآینده تحلیل سلسله‌مراتبی (Analytical Hierarchy Process)

روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) یکی از تکنیک‌های معتبر تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در شرایط پیچیده و با وجود عدم قطعیت کاربرد دارد. این روش توسط Saaty (1980) معرفی شد و به تحلیل و اولویت‌بندی گزینه‌ها با استفاده از مقایسه‌های زوجی کمک می‌کند. در AHP، تصمیم‌گیرنده ابتدا معیارهای مهم را شناسایی کرده و سپس با مقایسه زوجی آن‌ها، وزن‌های نسبی هر معیار را تعیین می‌کند (Darko et al, 2018). این روش با ساخت یک ماتریس، مقایسه‌های زوجی و استفاده از تکنیک‌های ریاضی مانند محاسبه مقدار ویژه، امکان محاسبه وزن‌ها و اولویت‌ها را فراهم می‌آورد. AHP هم‌چنین نرخ ناسازگاری (CR) را محاسبه می‌کند تا اطمینان حاصل شود که مقایسه‌های انجام‌شده منطقی و قابل قبول هستند (Al-Harbi, 2001). در این پژوهش، AHP به منظور شناسایی مکان‌های مناسب برای استحصال آب باران در استان مازندران به کار گرفته شده است؛ به طوری که وزن هر معیار به طور علمی و منطقی تعیین و در نهایت، به اولویت‌بندی گزینه‌های موجود منجر شده است.

## ۲-۳- هوش مصنوعی مولد

هوش مصنوعی یا Artificial Intelligent (AI) به عنوان یک فناوری نوین، توانایی پردازش و تحلیل داده‌های پیچیده را دارد و در بسیاری از حوزه‌ها، از جمله تصمیم‌گیری و تحلیل داده‌ها، کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. هوش مصنوعی مولد (Generative AI) یکی از زیرمجموعه‌های هوش مصنوعی است که با استفاده از الگوهای استخراج‌شده از داده‌های ورودی، قادر به تولید محتوای جدید مانند متن، تصویر، صدا و ویدئو است. این فناوری در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده و به‌ویژه در میان عموم مردم به سرعت گسترش یافته است. بنابراین، انتظار می‌رود که در آینده نزدیک نقش به‌سزایی در زمینه‌های مختلف مهندسی و مدیریت منابع آب ایفا نماید. مسئله حیاتی در استفاده از هوش مصنوعی در سال‌های پیش‌رو، کاربرد آن نه به عنوان تنها یک ابزار بلکه به عنوان عاملی تصمیم‌گیرنده در فرایندهای زندگی بشری و بخشی‌هایی از آن همانند علوم مهندسی است. نسخه‌های مختلفی از هوش مصنوعی تاکنون ارائه و گزارش شده است که برخی از آن‌ها امروزه راه به زندگی اغلب انسان‌ها به‌ویژه در محیط‌های تخصصی پیدا کرده‌اند. ChatGPT-4 یک مدل زبانی پیشرفته از OpenAI است که

توانسته با استفاده از یادگیری عمیق، به ایجاد محتوای متنی و تحلیل اطلاعات کمک نماید. در این پژوهش، از ChatGPT-4 به عنوان یک مشاور مجازی برای انجام مقایسه‌های زوجی در روش AHP استفاده شده است. این مدل با ارائه نظرات و تحلیل‌های کارشناسانه، توانسته است دقت و کارایی فرآیند تصمیم‌گیری را افزایش دهد. استفاده از ChatGPT-4 در این مطالعه، به شناسایی معیارهای مؤثر بر استحصال آب باران و تحلیل نظرات کارشناسان مجازی کمک کرده و موجب تسهیل در جمع‌آوری و پردازش داده‌ها شده است. به این ترتیب، ترکیب هوش مصنوعی و روش‌های سنتی مانند AHP به بهبود نتایج و کیفیت تصمیم‌گیری در انتخاب مکان‌های مناسب برای استحصال آب باران در استان مازندران منجر شده است.

## ۲-۴- نوع پژوهش

این پژوهش کاربردی است و هدف آن استفاده از نتایج برای یافتن اولویت پارامترهای مؤثر بر سامانه‌های استحصال آب باران و ارائه نقشه از مناطق مناسب به منظور استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران در استان مازندران برای مدیریت بهتر منابع آب است. از نظر روش‌شناسی، این تحقیق، ترکیبی محسوب می‌شود که داده‌های کیفی و کمی را دربرمی‌گیرد. در این پژوهش، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده و نتایج به دست آمده مستقیماً قابل استفاده در سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های آتی خواهد بود.

## ۲-۵- گردآوری اطلاعات

### ۲-۵-۱- مطالعات کتابخانه‌ای

اولین مرحله پژوهش، جمع‌آوری اطلاعات از منابع علمی بود. با استفاده از موتورهای جستجوی معتبر مانند Google Scholar و Web of Science حدود ۲۰۰ مقاله در زمینه استحصال آب باران و مکان‌یابی مناسب شناسایی شد. معیارهای انتخاب، شامل تاریخ انتشار (فقط مقالات ده سال اخیر)، ارتباط با موضوع (مقالات مرتبط با استحصال آب باران و مکان‌یابی) و اعتبار علمی (مقالات منتشرشده در مجلات معتبر) بود. مطالعه چکیده‌ها و بخش‌های کلیدی این مقالات منجر به شناسایی ۵۰ معیار اولیه برای مکان‌یابی شد.

### ۲-۵-۲- تعریف کارشناسان مجازی با استفاده از هوش

#### مصنوعی

پس از شناسایی معیارهای اولیه، به جای استفاده از

کارشناسان واقعی برای مقایسه‌های دودویی در AHP، از هوش مصنوعی برای شبیه‌سازی نظرات کارشناسان استفاده شد. به این منظور در Chat GPT-4 پروفایل‌های شخصیتی و تخصصی برای

کارشناسان واقعی برای مقایسه‌های دودویی در AHP، از هوش مصنوعی برای شبیه‌سازی نظرات کارشناسان استفاده شد. به این منظور در Chat GPT-4 پروفایل‌های شخصیتی و تخصصی برای

جدول ۱- معیارهای استخراج‌شده از مقالات بررسی‌شده در زمینه استحصال آب باران و مکان‌یابی آن

| ردیف | نویسنده (سال)                    | عنوان مقاله                                                                                                                                          | معیارهای استخراج‌شده از مقاله                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱    | خیرخواه و همکاران (۱۳۹۴)         | تعیین مناطق مستعد استحصال آب باران با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی در محیط GIS (مطالعه موردی: حوزه آب‌خیز رود سراب شهرستان خوشاب استان خراسان رضوی) | کاربری اراضی، شیب، نفوذپذیری، بافت خاک، عمق خاک و فاصله از آبراهه                                                                                                                                                                                                                                   |
| ۲    | اکبرپور و همکاران (۱۳۹۵)         | تعیین مکان‌های مناسب جمع‌آوری آب باران برای استفاده در مصارف کشاورزی با استفاده از مدل AHP (مطالعه موردی: حوزه آب‌خیز بیرجند)                        | شیب، کاربری اراضی، بافت خاک، زهکشی، فاصله تا مناطق مسکونی، فاصله تا زراعت‌های آبی، فاصله تا زراعت‌های دیم                                                                                                                                                                                           |
| ۳    | سلطانی و همکاران (۱۴۰۱)          | مکان‌یابی مقایسه‌ای جمع‌آوری آب باران (مطالعه موردی: حوضه‌های میخوران و خسروآباد استان کرمانشاه)                                                     | پوشش گیاهی، تاج پوشش، درصد شیب، جهت شیب، بارندگی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیک خاک، ژئومورفولوژی، طبقات ارتفاعی، فرسایش                                                                                                                                                             |
| ۴    | نوروززاده و همکاران (۱۴۰۱)       | کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در تعیین نقاط مناسب برای احداث سازه‌های جمع‌آوری آب باران                                                        | بارندگی، شیب، شوری زمین، پوشش گیاهی، بافت، ژئومورفولوژی                                                                                                                                                                                                                                             |
| ۵    | عربی علی‌آباد و ملکی‌نژاد (۱۳۹۴) | ارزیابی استحصال آب باران از ساختمان‌های مسکونی (مطالعه موردی شیراز)                                                                                  | بارندگی، پوشش گیاهی، جنس خاک، نوع خاک، مسائل محیط‌زیستی                                                                                                                                                                                                                                             |
| ۶    | فقیهی و جهان‌تبغ (۱۴۰۲)          | تعیین مکان‌های مناسب برداشت آب باران با استفاده از GIS                                                                                               | توپوگرافی، شیب زمین، نوع خاک، شدت بارندگی، پوشش کاربری زمین، زهکشی، جریان رودخانه و معیارهای اجتماعی-اقتصادی                                                                                                                                                                                        |
| ۷    | اکبرپور و همکاران (۱۳۹۴)         | مقایسه روش‌های مکان‌یابی مناطق مستعد جمع‌آوری باران به کمک سیستم پشتیبانی تصمیم DDS مبتنی بر GIS                                                     | بارندگی، شیب حوضه آبریز، عمق خاک، بافت خاک، شبکه آبراهه‌های دشت، کاربری اراضی منطقه                                                                                                                                                                                                                 |
| ۸    | معماریان و همکاران (۱۳۹۴)        | ملاحظات و استانداردهای محیط‌زیستی اجرای سیستم‌های استحصال آب باران در منازل مسکونی                                                                   | مخزن، سطح آبگیر، ناودان‌ها، آبروها، بررسی پیامدهای محیط‌زیستی، بررسی اقتصادی، بررسی اجتماعی                                                                                                                                                                                                         |
| ۹    | Toosi et al. (2020)              | A multi-criteria decision analysis approach towards efficient rainwater harvesting                                                                   | بارش، شیب زمین، نوع خاک، عمق خاک، کاربری زمین، خشکسالی                                                                                                                                                                                                                                              |
| ۱۰   | نوری و قاسم‌لونیا (۱۳۹۸)         | A review of criteria in rainwater harvesting management                                                                                              | بارش باران، شیب زمین، بافت خاک، خشکسالی، پوشش زمین، کاربری زمین، فاصله زمین از جاده و سایر مکان‌ها، عوامل اجتماعی-محیط‌زیستی، تکنیک و زمین‌شناسی مربوط به سازه، عوامل کشاورزی                                                                                                                       |
| ۱۱   | Mosase et al. (2017)             | Assessment of the suitability of rainwater harvesting areas using multi-criteria analysis and Fuzzy Logic                                            | عوامل اقلیمی (بارش)، عوامل مربوط به خاک (بافت، عمق، زهکشی)، عوامل توپوگرافیکی (شیب)، پوشش زمین                                                                                                                                                                                                      |
| ۱۲   | Martínez-Acosta et al. (2019)    | Design criteria for planning the agricultural rainwater harvesting systems: A review                                                                 | عوامل مربوط به جغرافیا (بارش، تبخیر، رطوبت، سرعت باد، تابش)، عوامل فیزیوگرافیک (شبکه زهکشی، شیب، رواناب، حوضه آبریز، کاربری)، عوامل مربوط به خاک (عمق، پوشش، بافت)، عوامل اجتماعی-اقتصادی (تعداد ساکنان، ذی‌نفعان، هزینه، مالکیت زمین، تورم)، عوامل مربوط به فاصله از (جریان‌های آب، محصولات زراعی) |
| ۱۳   | Ammar et al. (2016)              | Identification of suitable sites for rainwater harvesting structures in arid and semi-arid regions: A review                                         | عوامل بیوفیزیکی، عوامل اقتصادی-اجتماعی                                                                                                                                                                                                                                                              |
| ۱۴   | Singh et al. (2017)              | Multi-criteria analysis and GIS modeling for identifying prospective water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply     | ضریب رواناب، شیب، زهکشی، عوامل زمین‌شناسی                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ۱۵   | Alwan et al. (2020)              | Potential water harvesting sites identification using spatial multi-criteria evaluation in Maysan Province, Iraq                                     | جاده‌ها، شیب زمین، جریان آب، بارش، خاک، تبخیر                                                                                                                                                                                                                                                       |

تا بدون نیاز به مصاحبه با کارشناسان واقعی، که ممکن است در دسترس نباشند، نظرات دقیق و شبیه‌سازی‌شده‌ای برای تحلیل به‌دست آید. همچنین از سایر مزایای این روش می‌توان به سرعت بخشیدن در انجام مقایسه‌ها، کم‌کردن هزینه‌های مربوط به پرسش و پرسش‌نامه و حذف خطاهای انسانی در روش معمول پرسش‌نامه اشاره نمود.

هرکدام از متخصصان مذکور با ویژگی "دارای دکترای تخصصی در زمینه خودشان و سابقه کار در زمینه مرتبط برای ۱۵ سال" تعریف شدند. سپس از Chat GPT-4 خواسته شد که با توجه به این پروفایل‌ها، به‌عنوان این کارشناسان در مقایسه و اولویت‌بندی معیارها نظر دهد. هر کارشناس مجازی نظر خود را درباره اهمیت معیارها ارائه کرد و از این نظرات در مقایسه‌های دودویی روش AHP استفاده شد. این فرآیند این امکان را می‌دهد

جدول ۲- کارشناسان مجازی تعریف‌شده برای هوش مصنوعی

| ردیف | کارشناس مجازی                  | ردیف | کارشناس مجازی                     |
|------|--------------------------------|------|-----------------------------------|
| ۱    | کارشناس متخصص هیدرولوژی        | ۶    | کارشناس متخصص اقلیم‌شناسی         |
| ۲    | کارشناس متخصص مهندسی عمران     | ۷    | کارشناس متخصص مهندسی منابع آب     |
| ۳    | کارشناس متخصص مهندسی محیط زیست | ۸    | کارشناس متخصص اقتصاددان محیط زیست |
| ۴    | کارشناس متخصص برنامه‌ریزی شهری | ۹    | کارشناس متخصص مهندسی کشاورزی      |
| ۵    | کارشناس متخصص زمین‌شناسی       | ۱۰   | کارشناس متخصص مهندسی GIS          |

## ۲-۵-۳- انتخاب معیارهای نهایی

پس از تحلیل داده‌های اولیه استخراج‌شده از مقالات، ۱۰ معیار پرتکرار و با اهمیت انتخاب شد. به این معیارها در جدول ۳ اشاره شده است.

جدول ۳- معیارهای پرتکرار در مقالات استخراج‌شده

| شیب زمین     | شبکه آبراهه‌ها   |
|--------------|------------------|
| بارندگی      | عمق خاک          |
| بافت خاک     | زهکشی            |
| کاربری اراضی | معیارهای اجتماعی |
| پوشش گیاهی   | ژئومورفولوژی     |

این معیارها به‌عنوان مهم‌ترین عوامل در مکان‌یابی برای استحصال آب باران در نظر گرفته شده و برای تحلیل استفاده شدند.

جدول ۴- بررسی تعداد تکرار هر معیار در مقالات بررسی‌شده

| ردیف | معیار            | تکرار |
|------|------------------|-------|
| ۱    | شیب زمین         | ۱۳    |
| ۲    | بارندگی          | ۱۰    |
| ۳    | بافت خاک         | ۹     |
| ۴    | کاربری اراضی     | ۸     |
| ۵    | پوشش گیاهی       | ۶     |
| ۶    | شبکه آبراهه‌ها   | ۶     |
| ۷    | عمق خاک          | ۵     |
| ۸    | زهکشی            | ۵     |
| ۹    | معیارهای اجتماعی | ۵     |
| ۱۰   | ژئومورفولوژی     | ۵     |

## ۲-۶-۲- فرآیند تحلیل داده‌ها با روش AHP و هوش

### مصنوعی

### ۲-۶-۱- روش AHP (فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی)

روش AHP برای تحلیل داده‌ها و تعیین اهمیت نسبی معیارها استفاده شده است. این روش از طریق مقایسه زوجی معیارها، به تعیین وزن هر معیار در فرآیند تصمیم‌گیری کمک می‌کند. هر معیار با معیارهای دیگر به‌صورت دوجه‌دو مقایسه شده و براساس اهمیت نسبی خود در استحصال آب باران امتیاز داده شدند. این مقایسه‌ها توسط کارشناسان مجازی تعریف‌شده در Chat GPT-4 انجام شدند.

### ۲-۶-۲- شبیه‌سازی مقایسه‌های جفتی با استفاده از

### Chat GPT-4

از Chat GPT خواسته شد که به‌عنوان هریک از کارشناسان مجازی، مقایسه‌های دوجه‌دویی بین معیارها انجام دهد. این مقایسه‌ها براساس پروفایل تخصصی هر کارشناس انجام شد و هریک از کارشناسان مجازی، نظرات خود را درخصوص اهمیت هر معیار نسبت به معیار دیگر ارائه کردند. به این ترتیب، برای هر معیار یک ماتریس مقایسه‌ای تولید شد.

### ۲-۶-۳- ایجاد ماتریس نهایی

درنهایت ۱۰ ماتریس مقایسه‌ای برای ۱۰ معیار از طریق متخصصان مجازی تعریف‌شده در Chat GPT-4 تولید شد؛ سپس با ترکیب این ماتریس‌ها و استفاده از میانگین هندسی، یک

ماتریس نهایی ایجاد شد که اهمیت نسبی هر معیار را مشخص می‌کند.

## ۷-۲- ملاحظات اخلاقی

در این پژوهش از کارشناسان واقعی استفاده نشده، بلکه از پروفایل‌های مجازی تعریف‌شده در Chat GPT-4 بهره گرفته شد. این امر منجر به حذف نیاز به دریافت رضایت‌نامه از افراد حقیقی شد. همچنین تمامی منابع علمی به‌درستی ارجاع داده شده‌اند و اصول اخلاقی در گردآوری و تحلیل داده‌ها رعایت شده است.

## ۸-۲- جمع‌بندی

در انتها، مراحل مختلف پژوهش از گردآوری اطلاعات، شبیه‌سازی نظرات کارشناسان با Chat GPT-4 و تحلیل داده‌ها با استفاده از AHP تشریح شد. اولویت‌بندی نهایی این پژوهش، پارامترهای مؤثر بر سامانه استحصال آب باران را مشخص می‌کند که می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کاربردی برای مدیریت منابع آب در استان مورد استفاده قرار گیرد.

## ۳- نتایج

در این مقاله، رویکردی نوین برای اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر بر سامانه‌های استحصال آب باران و ارائه نقشه مکان‌های مناسب به‌منظور استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران در استان مازندران ارائه شد. این رویکرد با استفاده از ترکیب روش تحلیل

سلسله‌مراتبی (AHP) و هوش مصنوعی ChatGPT-4 طراحی و پیاده‌سازی شد. هدف اصلی، ارزیابی و اولویت‌بندی معیارهای مختلف مؤثر بر سامانه‌های استحصال آب باران با بهره‌گیری از دیدگاه‌های کارشناسی مجازی، ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری دقیق و کارآمد و درنهایت ارائه نقشه مکان‌های مناسب برای استفاده از این سامانه‌ها در استان مازندران بود.

## ۳-۱- ترکیب AHP و ChatGPT-4

ابتدا ۱۰ معیار کلیدی به‌عنوان عوامل مؤثر بر انتخاب مکان مناسب طبق مطالعات صورت‌گرفته از مقالات تعیین شدند (جدول ۴)؛ سپس ۱۰ کارشناس مجازی در زمینه‌های مختلف مرتبط تعریف شدند؛ این جدول‌ها که از هوش مصنوعی گرفته شده، در شکل ۳ نمایش داده شده است. سپس با استفاده از مدل ChatGPT-4، ماتریس‌های مقایسه زوجی برای هر کارشناس مجازی براساس دانش و تخصص آن‌ها تشکیل شد.

## ۳-۲- محاسبه ماتریس‌های مقایسه زوجی و ماتریس‌های

### نهایی

پس از تشکیل ۱۰ ماتریس مقایسه زوجی برای ۱۰ کارشناس تعریف‌شده، میانگین هندسی این ماتریس‌ها برای ماتریس نهایی محاسبه شد (جدول ۵). ماتریس پایانی نمایانگر دیدگاه کلی تمامی کارشناسان مجازی درباره اهمیت معیارها در انتخاب اولویت پارامترهای مؤثر بر سامانه استحصال آب باران است.

جدول ۵- ماتریس نهایی مقایسه‌های زوجی ۱۰ کارشناس مجازی خروجی هوش مصنوعی

| ماتریس پایانی   |          |         |          |              |            |                |         |       |                 |              |
|-----------------|----------|---------|----------|--------------|------------|----------------|---------|-------|-----------------|--------------|
| معیارها         | شیب زمین | بارندگی | بافت خاک | کاربری اراضی | پوشش گیاهی | شبکه آبراهه‌ها | عمق خاک | زهکشی | معیارهای اجماعی | ژئومورفولوژی |
| شیب زمین        | ۱        | ۳/۷۵    | ۴/۷۸۷    | ۲/۶۶۵        | ۱/۱۴۲      | ۳/۴۱۱          | ۳/۲۸۸   | ۲/۶۵۸ | ۲/۶۵۷           | ۴/۵۴۵        |
| بارندگی         | ۰/۸۲     | ۱       | ۳/۴۴۳    | ۱/۱۵۷        | ۱/۱۹۰      | ۲/۲۶۰          | ۳/۵۱۲   | ۲/۴۴۰ | ۱/۹۴            | ۳/۱۴۰        |
| بافت خاک        | ۰/۸۰۲    | ۰/۷۹۲   | ۱        | ۰/۸۶         | ۰/۹۳       | ۱/۵۲۷          | ۲/۴۱    | ۱/۹۳۲ | ۱/۶۹۸           | ۳/۹۸۱        |
| کاربری اراضی    | ۰/۱۹۳    | ۰/۷۶۵   | ۱/۸۲۰    | ۱            | ۰/۷۰۹      | ۱/۵۷۴          | ۱/۸۷۹   | ۱/۶۲۸ | ۱/۵۳۱           | ۲/۳۴۷        |
| پوشش گیاهی      | ۰/۶۰۸    | ۰/۷۱۹   | ۲/۳۵۱    | ۱/۳۱۱        | ۱          | ۲/۳۰۳          | ۳/۵۷۰   | ۲/۹۶۰ | ۱/۸۴۴           | ۲/۸۴۹        |
| شبکه آبراهه‌ها  | ۰/۱۲۳    | ۰/۳۸۴   | ۰/۱۸۵    | ۰/۶۷۶        | ۰/۸۳۴      | ۱              | ۲/۶۶    | ۱/۴۸۴ | ۰/۳۵۶           | ۲/۵۷۳        |
| عمق خاک         | ۰/۵۵۲    | ۰/۱۳    | ۰/۹۶۴    | ۰/۸۹۴        | ۰/۷۲۳      | ۰/۴۷۳          | ۱       | ۱/۷۵۵ | ۱/۴۴۱           | ۲/۶۳۳        |
| زهکشی           | ۰/۸۴۳    | ۰/۳۸۴   | ۰/۴۰۸    | ۰/۴۴۵        | ۰/۷۶۴      | ۰/۱۷۶          | ۰/۴۵۶   | ۱     | ۱/۹۵            | ۱/۹۴۵        |
| معیارهای اجماعی | ۰/۵۶۳    | ۰/۲۶۶   | ۰/۶۴۵    | ۰/۵۷۶        | ۰/۷۶۵      | ۱/۵۵۲          | ۰/۵۶۶   | ۰/۷۱۷ | ۱               | ۱/۳۰۸        |
| ژئومورفولوژی    | ۰/۲۲     | ۰/۹۲۳   | ۰/۲۱۳    | ۰/۷۶۳        | ۰/۸۳۳      | ۰/۱۲۴          | ۰/۷۲۴   | ۰/۶۴۶ | ۰/۳۵۵           | ۱            |

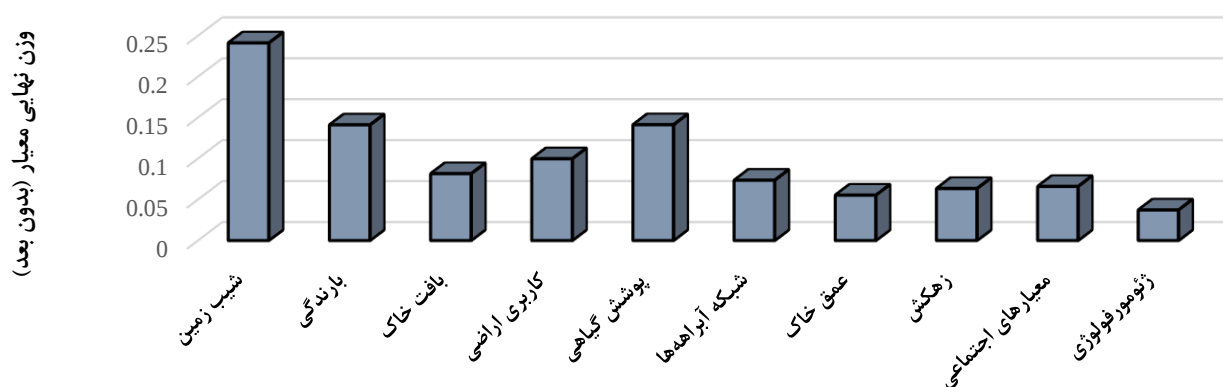
### ۳-۳- وزن معیارها و اولویت‌بندی

بالاترین اهمیت و ژئومورفولوژی و عمق خاک کم‌ترین اهمیت را در مکان‌یابی برای استحصال آب باران دارند. وزن هر معیار به صورت ستونی در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این شکل اعداد ستون بدون بعد هستند.

وزن‌های نهایی معیارها از طریق نرمال‌سازی ماتریس پایانی به دست آمدند (جدول ۶). نتایج نشان داد که معیار شیب زمین،

جدول ۶- وزن نرمال‌شده معیارها پس از محاسبه میانگین هندسی خروجی هوش مصنوعی

| معیار     | ژئومورفولوژی | معیارهای اجتماعی | زهکشی  | عمق خاک | شبکه آبراهه‌ها | پوشش گیاهی | کاربری اراضی | بافت خاک | بارندگی | شیب زمین |
|-----------|--------------|------------------|--------|---------|----------------|------------|--------------|----------|---------|----------|
| وزن نهایی | ۰/۰۳۷۲       | ۰/۰۶۵۹           | ۰/۰۶۳۴ | ۰/۰۵۵۳  | ۰/۰۷۳۵         | ۰/۱۴۱۲     | ۰/۰۹۹۷       | ۰/۰۸۱۵   | ۰/۱۴۱۰  | ۰/۲۴۱۲   |



شکل ۲- وزن نهایی هر معیار

### ۳-۴- نرخ ناسازگاری

که  $\lambda_{max}$ : مقدار ویژه محاسبه شده و  $n$ : تعداد معیارها است. مقدار ویژه  $(\lambda_{max})$  قبلاً برابر با  $10/3458$  در نظر گرفته شد و تعداد معیارها  $n=10$  است. بنابراین، شاخص ناسازگاری (CI) برابر  $0/384$  است. نرخ ناسازگاری (CR) به صورت زیر محاسبه می‌شود.

نرخ ناسازگاری، شاخصی است که میزان سازگاری پاسخ‌های خبرگان به ارزیابی‌ها و مقایسه‌های زوجی را اندازه‌گیری می‌کند. برای ارزیابی سازگاری مقایسه‌ها، نرخ ناسازگاری (CR) مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0384}{1.49} \approx 0.0258$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

برای یک ماتریس با ۱۰ معیار، مقدار  $RI=1/49$  است. بنابراین، نرخ ناسازگاری (CR) برابر  $0/258$  است.

که  $CI$ : شاخص ناسازگاری و  $RI$ : شاخص ناسازگاری تصادفی (Random Index) است که برای ماتریس‌هایی با ابعاد مختلف مقدار ثابتی دارد.

بررسی و ارزیابی ناسازگاری در روش AHP با استفاده از نرخ ناسازگاری (CR) انجام می‌شود. طبق استانداردهای این روش، اگر مقدار CR کمتر از  $0/1$  باشد، مقایسه‌های زوجی انجام شده از نظر سازگاری قابل قبول هستند و نیازی به بازنگری ندارند. اگر این مقدار بیش‌تر از  $0/1$  باشد، مقایسه‌ها ناسازگار تلقی شده و نیاز به بازنگری و تصحیح دارند.

مقدار ویژه  $(\lambda_{max})$  برای ماتریس پایانی برابر با  $10/3458$  است. این مقدار برای محاسبه شاخص ناسازگاری (CI) و سپس نرخ ناسازگاری (CR) استفاده خواهد شد. برای محاسبه شاخص ناسازگاری (CI) از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

باتوجه به این‌که مقدار نرخ سازگاری محاسبه شده برابر با  $0/258$  و کمتر از  $0/1$  است، پس نیاز به بازنگری و تغییر در مقایسه‌های انجام شده نیست و وزن‌ها و اولویت‌های معیارها معتبر هستند. در نهایت باتوجه به محاسبات انجام شده، وزن نهایی

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{10.3458 - 10}{10 - 1} \approx 0.03484 \quad (2)$$

معیارها به‌دست آمده است (شکل ۲). این نمودار نشان‌دهنده اولویت هر معیار نسبت به سایر معیارها است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب روش AHP و هوش مصنوعی مولد می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر و کارآمد در فرآیند اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر بر سامانه‌های استحصال آب باران در استان مازندران به‌کار گرفته‌شود. این رویکرد با محاسبه نرخ ناسازگاری  $0/0258$  (کم‌تر از آستانه  $0/1$ )، از سازگاری قابل‌قبول مقایسه دویه‌دو حکایت دارد و امکان ارزیابی چندمعیاره یکپارچه با قابلیت اعتماد بالا را برای سیاست‌گذاران و مدیران محیط‌زیستی فراهم می‌کند. براساس یافته‌ها، شیب زمین با وزن نهایی  $0/254$  (بالاترین اهمیت) و بارندگی به‌عنوان کلیدی‌ترین معیارهای تأثیرگذار شناسایی شدند؛ درحالی‌که ژئومورفولوژی و عمق خاک با وزن‌های به‌ترتیب  $0/038$  و  $0/065$  کم‌ترین تأثیر را در مکان‌یابی نشان دادند. این نتایج با تحلیل‌های کیفی موجود در مطالعه هم‌خوانی دارد. به‌طور مثال، تأثیر مستقیم شیب زمین بر افزایش سرعت رواناب و نقش بارندگی به‌عنوان عامل اصلی تأمین آب در سامانه‌های استحصال، مؤید اولویت‌بندی انجام‌شده است. همچنین، معیارهای قابل‌ارائه به‌صورت نقشه (مانند شبکه آبراهه‌ها، کاربری اراضی، و پوشش گیاهی) تهیه شدند که می‌توانند به‌عنوان لایه‌های اطلاعاتی در

سیستم GIS برای طراحی عملیاتی پروژه‌ها مورد استفاده قرارگیرند. یافته‌ها حاکی از آن است که تلفیق این روش با پروژه‌های آب و فاضلاب شهری، به‌ویژه در مناطق با ویژگی‌های مشابه استان مازندران، می‌تواند راه‌کار مناسبی برای مدیریت پایدار منابع آب تحت شرایط تغییرات اقلیمی باشد. همچنین نتایج حاصل از بررسی‌های انجام‌شده در مورد اهمیت و نقش معیارهای انتخابی در سیستم استحصال آب باران، در جدول ۸ قابل‌مشاهده است.

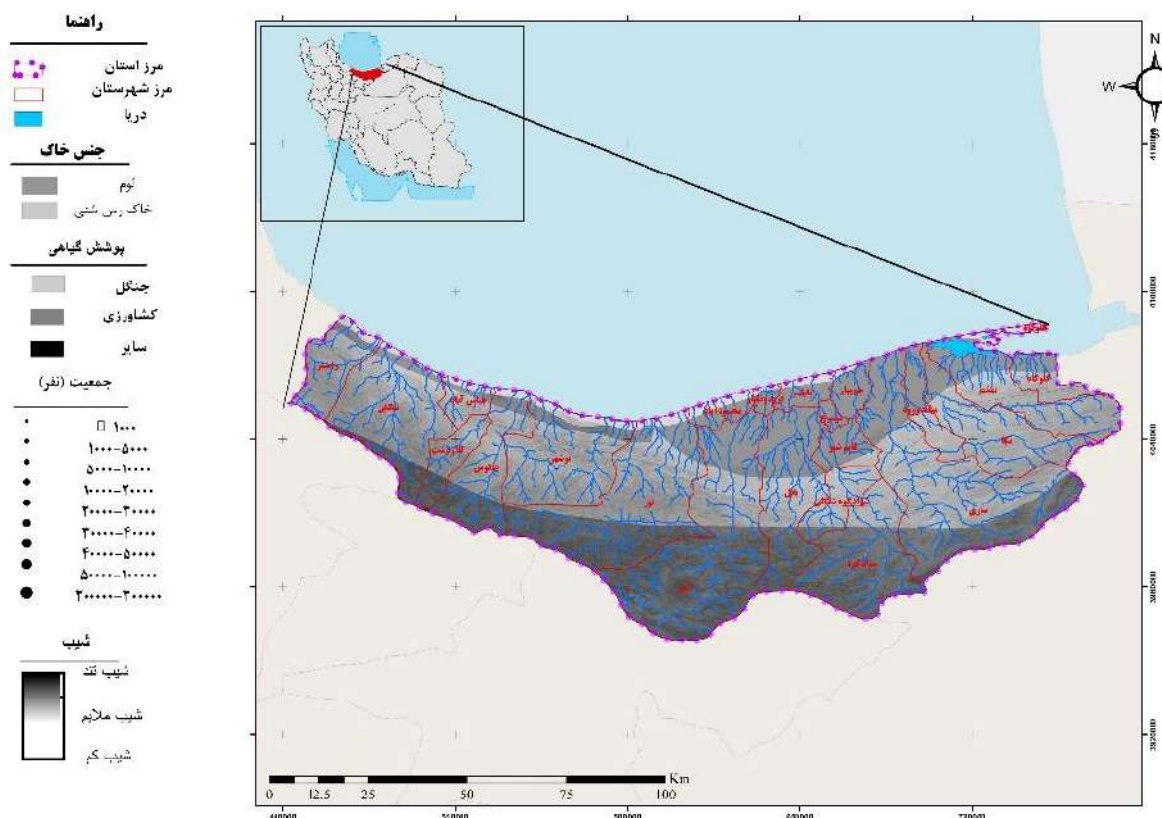
باتوجه به انجام این مطالعات برای استان مازندران و نظر به برخی داده‌های موجود، شکل ۳ به‌عنوان نمونه‌ای از نقشه‌های برهم‌نهی برخی از معیارهای ارائه‌شده در این مقاله شامل شیب زمین، پوشش گیاهی و جمعیت، نمایش داده می‌شود.

#### ۵- محدودیت‌ها

این مطالعه با استفاده از روش AHP و بهره‌گیری از کارشناسان مجازی انجام شد. استفاده از ChatGPT به‌عنوان جایگزین کارشناسان واقعی ممکن است نتایج را کم‌تر تطابق‌پذیر با شرایط میدانی کند که این امر نیاز به بررسی بیشتر دارد. همچنین با توجه به محدودیت‌های استفاده از نسخه محدود هوش مصنوعی ChatGPT-4، گرفتن خروجی‌های طولانی و انجام محاسبات طولانی در آن مقدور نیست و انجام یکباره تمامی بخش‌های محاسبات و خروجی‌ها نیاز به نسخه نامحدود دارد.

جدول ۸- اهمیت و نقش معیارها

| معیارها                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| شیب زمین: شیب زمین تأثیر مستقیمی بر جریان سطحی آب دارد. افزایش شیب، باعث افزایش سرعت رواناب و کاهش زمان نفوذ آب به خاک می‌شود. بنابراین، زمین‌های با شیب ملایم برای استحصال آب باران مناسب‌تر هستند                                                                                          | شبکه آبراهه‌ها: نزدیکی به شبکه‌های آبراهه و رودخانه‌ها، نقش مهمی در جمع‌آوری و هدایت آب باران ایفا می‌کند. مکان‌هایی که به شبکه‌های آبراهه نزدیک‌تر هستند، پتانسیل بهتری برای انتقال رواناب و افزایش کارایی استحصال آب دارند. |
| بارندگی: مقدار و توزیع بارندگی اصلی‌ترین عامل تأمین آب در سامانه‌های استحصال است. مناطق با بارندگی زیاد، پتانسیل بیشتری برای جمع‌آوری آب دارند.                                                                                                                                              | عمق خاک: عمق خاک عامل مهمی در نگهداری آب است. خاک‌های عمیق‌تر ظرفیت بیشتری برای ذخیره‌سازی آب دارند؛ بنابراین هرچه عمق خاک بیشتر باشد، توانایی ذخیره آب باران نیز افزایش می‌یابد.                                             |
| بافت خاک: بافت خاک بر توانایی ذخیره و نفوذ آب تأثیر می‌گذارد. خاک‌های ماسه‌ای به‌دلیل ظرفیت نفوذپذیری بالا، سریع‌تر آب را جذب می‌کنند، درحالی‌که خاک‌های رسی توانایی کم‌تری در نفوذ آب دارند. درنتیجه برای استحصال باران، خاک‌هایی با بافت مناسب و توانایی ذخیره‌سازی آب ترجیح داده می‌شوند. | زهکشی: سیستم زهکشی زمین، نقش کلیدی در مدیریت رواناب دارد. زهکشی مناسب می‌تواند از تجمع آب جلوگیری کرده و باعث بهبود نفوذپذیری شود. زهکشی نامناسب ممکن است باعث هدررفت آب شود.                                                 |
| کاربری اراضی: کلاس‌های کاربری اراضی، بر رواناب و میزان آب استحصال‌شده تأثیر می‌گذارد. زمین‌های غیرمستحکم و جنگلی به‌دلیل پوشش گیاهی بیشتر، توانایی بیشتری در جذب و نگهداری آب باران دارند.                                                                                                   | معیارهای اجتماعی: عواملی مانند پذیرش محلی، هزینه‌های اجرایی و نیازهای جوامع می‌تواند بر موفقیت و پذیرش سامانه‌های استحصال آب باران تأثیر بگذارد. بنابراین، درنظرگرفتن نیازهای اجتماعی در این پروژه‌ها ضروری است.              |
| پوشش گیاهی: پوشش گیاهی می‌تواند سرعت جریان آب سطحی را کاهش‌دهد و فرصت بیشتری برای نفوذ آب به خاک ایجاد کند. مناطقی با پوشش گیاهی متراکم‌تر، آب بیشتری را ذخیره و خطر فرسایش خاک را کاهش می‌دهند.                                                                                             | ژئومورفولوژی: ویژگی‌های سطح زمین، مانند پستی و بلندی‌ها، بر نحوه جریان آب باران و مکان مناسب برای ذخیره‌سازی آن تأثیر می‌گذارد. مناطقی با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی مناسب، پتانسیل بیشتری برای استحصال و ذخیره آب باران دارند. |



شکل ۳- برهم‌نهی برخی از معیارهای ارائه‌شده در این مقاله شامل شیب زمین، پوشش گیاهی و جمعیت

## ۸- مراجع

اکبرپور، ا.، خاشعی‌سیوکی، ع.، کشاورز، ا.، و فروغی‌فر، ح.، (۱۳۹۴)، "تعیین مکان‌های مناسب جمع‌آوری آب باران برای استفاده در مصارف کشاورزی با استفاده از مدل AHP (مطالعه موردی: حوزه آب‌خیز بیرجند)"، پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آب‌خیز، ۶(۱۲)، ۶۵-۷۴.

اکبرپور، ا.، صادقی، ش.، فروغی‌فر، ح.، و شهیدی، ع.، (۱۳۹۴)، "مقایسه روش‌های مکان‌یابی مناطق مستعد جمع‌آوری باران به کمک سیستم پشتیبانی تصمیم (DSS) مبتنی بر GIS"، نشریه جغرافیا و توسعه، ۱۳(۳۹)، ۱۴۷-۱۶۴، <https://doi.org/10.22111/gdij.2015.2010>.  
امامی اسکاردی، م.ج.، شویری، غ.، و کراچیان، ر.، (۱۴۰۱)، "تحلیل روابط بین گروداران و تحلیل تعارض با استفاده از رویکرد درخت تعارض"، تحقیقات منابع آب، ۱۸(۴)، ۵۷-۷۴، <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1401.18.4.48>.

خیرخواه، آ.، محمدی، ف.، و معاریان، ه.، (۱۳۹۴)، "تعیین مناطق مستعد استحصال آب باران با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی در محیط GIS (مطالعه موردی: حوزه آب‌خیز رود سراب شهرستان خوشاب استان خراسان رضوی)

البته می‌توان کار را به چند گام کوچک‌تر تقسیم کرد و پس از انجام هر گام، با گذراندن مدت‌زمانی که دسترسی به این هوش مصنوعی قطع می‌شود، گام‌های بعد را برای رسیدن به نتیجه نهایی انجام داد. همچنین تهیه نقشه نهایی براساس داده‌های موجود و مقدور برای نمایش صورت پذیرفت.

## ۶- پیشنهادها

در ادامه این پژوهش، پیشنهاد می‌شود همین فرآیند با مشارکت متخصصان دنیای واقعی تکرار شده و نتایج به‌دست‌آمده از هوش مصنوعی با داده‌های حاصل از تجربیات عملی مقایسه شود. در مرحله بعد، این مقایسه می‌تواند با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی کنترل‌شده صورت‌گیرد تا میزان دقت و کارایی هوش مصنوعی در فرآیند تصمیم‌گیری ارزیابی شود. علاوه بر این، گسترش دامنه تحقیق از طریق شناسایی عوامل تأثیرگذار جدید و تحلیل نتایج در شرایط متنوع می‌تواند به غنای پژوهش بیفزاید. همچنین پیشنهاد می‌شود که نتایج این پژوهش در محیط‌های عملیاتی واقعی، از جمله در کاربردهایی مانند کنترل سیلاب، مورد آزمایش و ارزیابی قرارگیرد تا میزان اثربخشی و قابلیت اجرایی آن‌ها سنجیده شود.

- analysis", *Water*, 16(13), 1789, <https://doi.org/10.3390/w16131789>.
- Darko, A., Chan, A.P.C., Ameyaw, E.E., Owusu, E.K., Pärn, E., and Edwards, D.J., (2019), "Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction", *International Journal of Construction Management*, 19(5), 436-452, <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1452098>.
- Li, Z., Boyle, F., and Reynolds, A., (2010), "Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland", *Desalination*, 260(1-3), 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.035>.
- Martínez-Acosta, L., López-Lambraño, A.A., and López-Ramos, A., (2019), "Design criteria for planning the agricultural rainwater harvesting systems: A review", *Applied Sciences*, 9(24), 5298, <https://doi.org/10.3390/app9245298>.
- Mosase, E., Kayombo, B., Tsheko, R., and Tapela, M., (2017), "Assessment of the suitability of rain water harvesting areas using multi-criteria analysis and fuzzy logic", *Advances in Research*, 10(4), 1-22, <https://doi.org/10.9734/AIR/2017/33983>.
- Nandi, S., and Gonela, V., (2022), "Rainwater harvesting for domestic use: A systematic review and outlook from the utility policy and management perspectives", *Utilities Policy*, 77, 101383, <https://doi.org/10.1016/j.jup.2022.101383>.
- Noori, S., and Ghasemlounia, R., (2019), "A review of criteria in rain water harvesting management", *International Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2(3), 9-16, <https://doi.org/10.1007/978-3-031-28251-513>.
- Pacheco, G.C.R., and Alves, C.D.M.A., (2024), "The performance of rainwater harvesting systems in the context of deep uncertainties", *Proceedings of IAHS*, 385, 11-16, <https://doi.org/10.5194/piahs-385-11-2024>.
- Rao, N.R., Kiran, S.P., Amena, T., Senthilkumar, A., Sivakumar, R., Kumar, M.A., and Velusamy, S., (2024), "Enhancing rainwater harvesting and groundwater recharge efficiency with multi-dimensional LSTM and clonal selection algorithm", *Groundwater for Sustainable Development*, 25, 101167, <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101167>.
- Raimondi, A., Quinn, R., Abhijith, G.R., Becciu, G., and Ostfeld, A., (2023), "Rainwater harvesting and treatment: State of the art and perspectives", *Water*, 15(8), 1518, <https://doi.org/10.3390/w15081518>.
- Saaty, T.L., (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*, McGraw-Hill.
- Singh, L.K., Jha, M.K., and Chowdary, V.M., (2017), "Multi-criteria analysis and GIS modeling for identifying prospective water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply", *Journal of Cleaner Production*, 142, 1436-1456, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.163>.
- Soh, Q.Y., O'Dwyer, E., Acha, S., and Shah, N., (2023), "Robust optimisation of combined rainwater harvesting and flood mitigation systems", *Water* (حفاظت از منابع و توسعه پایدار)، همایش ملی سامانه‌های سطوح آبگیر باران، ۲۸-۲۹ بهمن، مشهد.
- سلطانی، م. و سلیمانی، ک.، (۱۴۰۱)، "مکان‌یابی مقایسه‌ای جمع‌آوری آب باران (مطالعه موردی: حوضه‌های میخوران و خسروآباد استان کرمانشاه)"، *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۷(۱۸)، ۴۹-۶۲، <https://doi.org/10.22052/deej.2018.7.18.49>.
- عربی علی‌آباد، ف. و ملکی‌نژاد، ح.، (۱۳۹۴)، "ارزیابی استحصال آب باران از ساختمان‌های مسکونی (مطالعه موردی شهر شیراز) (مدیریت و برنامه‌ریزی شهری)"، همایش ملی سامانه‌های سطوح آبگیر باران، ۲۸-۲۹ بهمن، مشهد.
- فقیهی، ف. و جهان‌تیغ، ح.، (۱۴۰۲)، "تعیین مکان‌های مناسب برداشت آب باران با استفاده از GIS و FAHP"، *نشریه علمی-پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۳(۳)، ۲۵۱-۲۶۷، <https://doi.org/10.22125/iwe.2023.168323>.
- معماریان، ه.، حسین‌نیا، ا.، توسلی، ا.، کومه، ز.، تاج‌بخش، ح.، عباسی، ع. و پارسایی، ل.، (۱۳۹۴)، "ملاحظات و استانداردهای زیست‌محیطی اجرای سیستم‌های استحصال آب باران در منازل مسکونی (مدیریت و برنامه‌ریزی شهری)"، همایش ملی سامانه‌های سطوح آبگیر باران، ۲۸-۲۹ بهمن، مشهد.
- نوروززاده، م.، قانع‌باقعی، م. و تازه، م.، (۱۴۰۱)، "کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در تعیین نقاط مناسب برای احداث سازه‌های جمع‌آوری آب باران"، *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۷(۲۱)، ۴۵-۵۸، <https://doi.org/10.22052/deej.2018.7.21.35>.
- Al-Harbi, K.M.A.S., (2001), "Application of the AHP in project management", *International Journal of Project Management*, 19(1), 19-27, [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(99\)00038-100038-1](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00038-100038-1).
- Alwan, I.A., Aziz, N.A., and Hamoodi, M.N., (2020), "Potential water harvesting sites identification using spatial multi-criteria evaluation in Maysan Province, Iraq", *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 235, <https://doi.org/10.3390/ijgi9040235>.
- Ammar, A., Riksen, M., Ouassar, M., and Ritsema, C., (2016), "Identification of suitable sites for rainwater harvesting structures in arid and semi-arid regions: A review", *International Soil and Water Conservation Research*, 4(2), 108-120, <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.03.001>.
- Bojer, A.K., Bekalo, D.J., Debelee, T.G., Nadarajah, S., and Al-Quraishi, A.M.F., (2024), "Rainwater harvesting site selection for drought-prone areas in Somali and Borena Zones, Oromia Regional State, Ethiopia: A geospatial and multi-criteria decision

- Research, 245, 120532, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120532>.
- Sharifian, H., Emami-Skardi, M.J., Behzadfar, M., and Faizi, M., (2022), "Water sensitive urban design (WSUD) approach for mitigating groundwater depletion in urban geography; through the lens of stakeholder and social network analysis", *Water Supply*, 22(6), 5833-5852, <https://doi.org/10.2166/ws.2022.206>.
- Toosi, A.S., Tousi, E.G., Ghassemi, S.A., Cheshomi, A., and Alaghmand, S., (2020), "A multi-criteria decision analysis approach towards efficient rainwater harvesting", *Journal of Hydrology*, 582, 124501, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124501>.
- Ward, S., Memon, F.A., and Butler, D., (2012), "Performance of a large building rainwater harvesting system", *Water Research*, 46(16), 5127-5134, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.06.043>.
- Zheng, X., Sarwar, A., Islam, F., Majid, A., Tariq, A., Ali, M., Gulzar, S., Khan, M.I., Sardar Ali, M.A., Israr, M., Jamil, A., Aslam, M., and Soufan, W., (2023), "Rainwater harvesting for agriculture development using multi-influence factor and fuzzy overlay techniques", *Environmental Research*, 238, 117189, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117189>.



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

Research Paper

مقاله پژوهشی

## Economic and Technical Analysis of Leakage Reduction in Birjand Urban Water Distribution Network

Navid Gholampoor<sup>1</sup>, Pooya Mohammadi<sup>2</sup>,  
Fereshteh Modaresi<sup>2\*</sup> and Hossein Ansari<sup>3</sup>

1- PhD Student of Irrigation and Drainage,  
Department of Water Science and Engineering,  
Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of  
Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Water Science  
and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi  
University of Mashhad, Mashhad, Iran.

3- Professor, Department of Water Science and  
Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi  
University of Mashhad, Mashhad, Iran.

\*Corresponding author: Email: [fmodaresi@um.ac.ir](mailto:fmodaresi@um.ac.ir)

Received: 03/03/2025

Revised: 19/05/2025

Accepted: 17/08/2025

© IWWA

## تحلیل اقتصادی و فنی کاهش نشت در شبکه توزیع آب شهری بیرجند

نوید غلامپور<sup>۱</sup>، پویا محمدی<sup>۲</sup>، فرشته مدرسی<sup>۲\*</sup> و حسین  
انصاری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب،  
دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه  
فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۳- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه  
فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

\*نویسنده مسئول، ایمیل: [fmodaresi@um.ac.ir](mailto:fmodaresi@um.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۶

© انجمن آب و فاضلاب ایران

## Abstract

Water leakage in distribution networks is one of the main challenges in urban water resource management, which leads to financial loss, water waste, and reduced system efficiency. This study aims to analyze the economic and technical leakage in the water distribution network of Zone D of Birjand city and provide practical solutions for leakage management. In this study, hydraulic modeling with WaterGEMS software was used to simulate the network and analyze hydraulic parameters; flow rate, pressure, and geographical map data were collected and the network model was calibrated. The assessment showed an ILI index of 12, which reflects the serious leakage situation in the existing network, and for this reason, five different pressure management scenarios were examined to reduce leakage. The results showed that excessive pressure was the main cause of leakage in Zone D, and targeted pressure reduction in the S4 scenario resulted in a reduction of 14.90 lit/sec of leakage, equivalent to a daily volume reduction of 1287.360 m<sup>3</sup> and economic savings of 1.241 billion rials per year. The findings indicate that investing in smart pressure management and renovation of worn-out infrastructure, in addition to improving economic efficiency, also reduces environmental damage caused by water waste.

**Keywords:** Water Waste, Modeling, Pressure Management, WaterGEMS, ILI.

## چکیده

نشت آب در شبکه‌های توزیع، یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت منابع آب شهری است که منجر به اتلاف مالی، هدررفت آب و کاهش کارایی سیستم‌ها می‌شود. این پژوهش با هدف تحلیل اقتصادی و فنی نشت در شبکه توزیع آب زون D شهر بیرجند و ارائه راهکارهای عملی برای مدیریت نشت انجام شده است. در این مطالعه، از مدل‌سازی هیدرولیکی با نرم‌افزار WaterGEMS برای شبیه‌سازی شبکه و تحلیل پارامترهای هیدرولیکی استفاده شده است؛ داده‌های دبی، فشار و نقشه‌های جغرافیایی جمع‌آوری و مدل شبکه کالیبره شده است. ارزیابی انجام‌شده، شاخص ILI برابر با ۱۲ را نشان می‌دهد که وضعیت وخیم نشت در شبکه موجود را منعکس می‌کند. به همین دلیل، پنج سناریوی مختلف مدیریت فشار برای کاهش نشت بررسی شده‌اند. نتایج نشان داد که فشار بیش از حد، عامل اصلی نشت در زون D است و کاهش هدفمند فشار در سناریوی S4 منجر به کاهش ۱۴/۹۰ لیتر بر ثانیه نشت، معادل کاهش حجم روزانه ۱۲۸۷/۳۶۰ مترمکعب و صرفه‌جویی اقتصادی ۱/۲۴۱ میلیارد ریال در سال شده است. یافته‌ها حاکی از آن است که سرمایه‌گذاری در مدیریت هوشمند فشار و نوسازی زیرساخت‌های فرسوده، علاوه بر بهبود بهره‌وری اقتصادی، خسارات زیست‌محیطی ناشی از هدررفت آب را نیز کاهش می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** هدررفت آب، مدل‌سازی، مدیریت فشار، WaterGEMS، ILI.

مطالعات انجام‌شده در مناطق مختلف نشان می‌دهد که با مدیریت صحیح فشار، کاهش چشم‌گیری در نشت و هدررفت آب مشاهده شده است. به‌عنوان مثال، در شهر کالیفتا آفریقای جنوبی، مدیریت فشار موجب کاهش نشت از ۷۵٪ به ۳۰٪ شد و در نتیجه، ۹ میلیون مترمکعب آب ذخیره‌سازی شد (Mckenzie and Wegelin, 2009). علاوه‌براین، در شهر بانکوک، کنترل نشت باعث کاهش هزینه‌ها به میزان ۰/۰۱۵ دلار آمریکا به‌ازای هر مترمکعب آب شده است (Islam and Babel, 2013).

مدیریت فشار و تحلیل اقتصادی نشت در برخی دیگر از مطالعات نیز موردتوجه قرار گرفته است. در مطالعه‌ای در ناپل ایتالیا، طراحی مدل هیدرولیکی برای شبکه توزیع آب نشان‌داد که موقعیت بهینه سنسورها می‌تواند دقت کالیبراسیون مدل‌ها را افزایش دهد (Di Nardo et al., 2018). هم‌چنین، در شیلی، مدل‌سازی نشان داد که مدیریت صحیح فشار و نشت می‌تواند به بهبود هزینه‌ها و کارایی شبکه منجر شود (Molinos et al. 2021). در ایران نیز، مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است. برای مثال، در شهر ایلام، با استفاده از مدل تحلیل هیدرولیکی، نشت در گره‌ها و لوله‌های شبکه به‌طور دقیق محاسبه شد (اسدیانی‌یکتا و تابش، ۱۳۸۹). هم‌چنین، در شهر یزد، مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب به‌شکل دقیقی وضعیت موجود را شبیه‌سازی کرده است (صدرالساداتی و قدیانی، ۱۳۸۸).

مطالعات داخلی و خارجی نشان می‌دهند که تلاش‌های زیادی برای بهینه‌سازی تشخیص و کنترل نشت آب در شبکه‌های توزیع آب صورت گرفته است. این مطالعات نشان می‌دهند که بهترین روش کاهش نشت، یافتن تعادل اقتصادی بین هزینه‌های ذخیره‌سازی آب و هزینه‌های کاهش نشت است و این امر با توجه به وضعیت شبکه‌ها و منابع موجود میسر خواهد شد.

هدف اصلی این پژوهش‌ها، بهبود مدیریت مصرف آب و کاهش هدررفت در راستای تعادل اقتصادی است. در این راستا، تحلیل و مدل‌سازی شبکه‌های توزیع آب، به‌ویژه در مناطق خشک، به‌عنوان ابزاری برای بهینه‌سازی مصرف و کاهش نشت استفاده می‌شود. در این زمینه، تحلیل اقتصادی نشت و کنترل فشار به‌خصوص در شهرهایی مانند بیرجند، به‌ویژه زون فشاری D که با کمبود منابع آبی و فرسودگی شبکه مواجه هستند، اهمیت زیادی دارد. این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار WaterGEMS شبکه توزیع آب بیرجند را مدل‌سازی کرده و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده، فرآیند کالیبراسیون انجام و درنهایت، ارزیابی میزان نشت و کاهش آن با استفاده از

آب یکی از منابع حیاتی و اساسی برای زندگی بشری است که نقش مهمی در توسعه پایدار، سلامت و رفاه جوامع ایفا می‌کند. با افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی، تقاضا برای آب شیرین در حال افزایش است و در کنار آن، تغییرات اقلیمی و کمبود منابع آبی، بحرآن‌های قابل‌توجهی را در مدیریت منابع آب ایجاد کرده است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در این زمینه، هدررفت آب در شبکه‌های توزیع است. هدررفت آب در کشورهای در حال توسعه به‌دلیل عواملی چون افزایش مهاجرت به مناطق شهری، مدیریت ضعیف زیرساخت‌ها، نشت آب و مصرف غیرمجاز به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است (Adedeji et al., 2017).

حجم سالانه هدررفت آب (WL)<sup>۱</sup> در سراسر جهان حدود ۱۲۶ میلیارد مترمکعب تخمین زده شده که سالانه حدود ۳۹ میلیارد دلار هزینه دارد (Liemberger and Wyatt, 2019). کاهش کامل هدررفت آب از نظر فنی و اقتصادی، غیرممکن است. بنابراین باید اجزای مختلف هدررفت آب به‌طور دقیق ارزیابی شده و برای کاهش آن‌ها اولویت‌بندی صورت گیرد. در مدیریت نشت، چهار عامل اساسی مدیریت فشار (PM)<sup>۲</sup>، سرعت و کیفیت تعمیرات، کنترل فعال نشت (ALC)<sup>۳</sup> و نوسازی لوله‌ها و تأسیسات شبکه مطرح می‌شود (Lambert, 2002).

نشت آب در شبکه‌های توزیع می‌تواند خسارات اقتصادی زیادی به‌ویژه در انتقال آب و هزینه‌های تعمیرات به‌همراه داشته باشد. در برخی شبکه‌ها، نشت ممکن است تا ۳۰٪ از کل آب استخراج‌شده را تشکیل دهد (Adedeji et al., 2017). در این راستا، کاهش نشت آب باید براساس تحلیل اقتصادی صورت‌گیرد تا تعادلی بین هزینه‌های نهایی آب ذخیره‌شده و هزینه‌های کاهش نشت برقرار شود (Farley and Trow, 2003). تحلیل اقتصادی نشت در شبکه‌های توزیع شامل ارزیابی هزینه‌های کنترل نشت، تصفیه و توزیع آب و توسعه منابع جدید آب است (مصلحی و همکاران، ۱۳۹۹).

یکی از مهم‌ترین اقدامات برای کاهش نشت، کنترل فشار شبکه است که می‌تواند با کاهش نشت و بهبود کارایی شبکه‌های توزیع همراه باشد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که تغییرات فشار می‌تواند موجب آسیب به شبکه و افزایش خرابی‌ها شود (Lambert, 2001). در کشورهای توسعه‌یافته مانند انگلستان و ژاپن، مدیریت پیشگیرانه فشار از اهمیت بالایی برخوردار است (Force and Thornton, 2003)؛ اما در کشورهای در حال توسعه این روش به‌دلیل عدم دقت در اندازه‌گیری فشار، کم‌تر استفاده

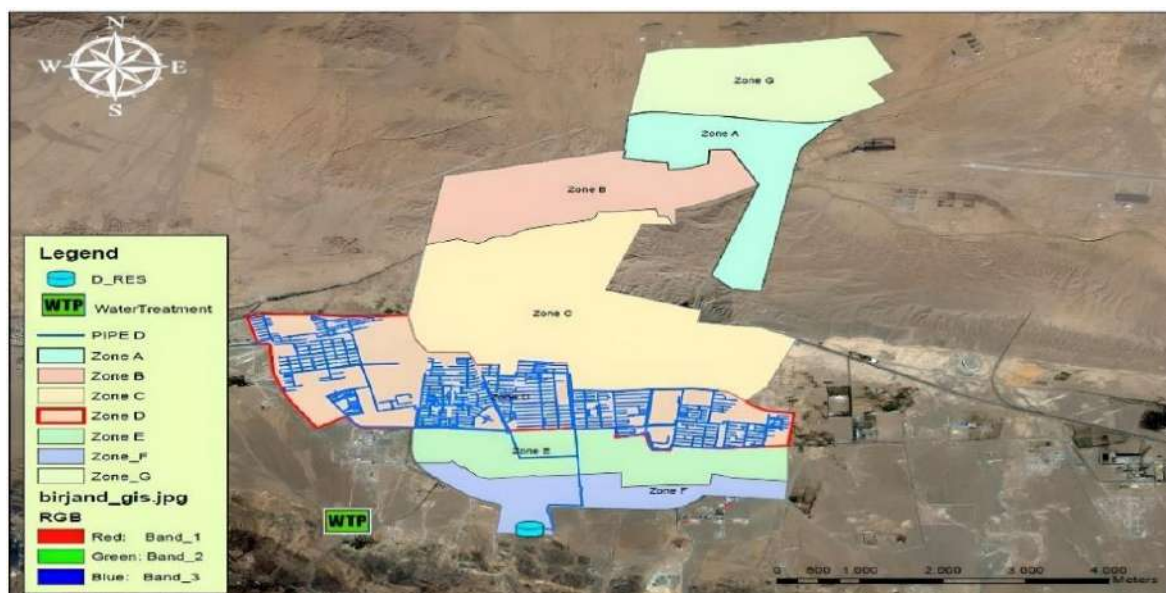
شاخص‌های فنی و اقتصادی در این منطقه بررسی شده است.

## ۲- مواد و روش

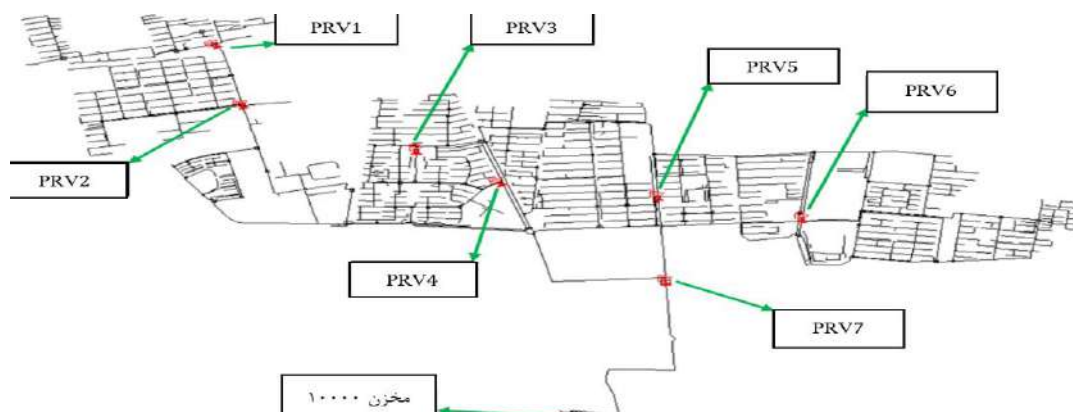
### ۲-۱- معرفی منطقه مورد پژوهش

شبکه توزیع آب شهر بیرجند دارای ۷ پهنه بهره‌برداری است. در حال حاضر آب مورد نیاز مردم از طریق ۷ مخزن که در بلندترین نقاط ارتفاعی هر پهنه قرار دارند، به صورت کاملاً ثقلی تأمین می‌شود. پهنه بهره‌برداری مورد مطالعه این پژوهش زون D شبکه توزیع آب شهر بیرجند مطابق شکل ۱ است. این زون دارای یک مخزن ۱۰۰۰۰ مترمکعبی در قسمت جنوبی شهر با رقوم ارتفاعی ۱۵۵۰ است که تأمین‌کننده فشار زون‌های فشاری جنوبی شهر بیرجند (D و E) به صورت مشترک و با خروجی‌های مجزا است. در شکل ۲ مشخصات کلی تأسیسات کنترل فشار زون مورد

پژوهش نشان داده شده است. در این پژوهش از داده‌های مصارف قرائت‌شده توسط قرائت‌کنندگان کنتور شرکت آب و فاضلاب خراسان جنوبی در دوره پنجم سال ۱۴۰۰ (آذر و دی ماه) استفاده شده است. به منظور جای‌گذاری اشتراک‌ها با نوع کاربری در محل واقعی خود با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS براساس موقعیت و میزان مصرف هر اشتراک انجام شده است که مصارف واقعی هر اشتراک به لوله نظیر آن اختصاص یافته تا نتایج مدل‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر باشد. در پهنه مورد پژوهش، حدود ۱۲۷۲۶۰ متر لوله موجود است که جنس تمامی لوله‌های به کار رفته در شبکه، آزیست (۴۶/۵٪ شبکه) و پلی‌اتیلن (۵۳/۵٪ شبکه) است. هم‌چنین با توجه به وسعت و رشد شهرسازی در سال‌های متفاوت در زون D، لوله‌های شبکه توزیع آب دارای سن متفاوتی هستند. سن لوله‌های پلی‌اتیلن در زون D از حدود سال ۱۳۷۵ آغاز و تا امروز نیز برای اصلاح و توسعه شبکه آب از آن‌ها استفاده می‌شود.



شکل ۱- پهنه‌بندی شبکه توزیع آب شهر بیرجند



شکل ۲- شماتیک محل قرارگیری شیرهای فشارشکن و مخزن موجود در پهنه D بیرجند

۲-۲- تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار (HDSM)<sup>۴</sup>

در شرایط بحرانی در شبکه‌های توزیع آب مثل شکست هیدرولیکی و مکانیکی سیستم و یا تقاضای بیش از حد که موجب ایجاد شرایطی فشاری متغیر می‌شود، فرض ثابت بودن مقدار برداشت از گره‌ها و برابری تقاضای گرهی پایدار نخواهد بود، درنتیجه برای مدل‌سازی واقعی عملکرد سیستم در شرایط بحرانی، لازم است رابطه میان فشار و خروجی گره‌ها در نظر گرفته شود. این نوع شبیه‌سازی که در آن رابطه میان دبی خروجی گره و فشار در نظر گرفته می‌شود، روش شبیه‌سازی مبتنی بر فشار نام دارد (تابش، ۱۳۹۵).

نگاه کلی در شبکه‌های توزیع آب باید به گونه‌ای باشد که با در نظر گرفتن جنبه‌های فنی و اقتصادی، فشار در محدوده پوشش شبکه به حداقل برسد؛ به طوری که فشار حداقل، با احتساب افت‌های ناشی از شبکه توزیع آب، لوله‌کشی داخل ساختمان و تغییرات سطح آب مخازن، در بالاترین نقطه برداشت (پشت‌بام) کمتر از ۰/۳ بار کاهش نیابد؛ از سوی دیگر، فشار حداقل شبکه توزیع آب برای ساختمان‌های یک طبقه در محل پشت کنتور برابر با ۱/۴ بار در نظر گرفته شده و برای هر طبقه اضافه، برای تأمین ارتفاع و جبران افت‌های لوله‌های داخلی، ۰/۴ بار به این عدد افزوده می‌شود (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۹۲). با توجه به این که ساختمان‌های منطقه مورد پژوهش، از نظر تعداد طبقات حداکثر ۴ طبقه هستند، حداقل فشار ۲/۶ بار در نظر گرفته شده و این مقدار به عنوان مدل واسنجی شده در مدل هیدرولیکی مبتنی بر فشار اعمال شده است. همچنین، براساس داده‌های ثبت شده توسط کنتور خروجی مخزن و بررسی صحت داده‌های سنجنده فشار به همراه استفاده از آخرین نقشه‌های به روز شده شبکه در پهنه فشاری مورد تحقیق، روز شنبه مورخ ۱۴۰۰/۰۹/۲۰ به عنوان روز مدل‌سازی انتخاب شده است.

## ۲-۳- مدل WaterGEMS

نرم‌افزار WaterGEMS به دلیل توانمندی‌های پیشرفته در مدل‌سازی هیدرولیکی و تحلیل شبکه‌های توزیع آب، به عنوان ابزار اصلی پژوهش انتخاب شده است. این نرم‌افزار با امکان شبیه‌سازی دقیق جریان، فشار، نشت و بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای کالیبراسیون داده‌ها و مدیریت فشار، دقت تحلیل را افزایش می‌دهد. از مهم‌ترین ویژگی‌های آن می‌توان به قابلیت مدل‌سازی مبتنی بر فشار اشاره کرد که در شرایط تغییرات فشار

و تأثیر آن بر میزان نشت، عملکرد تحلیل را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، یکپارچه‌سازی با GIS اجازه می‌دهد نقشه‌های دقیق شبکه توزیع آب وارد مدل شده و تحلیل‌های مکانی انجام شود. در این پژوهش، واسنجی مدل WaterGEMS از طریق کالیبراسیون با استفاده از داده‌های دبی‌سنجی و فشارسنجی انجام شده است. همچنین زون D کاملاً ایزوله بوده و تنها دارای یک ورودی آب به شبکه توزیع است که این ورودی مجهز به یک دستگاه دبی‌سنج مغناطیسی بر روی لوله خروجی مخزن به قطر ۶۰۰ میلی‌متر است و امکان قرائت میزان آب ورودی در زمان‌های مشخص (هر ۱۰ دقیقه) را فراهم می‌کند. داده‌های مربوط به فشارسنجی نیز در زون D براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط لاگرهای فشار آنالین شبکه توزیع و فشارهای ورودی دو شیر فشارشکن (PRV2 و PRV7) که از طریق سیستم تله‌متری ثبت می‌شوند، در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ نقاط مربوط به فشارسنجی و دبی‌سنجی نمایش داده شده‌اند.

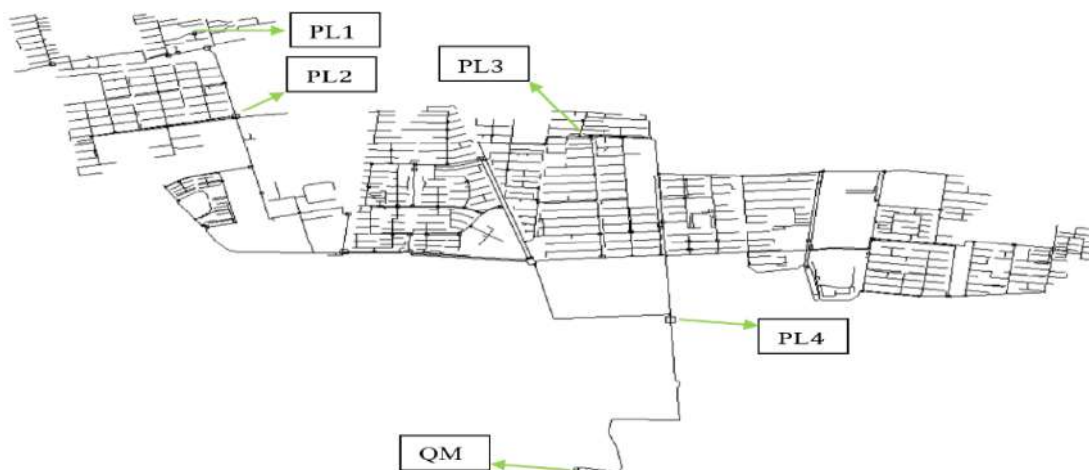
باتوجه به محیط نرم‌افزار، برای استفاده از الگوریتم ژنتیک در فرآیند بهینه‌یابی، از تابع حداقل مجموع مربعات خطاها، به منظور انجام عمل کالیبراسیون در نرم‌افزار استفاده شده که این تابع به صورت رابطه (۱) است.

$$Z = \frac{\sum_{np=1}^{NP} W_{np} \left( \frac{H_{s,np} - H_{o,np}}{H_{o,np}} \right)^2 + \sum_{nf=1}^{NF} W_{nf} \left( \frac{Q_{s,nf} - Q_{o,nf}}{Q_{o,nf}} \right)^2}{NP + NF} \quad (1)$$

که  $W_{np}$  و  $W_{nf}$ : ضریب وزنی برای پارامترهای دبی و فشار،  $H_{s,np}$  و  $H_{o,np}$ : هد هیدرولیکی شبیه‌سازی و میدانی برای گره  $np$  و  $Q_{s,nf}$  و  $Q_{o,nf}$ : دبی شبیه‌سازی و میدانی در لوله  $nf$  و  $NP$  و  $NF$ : به ترتیب تعداد فشارها و دبی‌های اندازه‌گیری میدانی در شبکه توزیع هستند. همچنین در نرم‌افزار برای ضرایب وزنی، الگوریتم خطی با توجه به مقدار صحت و اهمیت در مقادیر پارامترهای دبی و یا فشار مدنظر قرار گرفت. الگوریتم خطی به صورت رابطه‌های (۲) و (۳) در نرم‌افزار محاسبه می‌شود.

$$W_{np} = \frac{H_{o,np}}{\sum H_{o,np}} \quad (2)$$

$$W_{nf} = \frac{Q_{o,nf}}{\sum Q_{o,nf}} \quad (3)$$



شکل ۳- جانمایی نقاط اندازه‌گیری شده در محدوده مورد پژوهش (زون D)

## ۲-۴- شاخص‌های عملکرد شبکه‌های توزیع آب

برای ارزیابی و مقایسه عملکرد شبکه‌های توزیع آب با یکدیگر و برای تعیین یک هدف اقتصادی به‌منظور سرمایه‌گذاری در زمینه کاهش نشت از شاخص‌های عملکرد استفاده می‌شود (Lambert et al., 1999). شاخص نشت زیرساخت (ILI) یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین شاخص عملکرد شبکه‌های توزیع آب است که در آن ارزیابی کاملی از وضعیت شبکه توزیع آب را نشان می‌دهد. شاخص عملکرد زیرساخت براساس روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شود (Cavazzini et al., 2020):

$$NRW = \frac{SIV - BW}{SIV} \times 100 \quad (4)$$

که  $NRW$ ؛ آب بدون درآمد  $(SIV)$ ، حجم ورودی سیستم و  $BW$ ؛ مصرف مشترکین مجاز دارای قبض است.

$$ILI = \frac{CARL}{UARL} \quad (5)$$

که  $ILI$ : کیفیت مدیریت نشت را توصیف می‌کند که در آن  $CARL$ ؛ نشت موجود سالانه و  $UARL$ ؛ نشت سالانه اجتناب‌ناپذیر است. میزان نشت موجود سالانه براساس رابطه نشت و فشار محاسبه می‌شود. همچنین نشت سالانه اجتناب‌ناپذیر براساس رابطه (۶) به‌دست می‌آید.

$$UARL = (18 \times L_m + 0.80 \times N_c + 25 \times L_p) \times p \quad (6)$$

که  $UARL$ : نشت سالانه اجتناب‌ناپذیر برحسب لیتر بر روز،  $L_m$ : طول خطوط اصلی برحسب کیلومتر،  $N_c$ : تعداد مشترکین،  $L_p$ : طول لوله موجود از مرز انشعاب تا کنتور مشترک برحسب کیلومتر و  $p$ : فشار متوسط شبکه توزیع آب برحسب متر است. با محاسبه  $ILI$  می‌توان به این نتیجه رسید که یک شرکت تأمین‌کننده آب تا چه اندازه به‌طور مؤثر و کارآمد سطح نشت را کنترل می‌کند. میزان  $ILI$  نزدیک به ۱، نشان‌دهنده مدیریت و نگهداری خوب شبکه توزیع آب است و مقادیر غیر از ۱، براساس جدول ۱ تعریف می‌شود (AWWA, 2016).

جدول ۱- مقادیر هدف‌گذاری شاخص نشت زیرساخت (ILI) (AWWA, 2016)

| بازه ILI    | ملاحظات منابع آب                                                                                                                                                                                                  | ملاحظات اجرایی                                                                                 | ملاحظات مالی                                         |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| ۱-۳         | منابع آب موجود بسیار محدود و توسعه آن بسیار سخت و از لحاظ محیط‌زیستی ناپایدار است.                                                                                                                                | نیاز توسعه زیرساخت‌های موجود و منابع آب اضافی برای تأمین تقاضا نیاز دارد.                      | خرید یا توسعه منابع آب هزینه‌بر و گران است.          |
| ۳-۵         | منابع آب برای تأمین نیازهای بلندمدت کافی است، اما اقدامات مربوط به مدیریت تقاضا شامل مدیریت نشت نیاز است.                                                                                                         | توانایی زیرساخت‌های موجود برای تقاضای بلندمدت تأمین آب کافی، به‌شرط آن‌که مدیریت نشت اجرا شود. | خرید یا توسعه منابع آب با یک هزینه معقول امکان دارد. |
| ۵-۸         | منابع آب فراوان، قابل‌اعتماد و به‌راحتی قابل‌استخراج هستند.                                                                                                                                                       | ظرفیت بالای زیرساخت‌های تأمین آب، آن‌ها را در مقابل تأمین کمبودها تقریباً مصون می‌سازد.        | هزینه خرید یا تصفیه آب پایین است.                    |
| بیش‌تر از ۸ | هنگامی که ملاحظات مالی و اجرایی سبب شوند $ILI$ در بلندمدت بیش از ۸ شود، چنین سطحی از نشت برای مصرف آب مؤثر نیست و هدف‌گذاری نشت در این حالت به غیر از حالتی که منجر به سطح نشت کمتر در درازمدت شود، بی‌تأثیر است. |                                                                                                |                                                      |
| کم‌تر از ۱  | دستیابی $ILI$ کمتر از ۱ برای اکثر شبکه‌های توزیع آب غیرممکن است و اگر حاصل شود، کنترل سطح نشت به‌خوبی صورت گرفته است.                                                                                             |                                                                                                |                                                      |

## ۲-۵- رابطه نشت - فشار

برای برآورد میزان نشت در شبکه‌های توزیع آب توسط مدل‌های هیدرولیکی، لازم است رابطه میزان نشت و فشار در هر گره یا لوله مشخص شود. در این زمینه تحقیقات بسیاری صورت گرفته است که معادلات پیچیده‌ای براساس سن و قطر لوله‌ها و حتی تغییر شکل موقتی در اثر شکست در لوله‌ها به وجود آمده است. به این منظور با توجه به محدودیت داده‌های موجود در محدوده مورد پژوهش، از رابطه (۷) برای محاسبه نشت در لوله‌ها استفاده شد که در این رابطه فرض شده است نشت در طول لوله‌ها به‌طور یکنواخت توزیع می‌شود (Germanopoulos, 1985).

$$Q_{L,ij} = C_L \times L_{ij} \times (P_{ij}^{av})^{1.18} \quad (7)$$

که  $Q_{L,ij}$ : دبی خروجی از محل نشت از هر لوله بر حسب لیتر بر ثانیه،  $C_L$ : ضریب ثابت نشت که به خصوصیات شبکه توزیع آب بستگی دارد و برای هر شبکه توزیع مقدار ثابتی است. این ضریب رابطه مستقیم با جنس و عمر لوله‌های شبکه توزیع دارد که به وسیله آزمایش‌های میدانی به دست می‌آید و  $P_{ij}^{av}$ : فشار متوسط در طول لوله است که از رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$P_{ij}^{av} = \frac{P_i + P_j}{2} \quad (8)$$

که  $P_i$  و  $P_j$ : به ترتیب مقدار فشار آب در ابتدا و انتهای لوله بر حسب متر است.

## ۲-۶- شاخص اقتصادی نسبت هزینه - سود (BCR)<sup>۱۱</sup>

انتخاب و اولویت‌بندی پروژه‌ها با شاخص‌های مالی و اقتصادی انجام می‌شوند. یکی از این شاخص‌ها، شاخص نسبت منافع به مخارج یا سود به هزینه است. این شاخص علاوه بر بررسی اقتصادی طرح‌های سرمایه‌گذاری خصوصی، یک روش کاربردی و

معروف در ارزیابی طرح‌های دولتی به علت عام‌المنفعه بودن این طرح‌ها است. اگر طرحی دارای BCR بیش‌تر از ۱ باشد، انتظار می‌رود که طرح، ارزش فعلی خالص مثبتی را به شرکت و سرمایه‌گذاران آن ارائه دهد و اگر BCR طرح کم‌تر از ۱ باشد، هزینه‌های طرح بیش‌تر از مزایای آن است و نباید آن را در نظر گرفت. شاخص BCR به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود (منصورخاکی و همکاران، ۱۳۹۶).

$$BCR = \frac{\sum_{n=0}^N \frac{B_n}{(1+r)^n}}{\sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1+r)^n}} \quad (9)$$

که  $B_n$  و  $C_n$ : هزینه و منافع حاصل از طرح در زمان  $n$ : برابر نرخ بهره که در این پژوهش براساس گزارش بانک مرکزی جمهوری اسلامی در سال ۱۴۰۰ مقدار ۲۰٪ در نظر گرفته شده است،  $n$ : تعداد سال و  $N$ : سال مورد نظر است. در این روش برای محاسبه هزینه‌های سرمایه‌گذاری و سود، از قیمت هر مترمکعب آب در محدوده مورد پژوهش که برابر ۱۷۰۰۰ ریال است و همچنین صورت‌های مالی شرکت و فهرست‌بهای توزیع و نگهداری سال ۱۴۰۰ استفاده شده است. سپس با فرض ثابت بودن مقدار نرخ بهره به مدت ۲۰ سال، تا سال ۱۴۲۰ برای تمامی سناریوهای شاخص BCR محاسبه شده است.

## ۲-۷- سناریوهای کاهش نشت

براساس هدف مهم این پژوهش که مبحث کاهش نشت آب با اعمال تعدیل فشار در شبکه‌های توزیع بوده است و همچنین وجود محدودیت‌هایی از قبیل استفاده حداکثری از تأسیسات و لوله‌های موجود، پس از اجرای سناریوهای مختلف، در نهایت سناریوهای جدول ۲ که قابلیت اجرا در شبکه توزیع منطقه مورد پژوهش را دارا بود، در نظر گرفته شده است:

جدول ۲- سناریوهای در نظر گرفته شده برای تعدیل فشار در محدوده مطالعاتی

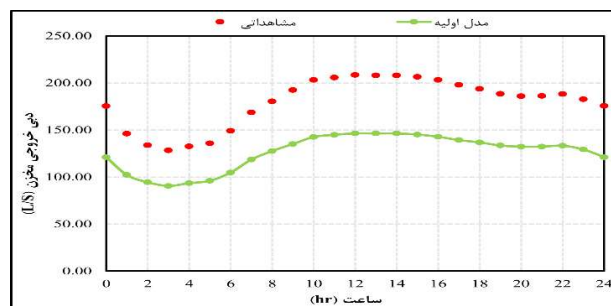
| سناریو | هدف                                                           | شرح                                                  |
|--------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| S1     | کالیبره کردن وضع موجود                                        | بررسی وضع موجود از نظر میزان فشار و نشت آب           |
| S2     | اصلاح فشار تنظیمی خروج شیرهای فشار شکن تک‌زمانه               | هوشمند کردن شیرهای فشار شکن موجود تک‌زمانه           |
| S3     | جابه‌جایی شیر فشار شکن PRV5                                   | شیرهای فشار شکن موجود طبق حالت سناریوی S1 و تک‌زمانه |
| S4     | جابه‌جایی شیر فشار شکن PRV5 و اضافه کردن یک شیر فشار شکن جدید | شیر فشار شکن جدید از نوع تک‌زمانه                    |
| S5     | اضافه کردن دو شیر فشار شکن جدید زمانه و حذف شیر فشار شکن PRV6 | شیرهای فشار شکن جدید از نوع تک‌زمانه                 |

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- بررسی وضع موجود شبکه توزیع آب زون D

در شکل ۴، خروجی مخزن براساس داده‌های اندازه‌گیری شده و مدل اولیه ساخته شده بدون در نظر گرفتن هدررفت در محدوده مورد پژوهش نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف بین میزان دبی شبیه‌سازی شده و دبی اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده وجود عواملی چون نشتی‌های شبکه توزیع، عدم کالیبراسیون دبی‌ها و ضرایب زبری لوله‌ها است. پس از تنظیم پارامترهای نشتی و دبی، کالیبراسیون ضرایب زبری در لوله‌ها براساس قطر و جنس انجام شده است.

در شکل ۵، کالیبره دبی شبیه‌سازی شده خروجی مخزن (شکل ۵-الف) و کالیبره فشار در فشارسنج‌های آنالین PL1 و PL3 (شکل‌های ۵-ب و ۵-ج)، به نمایش گذاشته شده است. در شکل ۵-الف، تقریباً داده‌های میدانی و مدل‌سازی شده خروجی مخزن هم‌پوشانی دارند که نشان‌دهنده کالیبره دقیق مدل برای دبی خروجی مخزن در محدوده مورد پژوهش است. در شکل‌های ۵-ب و ۵-ج نیز مشاهده می‌شود که داده‌های میدانی و مدل‌سازی شده فشار در فشارسنج‌های PL1 و PL3 در طول روز تا حدی هم‌پوشانی دارند، به جز در ساعات حداقل و حداکثر مصرف، که این امر احتمال وقوع رویدادهایی مانند بسته یا باز شدن یک شیر قطع و وصل در اطراف این فشارسنج‌ها برای کنترل دبی و فشار را نشان می‌دهد.



شکل ۴- جریان خروجی از مخزن برای مقادیر مشاهده‌ای و مدل اولیه

در شکل ۶، فشار ورودی دو شیر فشارشکن PRV2 و PRV7 ارائه شده است. در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود که داده‌های میدانی و مدل‌سازی شده ورودی شیر فشارشکن هوشمند PRV2 تقریباً هم‌پوشانی دارند که نشان‌دهنده کالیبره دقیق و بسیار بالای مدل برای این شیر هوشمند در محدوده مورد پژوهش است. در شکل ۶-ب نیز داده‌های میدانی و مدل‌سازی شده ورودی شیر فشارشکن

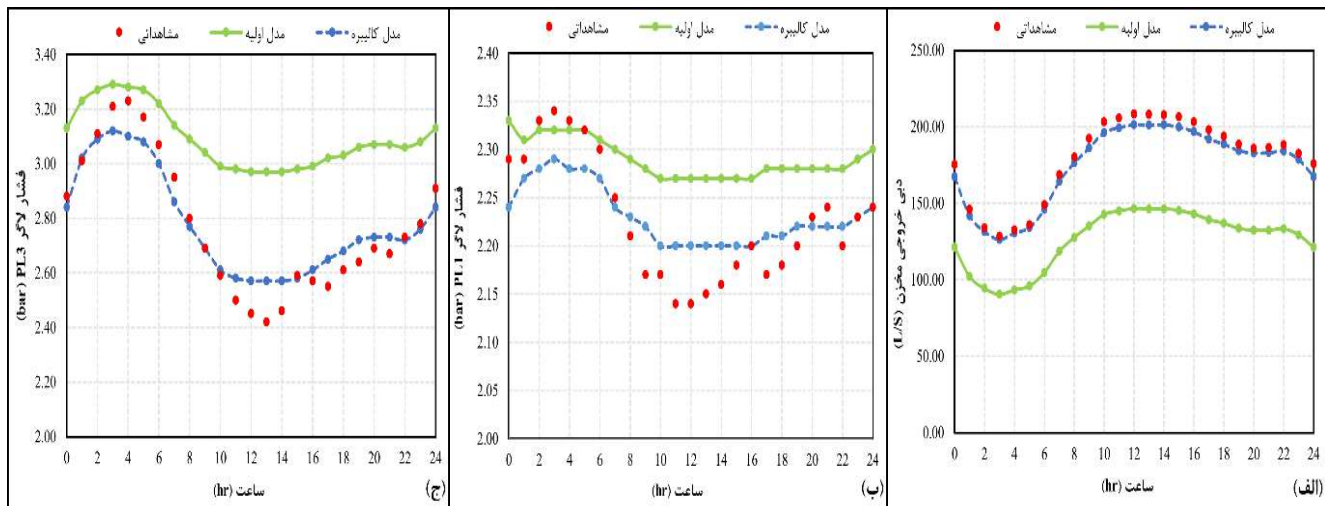
هوشمند PRV7 به جز در ساعات حداقل مصرف، هم‌پوشانی دارند که علت آن می‌تواند تغییرات ناگهانی سطح مخزن یا اتفاقی در خط انتقال از خروجی مخزن تا ورودی این شیر باشد.

## ۳-۲- تغییرات فشار شبکه در سناریوهای مورد بررسی

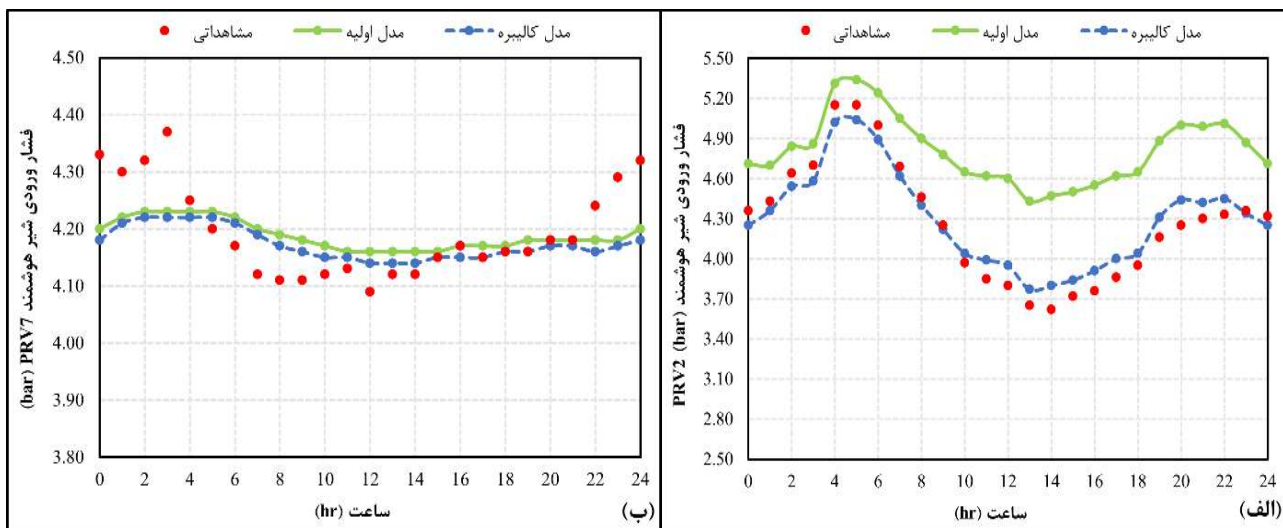
سناریوی S1 دارای خصوصیات فعلی شبکه توزیع زون D بوده و بیش‌ترین شباهت را به وضعیت موجود دارد. به‌عنوان سناریوی مرجع، در زمان حداقل مصرف،  $53/4\%$  از گره‌ها دارای فشار بیش از ۳ بار و از این مقدار  $17\%$  دارای فشار بیش از ۴ بار بوده‌اند که نشان‌دهنده فشار بیش از حد موجود و نقش آن در ایجاد نشت و حوادث در شبکه است.

براساس هدف پژوهش، در سناریوی S2 با هوشمندسازی شیرها، در زمان حداقل مصرف  $42/8\%$  از گره‌ها، دارای فشار بیش از ۳ بار و  $13/5\%$  دارای فشار بیش از ۴ بار بودند که بیانگر کاهش  $10/6\%$  درصدی گره‌های دارای فشار بیش از ۳ بار نسبت به S1 است. با استفاده حداکثری از تأسیسات موجود و بررسی تأثیر شیرهای فشارشکن، در سناریوی S3 پس از جابه‌جایی شیر PRV5 و تنظیم آن بر روی فشار ۳ بار، در زمان حداقل مصرف،  $34/6\%$  از گره‌ها دارای فشار بیش از ۳ بار و  $9/6\%$  دارای فشار بیش از ۴ بار شدند و در زمان حداکثر مصرف، دیگر فشار بالای ۵ بار مشاهده نشد. این موضوع نشان می‌دهد که موقعیت اولیه شیر PRV5 مناسب نبوده و با جابه‌جایی آن می‌توان تأثیر کاهش فشار را افزایش داد.

پس از بررسی حالت‌های مختلف جابه‌جایی شیر فشارشکن و همچنین پژوهش انجام‌شده توسط نصیریپور و همکاران (۱۳۹۷)، در سناریوی S4 با اضافه کردن شیر فشارشکن جدید از نوع تک‌زمانه با فشار تنظیمی ۲ بار و جابه‌جایی شیر PRV5، در زمان حداقل مصرف  $26/9\%$  از گره‌ها دارای فشار بیش از ۳ بار و تنها  $3/1\%$  دارای فشار بیش از ۴ بار شدند. همچنین در زمان مصرف حداکثر، دیگر فشار بالای  $4/5$  بار مشاهده نشد و  $68/4\%$  از گره‌ها بین فشار حداقل تعریف‌شده قرار گرفتند که نشان‌دهنده کنترل مناسب فشار در منطقه است. در نهایت، در سناریوی S5 با جابجایی دو شیر فشارشکن جدید از نوع تک‌زمانه با فشار تنظیمی ۳ و ۲ بار، در زمان حداقل مصرف،  $31\%$  از گره‌ها دارای فشار بیش از ۳ بار و  $3/1\%$  دارای فشار بیش از ۴ بار شدند. همچنین در زمان مصرف حداکثر، هم‌چنان فشار بالای  $4/5$  بار مشاهده نشد؛ ولی درصد گره‌های بین فشار حداقل تعریف‌شده به  $65\%$  کاهش یافت که نسبت به سناریوی S4 کاهش  $3/4\%$  درصدی دارد و نشان می‌دهد شیر PRV6 در شبکه توزیع مورد مطالعه تأثیرگذار نیست.



شکل ۵- مقایسه مقادیر مشاهداتی و مدل شده اولیه و کالیبره شده برای: الف) دبی خروجی از مخزن؛ ب) لاگر فشار PL1؛ و ج) لاگر فشار PL3



شکل ۶- مقایسه مقادیر مشاهداتی و مدل شده اولیه و کالیبره شده برای: الف) فشار ورودی به شیرهای هوشمند PRV2؛ و ب) PRV7

نشت کم‌تر نسبت به S4، از همان سال اول، سودده خواهد بود اما سود آن نسبت به سناریوی S4 کم‌تر است.

### ۳-۴- میزان شاخص عملکرد زیرساخت در محدوده مورد پژوهش

با توجه به توضیحات بیان شده و همچنین نتایج به دست آمده از کالیبره مدل، شاخص آب بدون درآمد برای محدوده مورد پژوهش به صورت زیر محاسبه شده است:

$$NRW = \frac{208.37 - 122.05}{208.37} \times 100 = 41.42\%$$

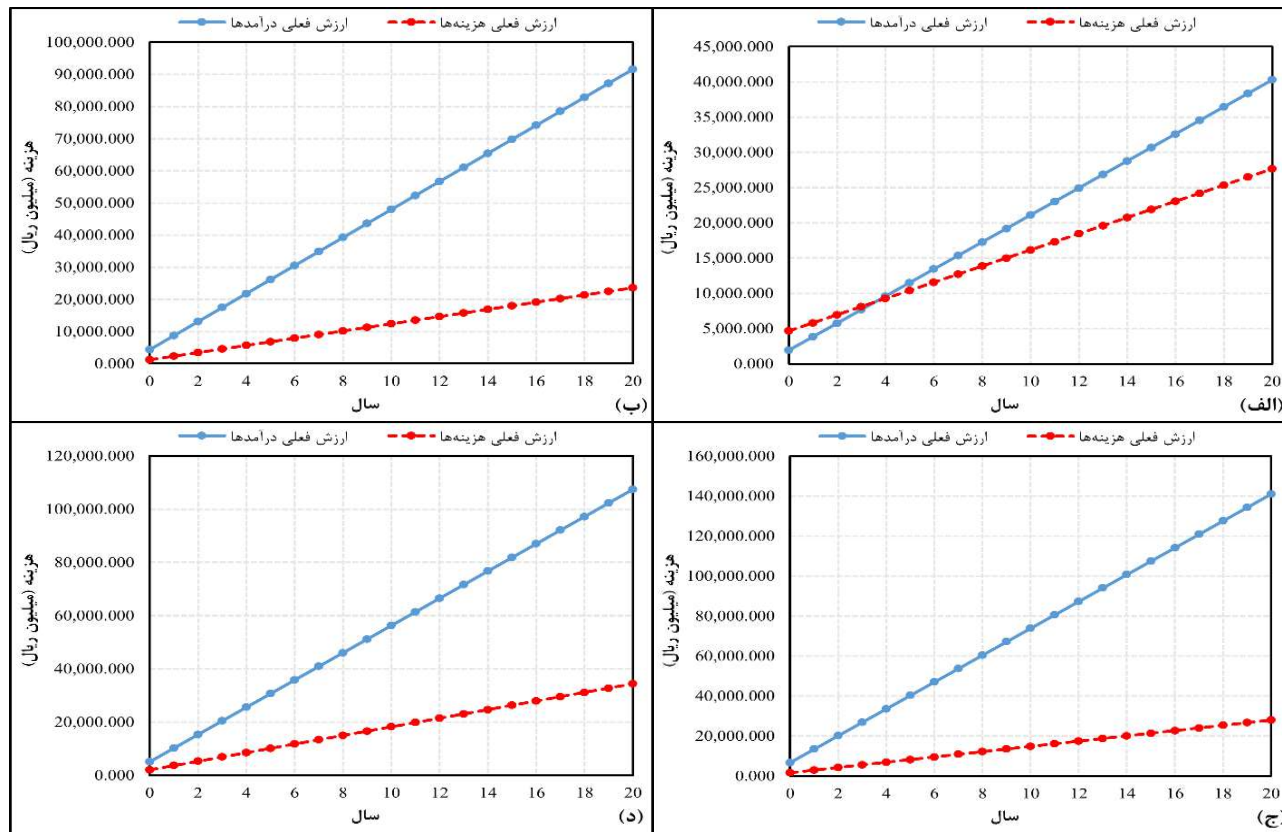
در این شاخص، مقدار ثبت شده از خروجی مخزن برابر ۲۰۸/۳۷ لیتر بر ثانیه و مقدار مصرف ثبت شده از مشترکین کل

### ۳-۳- بررسی اقتصادی کاهش نشت در سناریوها

با بررسی محاسبات، شکل ۷ نشان می‌دهد که در سناریوی S2 (شکل ۷-الف)، به دلیل هزینه‌های هوشمندسازی شیرهای فشارشکن در ایران، در ۴ سال اول، هیچ سودی حاصل نمی‌شود و از سال چهارم به بعد سودده خواهد بود. در سناریوی S3 (شکل ۷-ب)، که تنها شامل جابه‌جایی شیر PRV5 و اجرای حوضچه با هزینه ناچیز است، با توجه به کاهش نشت و سود ناشی از آن، از همان سال اول اجرا، سودده خواهد بود. در سناریوی S4 (شکل ۷-ج)، که شامل جابه‌جایی شیر PRV5 و نصب یک شیر جدید است، زمان و هزینه‌های اجرا و بهره‌برداری نسبت به سناریوهای قبلی بیش‌تر است؛ کاهش قابل توجه نشت باعث می‌شود که این سناریو نیز از همان سال اول، سودده باشد. نهایتاً در سناریوی S5 (شکل ۷-د)، که شامل نصب دو شیر جدید و حذف یک شیر است و زمان و هزینه‌های اجرای آن بسیار بالاتر است، با وجود کاهش

جمهوری، ۱۳۹۲). همچنین شاخص نشت زیرساخت با توجه به نتایج به دست آمده از سناریوها، به صورت جدول ۳ محاسبه شده است.

محدوده مورد مطالعه برابر ۱۲۲/۰۵ لیتر بر ثانیه است. این شاخص به خوبی نشان می‌دهد مقدار هدررفت آب در محدوده مورد مطالعه به مقدار زیادی بالاتر از مقدار توصیه شده و بهینه ۱۵٪ است (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست



شکل ۷- مقایسه شاخص اقتصادی BCR در تمامی سناریوها (به ترتیب از الف تا د مربوط به سناریوهای S1, S2, S3, S4 و S5)

### ۳-۵- جمع‌بندی سناریوها

با توجه به سناریوهای در نظر گرفته شده و نتایج به دست آمده از هر سناریو، خلاصه نتایج کلی در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. طبق جدول ۴، مدیریت هوشمند فشار و نزدیک شدن به فشار حداقل مورد نیاز، در محدوده مورد پژوهش منجر به کاهش نشت آب در شبکه توزیع می‌شود که این کاهش به وضوح در سناریوی S4 با توجه به انتخاب بهینه مکان شیر فشارشکن، نمایان شده است. همچنین این جدول نشان می‌دهد که افزودن شیرهای فشارشکن بیشتر، مانند سناریوی S5، لزوماً به بهبود متناسب شبکه منجر نمی‌شود.

جدول ۵ تأکید می‌کند که، هزینه سرمایه‌گذاری بالا در شبکه توزیع، همیشه موجب کاهش بیش‌تر نشت نمی‌شود و با انتخاب سناریوی مناسب می‌توان هزینه‌ها را کاهش داده و از نظر مالی به سود و کاهش نشت بیش‌تر و مدیریت بهینه اقتصادی فشار دست یافت.

### جدول ۳- مقایسه مقادیر شاخص نشت زیرساخت در تمامی

#### سناریوها

| سناریو         | ILI   | CARL (L/S) | UARL (L/S) |
|----------------|-------|------------|------------|
| S <sub>1</sub> | ۱۲/۰۰ | ۶۹/۷۱      | ۵/۸۱       |
| S <sub>2</sub> | ۱۱/۹۰ | ۶۶/۰۸      | ۵/۵۵       |
| S <sub>3</sub> | ۱۱/۶۸ | ۶۱/۴۶      | ۵/۲۶       |
| S <sub>4</sub> | ۱۱/۶۱ | ۵۷/۰۰      | ۴/۹۱       |
| S <sub>5</sub> | ۱۱/۶۷ | ۶۰/۰۳      | ۵/۱۴       |

با توجه به جدول ۳ و مقادیر به دست آمده شاخص ILI و جدول ۱، می‌توان دریافت که اوضاع شبکه توزیع آب زون D بیرجند از نظر نشت به شدت وخیم است و کاهش فشار در محدوده مورد پژوهش نتوانسته تغییر زیادی در شاخص ILI داشته باشد و طبق جدول ۱ بند ۴، باید در درازمدت اقدامات مدیریتی و اجرایی برای کنترل نشت این زون انجام گیرد.

از نظر مدت زمان اجرا، زمان بر است. در نهایت، پژوهش نشان داد که هرگونه مدیریت کوتاه مدت نشت طبق سناریوهای معرفی شده، می تواند به کاهش نسبی نشت در شبکه کمک کند، اما برای دستیابی به اثرگذاری کامل، نیاز به بررسی عوامل دیگر و استفاده از الگوریتم های نوین برای بهینه سازی روش های کاهش نشت آب از طریق مدیریت فشار، کنترل فعال نشت، تسریع در تعمیرات و ارائه راه کارهای هدفمند است. همچنین در بحث شاخص ها، شاخص مدیریت فشار (PMI)<sup>۱۲</sup>، به عنوان معیاری برای ارزیابی بهینه سازی فشار شبکه ها در کاهش نشت شناخته می شود. باین حال در این پژوهش، شاخص ILI به طور جامع عملکرد شبکه در مدیریت نشت را پوشش داده است. مطالعات آینده می توانند با تمرکز بر مدیریت فشار و محاسبه PMI، تحلیل های تکمیلی در این زمینه ارائه دهند.

#### ۵- پی نوشت ها

- 1- Water Losses
- 2- Pressure Management
- 3- Active Leakage Control
- 4- Head Driven Simulation Method
- 5- Infrastructure Leakage Index
- 6- Non Revenue Water
- 7- System Input Volume
- 8- Billed Water
- 9- Current Annual Real Losses
- 10- Unavoidable Annual Real Losses
- 11- Benefit Cost Ratio
- 12- Pressure Management Index

#### ۶- مراجع

- اسدیانی یکتا، ا. و تابش، م.، (۱۳۸۹)، "یک مدل تلفیقی جامع برای محاسبه و مدیریت نشت در شبکه های توزیع آب شهری"، نشریه دانشکده فنی، ۴۴(۱)، ۱-۱۲، [https://doi.org/journal.ut.ac.ir/article\\_20758.html](https://doi.org/journal.ut.ac.ir/article_20758.html).
- تابش، م.، (۱۳۹۵)، مدل سازی پیشرفته شبکه های توزیع آب، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- صدرالساداتی، ع. و قدیانی، م.، (۱۳۸۸)، "کالیبراسیون مدل شبکه های توزیع آب شهری (با مطالعه موردی شبکه توزیع آب شهر یزد)"، سومین همایش ملی آب و فاضلاب با رویکرد اصلاح الگوی مصرف، تهران.
- <https://doi.org/civilica.com/doc/78329>.
- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، (۱۳۹۲)، ضوابط طراحی سامانه های انتقال و توزیع آب شهری و

جدول ۴- مقادیر نشت حداکثر و متوسط روزانه در تمامی سناریوها

| سناریو         | نشت حداکثر (L/S) | کاهش نشت (L/S) | متوسط نشت روزانه (L/S) | حجم روزانه کاهش نشت (m <sup>3</sup> ) |
|----------------|------------------|----------------|------------------------|---------------------------------------|
| S <sub>1</sub> | ۷۴/۴۹            | -              | ۶۹/۷۱                  | -                                     |
| S <sub>2</sub> | ۶۸/۷۰            | ۵/۷۹           | ۶۶/۰۸                  | ۵۰۰/۲۵۶                               |
| S <sub>3</sub> | ۶۴/۶۳            | ۹/۸۶           | ۶۱/۴۶                  | ۸۵۱/۹۰۴                               |
| S <sub>4</sub> | ۵۹/۵۹            | ۱۴/۹۰          | ۵۷/۰۰                  | ۱۲۸۷/۳۶۰                              |
| S <sub>5</sub> | ۶۲/۳۵            | ۱۲/۱۴          | ۶۰/۰۳                  | ۱۰۷۱/۳۶۰                              |

جدول ۵- مقادیر مجموع شاخص اقتصادی BCR در تمامی سناریوها

در طی ۲۰ سال

| سناریو         | B (میلیون ریال) | C (میلیون ریال) | B/C   |
|----------------|-----------------|-----------------|-------|
| S <sub>2</sub> | ۴۲۲۸۹۹          | ۳۳۸۹۴۷          | ۱/۲۴۷ |
| S <sub>3</sub> | ۱۰۰۷۴۵۵         | ۲۶۰۴۴۲          | ۳/۸۶۸ |
| S <sub>4</sub> | ۱۵۵۱۶۱۳         | ۳۱۰۲۶۴          | ۵/۰۰۰ |
| S <sub>5</sub> | ۱۱۸۱۸۷۹         | ۳۸۲۵۵۶          | ۳/۰۸۹ |

#### ۴- نتیجه گیری

باتوجه به اهمیت موضوع نشت در شبکه های توزیع آب در سطح دنیا و ضرورت کنترل و مدیریت آن، این پژوهش بر روی پهنه فشاری D شهر بیرجند با استفاده از مدل سازی مبتنی بر فشار واقعی شبکه، پنج سناریوی اجرایی را برای کاهش نشت، مورد آزمایش قرار داد. نتایج به دست آمده از شاخص های زیرساخت شبکه نشان می دهد که وضعیت نشت در شبکه، وخیم بوده و نیاز فوری به اجرای اقدامات بلندمدت دارد؛ به طوری که در سناریوی S<sub>4</sub>، کاهش شاخص نشت زیرساخت به میزان حدود ۰/۴۰ نسبت به وضعیت موجود، اثربخشی این سناریو را به خوبی نشان می دهد. همچنین، نتایج نشان می دهد که در شبکه توزیع موجود، ۵۳/۴٪ از گره ها در زمان حداقل مصرف دارای فشار بیش از ۲/۶ بار هستند که بیانگر مدیریت نادرست فشار و افزایش نشت است. در سناریوی S<sub>4</sub> این مقدار به ۲۶/۹٪ کاهش یافته است. علاوه بر این، جابه جایی شیر PRV5 و اضافه کردن یک شیر فشار شکن جدید، به دلیل کاهش فشار شبکه و نزدیک شدن به فشار حداقل، به عنوان کاراترین سناریو (S<sub>4</sub>) شناخته شده است. در این سناریو با سرمایه گذاری ۲۷۹/۳ میلیون ریال، سود حاصل از کاهش نشت آب به ۱/۲۴۱ میلیارد ریال و اثربخشی معادل ۱۴/۹۰ لیتر بر ثانیه در ساعت حداقل مصرف و همچنین کاهش حجم نشتی به میزان ۱۲۸۷/۳۶۰ مترمکعب در طول روز به دست آمده است؛ اگرچه

- <https://doi.org/10.2166/aqua.1999.0025>.
- Lambert, A., (2001), "What do we know about pressure leakage relationships in distribution systems", *Systems Approach to Leakage Control and Water Distribution System Management*, An IWA Conference, Brno, Czech Republic, 16-18 May.
- Lambert, A.O., (2002), "International report: water losses management and techniques", *Water Science and Technology: Water Supply*, 2(4), 1-20, <https://doi.org/10.2166/ws.2002.0115>.
- Liemberger, R., and Wyatt, A., (2019), "Quantifying the global non-revenue water problem", *Water Supply*, 19(3), 831-837, <https://doi.org/10.2166/ws.2018.129>.
- McKenzie, R., and Wegelin, W., (2009), "Implementation of pressure management in municipal water supply systems", *Proceedings of the EYDAP Conference "Water: The Day After"*, Athens, Greece, 20.
- Molinos-Senante, M., Villegas, A., and Maziotis, A., (2021), "Measuring the marginal costs of reducing water leakage: the case of water and sewerage utilities in Chile", *Environmental Science and Pollution Research*, 28(25), 32733-32743, <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13048-9>.
- Moslehi, I., Jalili-Ghazizadeh, M., and Yousefi-Khoshqalb, E., (2021), "Developing a framework for leakage target setting in water distribution networks from an economic perspective", *Structure and Infrastructure Engineering*, 17(6), 821-837, <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1777568>.
- روستایی، نشریه شماره ۳-۱۱۷، بازنگری اول، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست‌جمهوری و دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا، وزارت نیرو، تهران.
- منصورخاکی، ع.، موسوی، س.، و رضایی ارجودی، ع.، (۱۳۹۶)، "محاسبه کاهش هزینه‌های عملکردی در ارزیابی اقتصادی بهسازی راه‌ها (مطالعه موردی: راه اصلی فسا-زاهدشهر)"، نشریه مهندسی عمران/امیرکبیر، ۴۹(۱)، ۱۶۵-۱۷۳، <https://doi.org/10.22060/ceej.2016.573>.
- نصیرپور، ح.، نصیریان، ع.، و اکبرپور، الف.، (۱۳۹۸)، "تعیین موقعیت بهینه شیرهای فشارشکن در شبکه توزیع آب (مطالعه موردی: شبکه توزیع آب شهر بیرجند)"، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب/ایران، ۱۰(۱)، ۱۷-۳۳.
- Adedeji, K.B., Hamam, Y., Abe, B.T., and Abu-Mahfouz, A.M., (2017), "Towards achieving a reliable leakage detection and localization algorithm for application in water piping networks: An overview", *IEEE Access*, 5, 20272-20285, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2752802>.
- American Water Work Association (AWWA), (2016), *Water audits and loss control programs: AWWA manual M-36*, Denver, 423 p.
- Cavazzini, G., Pavesi, G., and Ardizzon, G., (2020), "Optimal assets management of a water distribution network for leakage minimization based on an innovative index", *Sustainable Cities and Society*, 54, 101890, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101890>.
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Di Mauro, A., Santonastaso, G.F., Palomba, A., and Locorotolo, S., (2018), "Calibration of a water distribution network with limited field measures: The case study of Castellammare di Stabia (Naples, Italy)", *International Conference on Learning and Intelligent Optimization*, 433-436, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05348-2\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05348-2_36).
- Farley, M., and Trow, S., (2003), *Losses in water distribution networks*, IWA publishing, London.
- Force, I.W.L.T., and Thornton, J., (2003), "Managing leakage by managing pressure: A practical approach", *Water* 21, October.
- Germanopoulos, G., (1985), "A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models", *Civil Engineering Systems*, 2(3), 171-179, <https://doi.org/10.1080/02630258508970401>.
- Islam, M.S., and Babel, M.S., (2013), "Economic analysis of leakage in the Bangkok water distribution system", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(2), 209-216, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000235](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000235).
- Lambert, A.O., Brown, T.G., Takizawa, M., and Weimer, D., (1999), "A review of performance indicators for real losses from water supply systems", *Journal of Water Supply: Research and Technology AQUA*, 48(6), 227-237.



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

از علاقه‌مندان به حوزه‌های مرتبط با علوم و صنعت آب و فاضلاب دعوت می‌شود تا برای شروع فرآیند عضویت خود در انجمن آب و فاضلاب ایران، از طریق لینک <http://irwwa.ir>، به سایت انجمن مراجعه و با ایجاد حساب کاربری در سایت، اقدام به دریافت نام کاربری و رمز ورود اقدام کنند. سپس وارد حساب کاربری خود شده و پنجره عضویت را از نوار بالای صفحه انتخاب نموده و ضمن تکمیل فرم عضویت حقیقی، مدارک درخواستی را بارگزاری نمایند. مراحل پرداخت حق عضویت و اعطای شماره عضویت پس از ارسال ایمیل تأییدیه از سوی انجمن، شروع خواهد شد.

#### هزینه چاپ آگهی در نشریات انجمن

| نوع                            | مبلغ (ریال) |
|--------------------------------|-------------|
| ۱ صفحه در یک شماره             | ۲۰۰۰۰۰۰     |
| ۲ صفحه در یک شماره             | ۴۰۰۰۰۰۰     |
| ۱ صفحه در چهار شماره<br>پیاپی* | ۹۰۰۰۰۰۰     |
| ۲ صفحه در چهار شماره<br>پیاپی* | ۱۲۰۰۰۰۰۰    |

\* شامل یک‌سال عضویت حقوقی انجمن

#### حق عضویت اعضای حقیقی

| نوع                                                        | مبلغ (ریال) |
|------------------------------------------------------------|-------------|
| حق عضویت با تاخیر سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۳<br>(به‌ازای هر سال) | ۱۲۰۰۰۰۰     |
| حق عضویت دو ساله (۱۴۰۴ - ۱۴۰۵)                             | ۳۵۰۰۰۰۰     |
| حق عضویت چهار ساله (۱۴۰۴ - ۱۴۰۷)                           | ۶۰۰۰۰۰۰     |
| حق عضویت دو ساله دانشجویی (۱۴۰۴ - ۱۴۰۵)                    | ۲۰۰۰۰۰۰     |
| عضویت دائمی                                                | ۲۰۰۰۰۰۰۰    |

شماره حساب: ۱۳۵۷۲۰۶۲۳

شماره شب: IR9301800000000000135720623

شماره کارت مجازی: ۵۸۵۹-۸۳۷۰-۰۹۹۰-۳۱۰۱

بانک تجارت شعبه دانشگاه (کد ۱۸۶) به‌نام انجمن آب و فاضلاب ایران

لطفاً اسکن فیش واریزی را به ایمیل واحد پذیرش انجمن ([membership@irwwa.ir](mailto:membership@irwwa.ir)) ارسال فرمایید.

#### جدول مزایای اعضای حقوقی طرح جدید

| سـطـح<br>عضـوـیـت<br>(مبلغ پرداختی)                                                                                                                             | برنزی<br>(سالانه ۱۰)<br>(میلیون تومان) | نقره‌ای<br>(سالانه ۱۵)<br>(میلیون تومان) | طلایی<br>(سالانه ۲۰)<br>(میلیون تومان) | الماسی<br>(سالانه ۲۵)<br>(میلیون تومان) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|
| مزایای عضویت                                                                                                                                                    |                                        |                                          |                                        |                                         |
| دریافت اعتبار یک‌ساله<br>(نحوه استفاده از اعتبار دریافتی، در ذیل جدول شرح داده شده است)                                                                         | سالانه ۵<br>میلیون تومان               | سالانه ۸<br>میلیون تومان                 | سالانه ۱۲<br>میلیون تومان              | سالانه ۱۵<br>میلیون تومان               |
| درج لوگوی شرکت در نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب و خبرنامه و سایت انجمن (با مشخص بودن سطح عضویت) در مدت زمان عضویت                                             | *                                      | *                                        | *                                      | *                                       |
| دریافت اشتراک یک ساله نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب به صورت رایگان (۴ شماره) در مدت زمان عضویت                                                                | *                                      | *                                        | *                                      | *                                       |
| درج رایگان آگهی نیم صفحه (با متن دلخواه) در یک شماره نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب در مدت زمان عضویت                                                          | *                                      | *                                        | *                                      | *                                       |
| ارائه ۵۰٪ تخفیف در اجاره غرفه نمایشگاهی هم‌زمان با همایش‌های سالانه انجمن در مدت زمان عضویت (در صورت داشتن اعتبار، مبلغ اجاره غرفه از اعتبار کسر خواهد شد)      | *                                      | *                                        | *                                      | *                                       |
| امکان انتقال ۵۰٪ از اعتبار باقیمانده به سال بعد (در صورت تمدید عضویت)                                                                                           | *                                      | *                                        | *                                      | *                                       |
| امکان برگزاری کارگاه و وبینار کاربردی (براساس پروژه ها و عملکرد محصولات و ...) مشترک با انجمن (پس از ارائه پروپوزال و انجام هماهنگی‌های لازم) در مدت زمان عضویت | *                                      | *                                        | *                                      | *                                       |
| دریافت گواهی عضویت دوزبانه                                                                                                                                      | *                                      | *                                        | *                                      | *                                       |
| دریافت پرچم رومیزی انجمن آب و فاضلاب ایران                                                                                                                      | *                                      | *                                        | *                                      | *                                       |

- اعضای محترم حقوقی / حامیان انجمن، می‌توانند از **اعتبار خود** در یک یا چند مورد از موارد زیر استفاده کنند:
- درج آگهی در نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب (تمام صفحه، معادل ۲ میلیون تومان اعتبار و نیم صفحه معادل ۱ میلیون تومان اعتبار)؛
  - استفاده از کارگاه‌ها و دوره‌های آموزشی (متناسب با هزینه کارگاه و تعداد شرکت‌کنندگان معرفی شده از سوی شرکت از اعتبار کسر می‌شود)؛
  - شرکت در همایش‌های انجمن (متناسب با هزینه شرکت در همایش و تعداد شرکت‌کنندگان معرفی شده از سوی شرکت از اعتبار کسر می‌شود)؛
  - امکان اجاره غرفه نمایشگاهی که هم‌زمان با همایش‌های انجمن برگزار می‌شوند (متناسب با متراژ غرفه از اعتبار کسر می‌شود)؛
  - صدور گواهی شرکت در وبینار (صدور هر گواهی برای شرکت‌کنندگان معرفی شده از سوی شرکت معادل ۵۰ هزار تومان اعتبار است)؛
- \* لازم به ذکر است که پس از اتمام اعتبار، اعضای محترم حقوقی کماکان می‌توانند مطابق با روال گذشته، از تخفیفات و مزایای عضویت به شرح زیر بهره‌مند شوند.

#### مزایای عضویت در انجمن آب و فاضلاب ایران

| عضو حقیقی | مزایای عضویت                              |
|-----------|-------------------------------------------|
| ٪۲۰       | تخفیف شرکت در همایش‌های انجمن             |
| ٪۲۰       | تخفیف شرکت در دوره‌های آموزشی انجمن       |
| ٪۲۰       | تخفیف شرکت در کارگاه‌ها و بازدیدهای انجمن |
| ٪۱۰       | تخفیف چاپ مقالات در مجلات انجمن           |

و در سایت اعلام کند.

#### ❖ فایل‌های لازم

نویسنده مسئول مقاله به‌هنگام ثبت مقاله، فایل‌های زیر را برای دفتر مجله از طریق سامانه ارسال می‌نماید:

- فایل word مقاله بدون نام نویسندگان، که شامل کلیه اجزا و محتویات مقاله است و شکل‌ها و جدول‌ها در جای خود جانمایی شده‌اند.

- فایل pdf مقاله بدون نام نویسندگان که شامل کلیه اجزا و محتویات مقاله است و شکل‌ها و جدول‌ها در جای خود جانمایی شده‌اند.

- فایل مشخصات نویسندگان.

- فایل حق چاپ (Copy Right): نامه‌ای است که نویسندگان با مضمون تعهد ارسال مقاله فقط برای مجله علوم و مهندسی آب و فاضلاب تهیه می‌کنند و با امضای کلیه مولفین با ترتیبی که قرار است چاپ شود، ارسال می‌نمایند (نمونه این نامه در زمان ثبت مقاله در قسمت نامه به سردبیر قابل رویت است).

- فایل تعارض منافع (Conflict of Interests): نامه‌ای است که نویسندگان با مضمون تعهد به رعایت کلیه اصول اخلاق نشر ارسال می‌نمایند (نمونه این نامه در زمان ثبت مقاله در قسمت نامه به سردبیر قابل رویت است).

#### ❖ نرم‌افزار حروف‌چینی: نرم‌افزار Microsoft Word 2013 یا بالاتر

❖ عنوان: کوتاه اما معرف محتوای مقاله است و از ۱۵ واژه تجاوز نمی‌کند.

#### ❖ نام نویسنده(گان):

به‌همان ترتیبی که در مقاله چاپ می‌شود، در یک فایل جداگانه به‌طور کامل آورده می‌شود. عناوین دانشگاهی نویسنده(گان) به‌ترتیب نویسنده: مرتبه علمی، گروه، دانشکده، دانشگاه، شهر، کشور نشان داده می‌شود. عناوین غیر دانشگاهی نیز به‌ترتیب عنوان آخرین مدرک دانشگاهی، سمت، محل کار، شهر و کشور نشان داده شود. ثبت اسامی تمامی نویسندگان به‌همراه پست الکترونیکی و اطلاعات تماس ایشان در سامانه الزامی است. با توجه به سیستم الکترونیک مجله برای پیشبرد وضعیت مقالات، مقاله مستقیماً برای داور ارسال می‌شود، لذا تاکید می‌شود که فایل‌های ارسالی به مجله فاقد نام نویسنده(گان) باشد. در غیر این‌صورت تا اصلاح شدن فایل، ارسال مقاله برای داوران متوقف می‌شود.

#### ❖ نام مؤسسه:

نام مؤسسه در بخش فارسی و انگلیسی منطبق بر نام مصوب و

نویسندگان محترم پس از آماده‌سازی مقاله مطابق راهنمای تدوین مقالات، از طریق ثبت‌نام در سامانه الکترونیک مجله علوم و مهندسی آب و فاضلاب به آدرس jwwse.ir می‌توانند وارد صفحه شخصی خود شده و با تکمیل بخش‌های مربوطه، مقاله خود را ارسال نمایند.

توجه به نکات زیر در ارسال مقاله ضروری است:

- ارسال مقاله منحصراً از طریق ثبت‌نام در سامانه الکترونیک مجله علوم و مهندسی آب و فاضلاب انجام می‌شود.

- نویسنده‌ای که برای بار چندم اقدام به ارسال مقاله می‌نماید، حتماً باید از طریق صفحه شخصی قبلی خود نسبت به ارسال مقاله اقدام نموده و به‌هیچ عنوان دوباره در سامانه ثبت نام نکند.

- وارد کردن اسامی و اطلاعات کامل تمامی نویسندگان در سامانه و در محل مربوط به مشخصات نویسندگان مقاله، الزامی است.

- نویسندگان در طی مراحل ارسال مقاله، در قسمت نامه به سردبیر، متعهد می‌شوند که مقاله صرفاً برای مجله علوم و مهندسی آب و فاضلاب تهیه شده و برای چاپ یا ارزیابی به مجله دیگری ارائه نشده است.

- نویسندگان در قسمت ارسال فایل‌ها با ارسال یک فایل word که به امضای همه نویسندگان رسیده است، حق چاپ مقاله را به مجله علوم و مهندسی آب و فاضلاب واگذار می‌نمایند. در غیر این‌صورت مقاله در روند داوری قرار نخواهد گرفت.

- فایل‌هایی که نویسنده در مرحله اولیه ارسال می‌کنند شامل فایل word مقاله بدون نام نویسندگان، فایل pdf بدون نام نویسندگان، فایل مشخصات کامل نویسندگان و فایل اصلی شکل‌ها در محیط نرم‌افزاری مربوطه است.

#### ❖ دستورالعمل نگارش و تنظیم مقالات:

مجله علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب به زبان فارسی و با چکیده انگلیسی چاپ می‌شود. تعداد صفحات مقاله کامل و نیز مروری حداکثر ۱۲ صفحه و یادداشت فنی بین ۴ تا ۶ صفحه قابل چاپ است. لازم به ذکر است که مقاله ارسالی نباید هم‌زمان در مجله دیگری چاپ شده یا تحت داوری باشد.

با توجه به آیین‌نامه جدید نشریات وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، از این پس امکان چاپ مقالات پژوهشی نیز وجود دارد و نوع هر مقاله در بالای آن درج خواهد شد.

#### ❖ انواع مقالات:

این نشریه مقالات مروری، پژوهشی، یادداشت فنی (ترویجی) و یادداشت کوتاه را به چاپ می‌رساند. بنابراین نویسنده محترم باید در هنگام ارسال مقاله، نوع مقاله را از بین چهار گروه فوق انتخاب

رایج مؤسسه است (نام رسمی مندرج در سربرگ رسمی مؤسسات، دانشگاه‌ها، سازمان‌ها و ...).

#### ❖ چکیده فارسی:

شامل مقدمه، مواد و روش‌ها (روش تحقیق)، نتایج و بحث و نتیجه‌گیری است. حداقل تعداد کلمات در چکیده ۱۵۰ و حداکثر ۲۵۰ کلمه باشد.

#### ❖ چکیده انگلیسی: باید دقیقاً معادل چکیده فارسی باشد.

#### ❖ واژه‌های کلیدی فارسی و انگلیسی:

باید یکسان و شامل حداقل چهار و حداکثر شش واژه مجزا باشد که موضوع تحقیق، بیشتر پیرامون آن‌ها است.

#### ❖ متن مقاله:

متن کامل مقاله در دو فایل جداگانه شامل یک فایل ورد با قلم نازک B Nazanin با اندازه ۱۲ برای زبان فارسی و قلم Times New Roman با اندازه ۱۰ برای زبان انگلیسی و با فاصله بین خطوط ۱/۵ سانتیمتر به صورت تک‌ستونی و یک فایل با فرمت pdf ارائه می‌شود. فایل word مقاله، یک مقاله کامل و شامل تمامی اجزای ضروری است و با جانمایی درست شکل‌ها و جدول‌ها ارائه می‌شود. در فایل pdf، مقاله به صورت کامل و با جانمایی درست شکل‌ها و جدول‌ها ارائه می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، در هر دو فایل word و pdf اسامی و مشخصات نویسندگان به طور کامل حذف می‌شوند.

متن مقاله شامل بخش‌های چکیده، مقدمه، مواد و روش‌ها (روش تحقیق)، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری و مراجع و همچنین شکل‌ها و جدول‌ها است. در صورت لزوم، بخش‌های در انتهای مقاله و قبل از بخش مراجع نوشته می‌شود. بخش‌های مختلف متن و همه صفحات و همین‌طور تمام سطرها به ترتیب شماره‌گذاری می‌شوند.

- معادل انگلیسی کلمات فارسی که نیاز به توضیح به زبان اصلی دارد، وقتی برای اولین بار در مقاله به کار می‌روند، به صورت پی‌نوشت در انتهای مقاله و قبل از فهرست مراجع درج می‌شوند. پی‌ها در هر صفحه با گذاردن شماره فارسی در گوشه بالای آخرین حرف از کلمه، در متن مشخص می‌شود.

#### ❖ جدول‌ها و شکل‌ها:

جدول‌ها و شکل‌ها در محل مناسب بعد از معرفی آن‌ها در متن مقاله در فایل word مقاله با کیفیت مناسب چاپ، ارائه می‌شوند. همه جدول‌ها و شکل‌ها شماره‌گذاری شده و عنوان جدول در بالای آن و عنوان شکل در زیر آن نوشته می‌شود. در عنوان جدول‌ها و نمودارها باید سه ویژگی «چه، کجا و کی» برای محتوای آن مشخص شود. مثلاً نوشته شود: نوسان‌های دبی آب خام در تصفیه خانه بابا شیخ علی شهر اصفهان در سال ۱۳۹۵. در ضمن اگر شکل یا جدولی از مرجع دیگری اخذ شده است، به

مرجع موردنظر در آخر عنوان جدول یا شکل اشاره می‌شود و مشخصات مأخذ در بخش مراجع درج می‌شود. همچنین ارسال فایل اصلی شکل‌ها در محیط نرم‌افزاری به همراه کاربرگ داده‌های نمودار نیز ضروری است. در فایل pdf مقاله، تمامی شکل‌ها و جدول‌ها در محل خودشان در متن مقاله جانمایی می‌شوند.

- در صورتی که در مقاله از عکس استفاده شده باشد، ارسال فایل اصلی آن الزامی است.

- در مورد نمودارهایی که با نرم‌افزارهای تخصصی تهیه شده‌اند، ارسال کاربرگ داده‌های رسم نمودار نیز ضروری است.

#### ❖ معادلات:

معادلات به صورت خوانا با حروف و علائم مناسب با استفاده از Microsoft Equation تهیه می‌شوند. واحدها برحسب واحد بین‌المللی (SI) و معادلات به ترتیب شماره‌گذاری می‌شوند. تمام پارامترهای هر معادله باید بلافاصله در زیر آن معرفی شوند.

#### ❖ مراجع:

**در داخل متن:** نگارش مراجع در این مجله براساس شیوه مرجع‌نویسی هاروارد است. در متن مقاله به منظور اشاره به مرجع به صورت (نویسنده، سال) عمل می‌شود. ارجاع در داخل متن به بیش از یک مرجع در کنار هم، به این صورت است که مراجع با نقطه ویرگول (؛) از هم جدا می‌شوند. فقط مراجعی که در متن مقاله به آن‌ها اشاره شده است، در بخش مراجع آورده می‌شوند. در متن مقاله نام نویسندگان مراجع فارسی (به صورت فارسی) و مراجع انگلیسی (به صورت انگلیسی) نوشته می‌شود. در صورتی که نویسندگان تا دو نفر باشند، نام هر دو نویسنده و در صورتی که بیش از دو نفر باشند، از عبارت (و همکاران) یا (et al.) در متن مقاله استفاده می‌شود.

**در فهرست مراجع:** نگارش مراجع در این مجله براساس شیوه مرجع‌نویسی هاروارد است. در انتهای مقاله مرجع‌نویسی به صورت الفبایی است. تاکید می‌شود که در بخش فهرست مراجع، نام مجله، انتشارات، موسسه، کنفرانس و غیره به صورت کامل درج می‌شود و از به کار بردن نام اختصاری آن‌ها (Abbreviation) خودداری شود.

**تذکر:** لازم است در انتهای اطلاعات هر مرجع در لیست مراجع، doi مقاله در صورت وجود درج شود.

در نگارش انواع مراجع از فرمت زیر استفاده شود:

#### • مقاله فارسی:

تابش، م.، بهبودیان، ص.، و بیگی، س.، (۱۳۹۳)، "پیش‌بینی بلندمدت تقاضای آب شرب (مطالعه موردی: شهر نیشابور)"، *تحقیقات منابع آب/ ایران*، ۱۰(۳)، ۱۴-۲۵.

عنبری، م.، (۱۳۹۲)، "تحلیل ریسک سیستم‌های فاضلاب با استفاده از شبکه‌های بیزین"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد

مهندسی عمران-آب، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

#### • مقاله غیر فارسی:

Tabesh, M., Roozbahani, A., Roghani, B., Rasi Faghihi, N., and Heydarzadeh, R., (2018), "Risk assessment of factors influencing Non-Revenue Water using Bayesian Networks and Fuzzy Logic", *Water Resources Management*, 31(9), 2561-2578, <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2011-8>.

#### • مقاله منتشر نشده:

Foladori, P., Tamburini, S. and Bruni, L., (2017), "Bacteria permeabilisation and disruption caused by sludge reduction technologies evaluated by flow cytometry", *Journal of Water Research*, in press.

#### • کتاب:

Briere, F.G., (2014), *Drinking-water distribution, sewage, and rainfall collection*, Presses Internationales Polytechnique, Paris.

#### • بخشی از کتاب:

Meltzer, P.S., Kallioniemi, A., and Trent, J.M., (2002), "Chromosome alterations in human solid tumors", In: B. Vogelstein and K.W. Kinzler (eds.), *The genetic basis of human cancer*, McGraw-Hill, New York, pp. 93-113.

#### • موسسه به جای نویسنده:

WHO, (2011), *Nitrate and nitrite in drinking-water-background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality*, World Health Organization, Geneva.

#### • مقالات کنفرانسی:

Murphy, L.J., Dandy, G.C. and Simpson, A.R., (1994), "Optimum design and operation of pumped water distribution systems", *Proceeding Conference on Hydraulics in Civil Engineering*, Institution of Engineers, Brisbane, Australia, pp. 149-155.

#### • پایان نامه:

de Schaetzen, W., (2000), "Optimal calibration and sampling design for hydraulic network models", Doctoral Dissertation, University of Exeter, Exeter, UK.

#### • سایت اینترنتی:

Burka, L.P., (2003), "A hypertext history of multiuser dimensions", Viewed 5 Dec. 2015, <http://www.ccs.neu.edu/>

### دستورالعمل استفاده از هوش مصنوعی و مدل‌های زبانی

#### در تهیه مقالات

#### مقدمه

در جهان امروز که هوش مصنوعی و مدل‌های زبانی به‌طور گسترده در دسترس پژوهشگران و متخصصان قرار گرفته‌اند، نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب با هدف راهنمایی و حمایت از پژوهشگران، دستورالعملی را برای استفاده صحیح و

مسئولانه از این فناوری‌ها تهیه کرده است. این دستورالعمل، یک راهنمای جامع و توصیه‌ای است که به نویسندگان کمک می‌کند تا از مزایای هوش مصنوعی در پژوهش‌های خود بهره ببرند، بدون این که به اصالت و کیفیت علمی مقاله‌ها آسیبی وارد شود. مفاد این دستورالعمل به شرح زیر است:

### ۱- استفاده از هوش مصنوعی به‌عنوان دستیار پژوهشی و

#### ابزار ویرایش

- پژوهشگران می‌توانند از مدل‌های هوش مصنوعی برای بهبود کیفیت زبانی و نگارشی مقاله استفاده کنند. از این فناوری‌ها می‌توان برای ویرایش و تصحیح متن، بهبود وضوح و روانی نوشتار و همچنین سازمان‌دهی بخش‌های مختلف مقاله بهره گرفت.
- به‌کارگیری هوش مصنوعی به‌عنوان یک ابزار کمک‌رسان در مراحل ابتدایی نگارش مقاله و ساختاربندی محتوا نیز مورد پذیرش است. این مورد شامل تنظیم متن به‌صورت حرفه‌ای و استفاده از ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی برای جستجوی سریع منابع و مفاهیم مرتبط با موضوع پژوهش است.

### ۲- پرهیز از استفاده از هوش مصنوعی در تولید داده‌ها و

#### نتایج پژوهشی

- تولید داده‌های پژوهشی و انجام تحلیل‌های اصیل و دقیق علمی باید به‌طور کامل توسط پژوهشگران و با استفاده از روش‌های علمی و قابل‌اعتماد صورت گیرد. استفاده از مدل‌های زبانی و هوش مصنوعی برای تولید داده‌های فرضی، شبیه‌سازی داده‌ها و یا تولید نتایج پژوهشی که به‌صورت مستقل قابل تأیید نیستند، غیر قابل قبول است و ممکن است موجب گمراهی علمی شود.
- استخراج نتایج و انجام تحلیل‌های نهایی پژوهشی نیز باید تنها با ابزارهای تحقیقاتی و روش‌های معتبر علمی انجام شود. استفاده از هوش مصنوعی برای نتیجه‌گیری یا تفسیر یافته‌های پژوهشی پذیرفته نیست، چرا که امکان دارد به نتایجی غیرقابل اتکا منجر شود.
- نویسندگانی که از ابزارهای هوش مصنوعی به‌منظور نوشتن چکیده، تولید تصاویر، شکل‌ها و یا در جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده می‌کنند، باید در افشای مواد و روش‌های به‌کار رفته در مقاله شفاف باشند. یعنی این که چگونه و از کدام یک از ابزارهای از هوش مصنوعی استفاده نموده‌اند.

## ۳- شفاف سازی در مورد استفاده از هوش مصنوعی

- در صورتی که از هوش مصنوعی در تهیه مقاله استفاده شده باشد، توصیه می شود نویسندگان در بخش «تقدیر و تشکر» یا در بخشی جداگانه مانند «استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی» به این موضوع اشاره کنند. این شفاف سازی به خوانندگان کمک می کند تا از جنبه هایی که هوش مصنوعی در تهیه مقاله کمک کرده است آگاه باشند و هم زمان اصول شفافیت علمی حفظ شود. به عنوان مثال، نویسندگان می توانند توضیح دهند که از هوش مصنوعی برای ویرایش زبانی، اصلاح نگارشی، یا ساختاربندی مقاله استفاده کرده اند و بخش هایی از مقاله که به واسطه ابزارهای هوش مصنوعی بهبود یافته است را به صورت مختصر معرفی کنند. این اقدام هم به پژوهشگران و هم به داوران اطمینان می دهد که تمامی داده ها و تحلیل های علمی به طور مستقل و توسط نویسندگان تهیه شده است.
- صحت، اعتبار و تناسب محتوا و هرگونه استناد ایجاد شده توسط هوش مصنوعی بررسی شود و هرگونه خطا یا تناقض اصلاح شود.

## ۴- استفاده از هوش مصنوعی در جستجوی منابع علمی

- از مدل های هوش مصنوعی می توان به عنوان یک ابزار کمک رسان در جستجوی منابع معتبر و علمی بهره برد. پژوهشگران مجازند از ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی برای یافتن مقالات و کتب مرتبط با موضوع پژوهش خود استفاده کنند به شرط آن که اصالت و اعتبار منابع انتخاب شده را به صورت دقیق بررسی نمایند.
- نویسندگان باید توجه داشته باشند که تنها از منابع معتبر علمی و پایگاه های داده ای قابل اعتماد استفاده کنند و از استناد به منابعی که ممکن است اعتبار علمی کافی نداشته باشند و یا به صورت مصنوعی توسط مدل های زبانی تولید شده باشند، بپرهیزند. بدین ترتیب، هوش مصنوعی تنها به عنوان ابزاری برای تسهیل جستجو و گردآوری منابع معتبر عمل می کند و اصالت منابع به دقت بررسی می شود.

## ۵- حفظ استقلال علمی پژوهشگران و اصالت تحقیقات

- پژوهشگران باید تمامی مراحل اصلی تحقیق، از جمله طراحی آزمایش، جمع آوری داده ها، تحلیل یافته ها و نتیجه گیری نهایی را به صورت مستقل و با دانش تخصصی خود انجام دهند. استفاده از هوش مصنوعی نباید به گونه ای باشد که نقش اصلی پژوهشگر در تولید علم و تحلیل علمی تحت تأثیر قرار گیرد.

- مدل های هوش مصنوعی موجود در حال حاضر کاملاً عینی یا واقعی نیستند. نویسندگانی که از هوش مصنوعی برای نوشتن تحقیقات خود استفاده می کنند باید تمام تلاش خود را برای اطمینان از صحت خروجی ها انجام دهند و منابع ارائه شده، منعکس کننده ادعاهای مطرح شده باشند.

## ۶- مسئولیت پذیری نویسندگان در برابر محتوا

- نویسندگان به عنوان مسئول اصلی محتوای علمی مقاله، وظیفه دارند که اطمینان حاصل کنند تمامی داده ها و تحلیل های ارائه شده اصیل و مستقل هستند. هوش مصنوعی نباید در تولید داده های علمی یا نتیجه گیری های پژوهشی جایگزین کار اصلی پژوهشگر شود و در صورت استفاده از هوش مصنوعی برای جنبه های پشتیبانی، لازم است شفافیت در این خصوص حفظ شود. نویسندگان مسئول محتوای دست نوشته خود هستند، حتی آن قسمت هایی که توسط یک ابزار هوش مصنوعی تولید شده است. در نتیجه باید در قبال هرگونه نقض اصول اخلاقی در انتشار آن پاسخگو باشند.

## نتیجه گیری

این دستورالعمل با هدف حمایت از اصول علمی و حفظ اصالت پژوهش ها در نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب تنظیم شده است. ما به عنوان یک نشریه علمی، به کاربردهای مثبت و مسئولانه هوش مصنوعی به عنوان دستیار پژوهشی احترام می گذاریم و استفاده از این ابزارها را به شرط رعایت دقیق اصول علمی و تحقیقاتی توصیه می کنیم. از نویسندگان دعوت می شود که با رعایت این توصیه ها، ضمن بهره گیری از فناوری های جدید، بر اصالت و کیفیت پژوهش های خود تمرکز کنند تا مقالاتی با ارزش علمی بالا و دارای صحت و اعتبار منتشر شود.

## ❖ تذکر مهم:

براساس مصوبه هیئت تحریریه و تایید هیئت مدیره انجمن آب و فاضلاب ایران، کلیه مقالاتی که از ابتدای سال ۱۴۰۴ به مجله ارسال می شود باید مبلغ دو میلیون و پانصد هزار ریال هزینه پردازش اولیه و مبلغ پنج میلیون ریال برای هزینه انتشار به شماره کارت: ۳۱۰۱-۰۹۹۰-۸۳۷۰-۵۸۵۹ به نام انجمن آب و فاضلاب ایران در بانک تجارت شعبه دانشگاه (کد ۱۸۶) واریز و فیش آن را به همراه فایل های مقاله در سایت نشریه بارگزاری کنند.

# Journal of Water and Wastewater Science and Engineering

Vol. 10, No. 4, Winter 2026

License from Ministry of Science, Research and Technology of  
Iran: No. 3/18/290129 on 6 March 2017.

License from Ministry of Culture and Islamic Guidance: No.  
86092 on 20 January 2020.

**Concessionaire:** Iran Water and Wastewater Association (IWWA)  
**Director-in-Charge:** Tabesh, M. (Ph.D.)  
**Editor-in-Chief:** Haghighi, A. (Ph.D.)

## Editorial Board:



**Farmani, R. (Ph.D.):** Associate Professor, University of Exeter (UK)  
**Giustolisi, O. (Ph.D.):** Professor, University of Bari (Italy)  
**Jalili Ghazizadeh, M.R. (Ph.D.):** Associate Professor, University of Shahid Beheshti  
**Nazif, S. (Ph.D.):** Associate Professor, University of Tehran  
**Rashidi Mehrabadi, A. (Ph.D.):** Associate Professor, University of Shahid Beheshti  
**Safavi, H.R. (Ph.D.):** Professor, Isfahan University of Technology  
**Sajadifar, S.H. (Ph.D.):** Tehran Water and Wastewater Engineering Company and Assistant Professor, Islamic Azad University  
**Sarrafzadeh, M.H. (Ph.D.):** Professor, University of Tehran and Chairholder of UNESCO Chair on Water Reuse  
**Savic, D. (Ph.D.):** Professor, University of Exeter (UK)  
**Tabesh, M. (Ph.D.):** Professor, University of Tehran  
**Takdastan, A. (Ph.D.):** Professor, Ahwaz Jundishapur University of Medical Science  
**Talebbeydokhti, N. (Ph.D.):** Professor, Shiraz University  
**Tanyimboh, T. (Ph.D.):** Associate Professor, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa  
**Torabian, A. (Ph.D.):** Professor, University of Tehran  
**Vosoghi, M. (Ph.D.):** Professor, Sharif University of Technology  
**Yazdi, J. (Ph.D.):** Associate Professor, University of Shahid Beheshti

## Industrial Water and Wastewater Policy Council:

**Amini, H. (Ph.D.):** Managing Director, National Water and Wastewater Engineering Company (NWVEC)  
**Ghane, A.A. (M.Sc.):** The head of the Coordination Center of Water and Wastewater Knowledge, Industry, Market, Scientific Vice Presidency  
**Ghannadi, M. (M.Sc.):** Director General of the Office of Research, Development and Industry Relations, NWVEC  
**Honari, H. (M.Sc.):** Retired Faculty Member, Tehran University of Medical Science

**Editorial Staff:**  
**Graphic Designer:**  
**Page Setting:**  
**Publisher:**  
**Address:**  
**Tel:**  
**Fax:**  
**Print ISSN:**  
**Online ISSN:**  
**E-Mail:**

**Akhtari, N.**  
**Shahangian, S.A. (Ph.D.)**  
**Akhtari, N.**  
**Iran Water and Wastewater Association (IWWA)**  
**No. 7, 4<sup>th</sup> Floor, 429 Taleghani Street, Tehran, Iran**  
**+98 21 88956097**  
**+98 21 88391390**  
**2588-3941**  
**2588-396X**  
**info@jwwse.ir**

# Journal of Water and Wastewater Science and Engineering

Volume 10, No. 4, Winter 2026

## Preface

- The Need for Sustainability and Flexibility of Water and Wastewater Systems in Crisis Situations** 2  
Hossein Nayeb

## Papers

- Comparison of the Performance of Moving Bed Bioreactor (MBBR) and Integrated Fixed-Film Activated Sludge (IFAS) for CNP Removal from Faraman Industrial Estate Wastewater** 3  
Azar Asadi and Ali Fiuzy
- Investigation of Organic Matter Removal by Electrocoagulation Process in Dairy Industry (Case Study: Mehr Ice Cream Company, Isfahan)** 15  
Elham Izadinia and Ali Nasri
- Leakage Detection and Localization in Water Distribution Networks Using SMA** 29  
Maryam Nasiri Dahaj, Mohammadreza Jalili Ghazizadeh, Ebrahim Jabbari and Reza Moasheri
- Study on the Ability of Scenedesmus Obliquus in the Bio-Removal of Polyethylene Microplastics from Aquatic Environments and Optimization of the Bio-removal Effective Parameters** 41  
Seyyed Hesam Sharif Vaghefi, Roya Mafigholami, Omid Tavakoli and Hamid Moghimi
- The Application of Generative Artificial Intelligence in Evaluating and Ranking the Key Factors Influencing the Performance of Rainwater Harvesting Systems** 51  
Mohammad Javad Emami-Skardi, Reza Hedayati Marzooni and Yasaman Samaei
- Economic and Technical Analysis of Leakage Reduction in Birjand Urban Water Distribution Network** 63  
Navid Gholampoor, Pooya Mohammadi, Fereshteh Modaresi and Hossein Ansari