



ISSN 2588-3941

نشریه علمی

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

سال هشتم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۲

نشریه علمی

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

سال هشتم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۲

انجمن آب و فاضلاب ایران

- ۲ پیشگفتار (پیامدهای تغییر اقلیم بر خدمات آب آشامیدنی)
مجید قنادی
- مقالات علمی
- ۴ حذف آرسنیک از آب آشامیدنی با استفاده از ماده منعقدکننده آلوم
سینا کریمی، هادی رمضانی اعتدالی و عباس ستوده‌نیا
- ۱۱ برآورد کمی و کیفی پساب خاکستری (مطالعه موردی: مجموعه خوابگاهی دانشگاه اصفهان)
شروین جمشیدی و علی دهنوی
- ۲۲ بررسی تاثیر ابعاد نانو مواد CuO در بهبود خواص آبدهی و گرفتگی غشای اولترافیلتراسیون نانوکامپوزیت PVDF
در تصفیه فاضلاب شهری
مهیار پاکان، مریم میرابی و علیرضا ولی‌پور
- ۳۵ بررسی سناریوهای مختلف کالیبراسیون در مدل باز توسعه داده شده BSM1 برای مدل‌سازی سیستم تصفیه
فاضلاب نهراکسیداسیون کاروسل (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران)
سارا نظیف، یاسر خطیبی، آناهیتا پورمحمدی و علی خواجهیان
- ۵۱ بهینه‌سازی و بررسی حذف آفت‌کش دلتامترین از محیط‌های آبی توسط کامپوزیت کربن فعال مغناطیسی
RSM-BBD با استفاده از روش سطح پاسخ RSM-BBD
حسین رسولی و رضا محمدی
- ۷۰ ارزیابی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات دارایی‌های فیزیکی شرکت‌های خدمات‌رسان با رویکرد سبز به‌روش
تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: شرکت آب و فاضلاب استان تهران)
رضا شهرجردی و مصطفی قربانپور دلیوند
- مطالب عمومی
- ۸۵ مصاحبه (مهندس عباس شفیعی)
- ۹۶ معرفی کتاب
- ۹۷ اخبار انجمن

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

سال ۸، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۲

این نشریه دارای مجوز کمیسیون بررسی نشریات علمی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، به شماره ۳/۱۸/۲۹۰۱۲۹ 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، لندن

دکتر سید حسین سجادی فر: شرکت آب و فاضلاب تهران و استادیار دانشگاه آزاد اسلامی

دکتر محمد حسین صراف زاده: استاد دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران و رئیس کرسی یونسکو در

بازیافت آب

دکتر حمیدرضا صفوی: استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر ناصر طالب بیدختی: استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شیراز

دکتر راضیه فرماني: دانشیار، دانشگاه اگزتر، انگلستان

دکتر اوراز یو 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 هاشم امینی: مدیر عامل شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور

دکتر احمد سلامت: معاون منابع انسانی و پشتیبانی شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور

مهندس علی اصغر قانع: رئیس کانون هم‌هنگی 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

ناهد اختری

ناهد 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:

پیشگفتار (پیامدهای تغییر اقلیم بر خدمات آب آشامیدنی)..... ۲
مجید قنادی

مقالات علمی

حذف آرسنیک از آب آشامیدنی با استفاده از ماده منعقدکننده آلوم..... ۴
سینا کریمی، هادی رضانی اعتدالی و عباس ستوده‌نیا

برآورد کمی و کیفی پساب خاکستری (مطالعه موردی: مجموعه خوابگاهی دانشگاه اصفهان)..... ۱۱
شروین جمشیدی و علی دهنوی

بررسی تاثیر ابعاد نانو مواد CuO در بهبود خواص آبدهی و گرفتگی غشای اولترافیلتراسیون..... ۲۲
نانوکامپوزیت PVDF در تصفیه فاضلاب شهری
مهیار پاکان، مریم میرابی و علیرضا ولی‌پور

بررسی سناریوهای مختلف کالیبراسیون در مدل باز توسعه داده شده BSM1..... ۳۵
برای مدل سازی سیستم تصفیه فاضلاب نهر اکسیداسیون کاروسل (مطالعه موردی: تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران)
سارا نظیف، یاسر خطیبی، آناهیتا پورمحمدی و علی خواجه‌ویان

بهینه سازی و بررسی حذف آفت کش دلتامترین از محیط های آبی توسط..... ۵۱
کامپوزیت کربن فعال مغناطیسی AC/Fe₃O₄ با استفاده از روش سطح پاسخ RSM-BBD
حسین رسولی و رضا محمدی

ارزیابی استراتژی های نگهداری و تعمیرات دارایی های فیزیکی شرکت های خدمات رسان با رویکرد سبز..... ۷۰
به روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: شرکت آب و فاضلاب استان تهران)
رضا شهرجردی و مصطفی قربانپور دلیوند

مطالب عمومی

مصاحبه (مهندس عباس شفیعی)..... ۸۵

معرفی کتاب..... ۹۶

اخبار انجمن..... ۹۷



پیامدهای تغییر اقلیم بر خدمات آب آشامیدنی



مهندس مجید قنادی

مدیر دفتر تحقیقات، توسعه فناوری و ارتباط با صنعت،

شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور و

عضو شورای سیاستگذاری نشریه

از دهه ۱۹۵۰ به این سو، در بسیاری از مناطق جهان، افزایش چشمگیر دو پدیده شدت بارش‌های سنگین و افزایش دوره خشک‌سالی که از آن به «تغییر اقلیم» تعبیر می‌شود، میلیاردها نفر در سراسر جهان را، به‌ویژه در مناطق کم‌آب، نگران آینده آب و دسترسی به آن ساخته است. ذوب شدن بیش‌تر یخچال‌ها، افزایش تعداد و بزرگی سیل‌ها و دوره‌های طولانی‌تر و شدت بیش‌تر خشک‌سالی‌ها، تقلیل سفره‌های زیرزمینی و زوال کیفیت آب‌ها، تاثیر فاحشی بر میزان دسترسی به آب آشامیدنی سالم دارد و تهدیدی برای دستاوردهای گذشته به‌شمار می‌رود. اگر به‌هر دلیلی، آب از پهنه‌ی گیتی گم شود و جریان حیات‌بخش آن، به مقدار کافی و با کیفیت مناسب و در زمان مناسب، به شهرها و روستاها، کشتزارها و صنایع قطع شود، انسان‌ها از تشنگی و گرسنگی خواهند مُرد و اگر این مظهر حیات، آلوده شود، ما نیز بیمار می‌شویم. به‌راستی آینده برای ما چه سرنوشتی را رقم خواهد زد؟ و پیامدهای تغییر اقلیم بر خدمات آب آشامیدنی چگونه خواهد بود؟ و چه تدبیرها و اقدام‌هایی برای سازگاری با آن، باید اندیشیده و اجرا شود؟ طی پنجاه سال گذشته، سطح کشت‌های آبی جهان، دو برابر و حجم آب مصرفی برای تأمین نیاز جهانی غذا، سه برابر شده است. در پنجاه سال آینده نیز، بار دیگر حجم تولید مواد غذایی باید دو برابر شود.

در مقیاس اقلیمی، گرم‌شدن هوا و تغییرهای دمای آن نسبت به دمای سطح آب، سبب جا به‌جا شدن توده‌های به نسبت خنک آب و راندن آن‌ها به کرانه‌های اقیانوس‌ها می‌شود. این تغییر با ایجاد سامانه‌های فشاری، ابرهای باران‌زا را از مسیر طبیعی خود خارج می‌سازد و موجب بارش بیش‌تر در نواحی مرطوب‌تر و خشکی بیش‌تر

در نواحی خشک‌تر می‌شود. از این پدیده اقلیمی، به تعبیرهای گوناگونی مانند «لانیئو» (La ninio) و «ال نینو» (El ninio) یاد می‌شود. زمانی که پدیده «لانیئو» در یک منطقه حاکم باشد، به معنای آن است که دمای اقیانوس، کم‌تر از دمای محیط است. حاکمیت این پدیده، «کم‌آبی» و «خشک‌سالی» را به‌همراه دارد. در حالی که استیلای پدیده «ال نینو»، بیانگر آن است که دمای اقیانوس، بیش‌تر از دمای محیط است. حاکمیت این پدیده، با «پرآبی» همراه است.

حتی اگر هیچ دگرگونی اقلیمی هم رخ ندهد و دشواری‌های ناشی از تغییر اقلیم، مرتفع شود (که البته نخواهد شد)، باز هم جهان متأثر از دو رخداد رشد اقتصادی و افزونی جمعیت، با مشکل کم‌آبی رو به رو است. گزارش‌های جهانی حکایت از آن دارد که حدود ۴ میلیارد از ۷/۸ میلیارد نفر جمعیت کره زمین، حداقل یک ماه در سال، کمبود شدید آب را تجربه می‌کنند. توجه شود که کمبود آب، تنها به معنای کمبود فیزیکی منابع آبی قابل استفاده در یک مکان خاص نیست، بلکه نابرابری در دسترسی به خدمات آب آشامیدنی را نیز شامل می‌شود و به این دلیل، تاثیرهای ناخوشایند تغییر اقلیم، در جوامع آسیب‌پذیر، بیش‌تر احساس می‌شود. با تداوم پدیده شهرنشینی، پیش‌بینی می‌شود در سه دهه آینده، تقاضای آب شهری، ۵۰ تا ۸۰ درصد افزایش یابد و به این ترتیب شهرنشینان و به‌ویژه اقشار کم‌درآمد آن، نسبت به تغییر اقلیم آسیب‌پذیرتر خواهند بود و از هر چهار شهر، یک شهر، کمبود آب را تجربه خواهد کرد.

تغییر اقلیم، فشار مضاعفی را بر زنجیره تأمین نیازهای جمعیت، به اشکال کمبود آب، تغییر در دوره‌های فصلی، بحران‌ها و اختلال‌های اجتماعی و اقتصادی تحمیل و شوک‌های ویرانگری را در کشورهای کم‌درآمد و متوسط و به‌ویژه در مناطق روستایی که با نقص در ظرفیت‌های مدیریتی و فقدان خدمات تخصصی رو به‌رو هستند، پدیدار خواهد کرد.

در کشور ما، در ۳۰ سال گذشته، به ازای هر دهه، میانگین افزایش دمای یک درجه سانتی‌گراد ثبت شده و میانگین دمای هوای کشور در سال ۱۴۰۱ نسبت به سال ۱۳۷۰ به تقریب سه درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. انتظار می‌رود میانگین دمای هوای کشور تا سال ۲۰۵۰، حدود ۲/۶ و تا پایان قرن جاری، حدود ۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد.

متعاقب افزونی ناخواسته دما، از حدود ۱۰ سال پیش به این سو، کشور ما، به‌طور مداوم بارندگی‌های کم‌تر از میانگین بلند مدت را تجربه کرده و گرفتار خشک‌سالی شده است. هر چند در دو سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ و ۱۳۹۸-۱۳۹۹ به ترتیب ۳۴۲/۱ و ۳۱۷/۷ میلی‌متر بارندگی داشت که از میانگین بلند مدت بیش‌تر بود. اما این میزان در سال‌های آبی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ و ۱۴۰۰-۱۴۰۱ بسیار کاهش

قنادی، م.، (۵ دی ماه ۱۴۰۲)، "تغییر اقلیم و پیامدهای آن در ایران، با نگاه بر مناطق جنوبی استان تهران"، سخنرانی در فرمانداری شهرستان پاکدشت.

WHO, UNICEF, World Bank, (2020), *State of the world's drinking water*, 56-57.

Vaghefi S.A., Keykhail M., Jahanbakhshi F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., and Abbaspour, K.C., (2019), "The future of extreme climate in Iran", *Scientific Reports*, 9,1464, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38071-8>

یافت و از سال آبی ۱۳۸۶-۱۳۸۷ که کشور بدترین شرایط بارش‌ها را داشت، این دو سال نیز به‌عنوان کم‌بارش‌ترین سال‌های کشور شناخته می‌شوند. کشور ما، در سال آبی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ با ثبت ۱۵۷/۷ میلی‌متر بارندگی، یکی از کم‌بارش‌ترین سال‌های نیم قرن اخیر تجربه کرد. با وجود آن که این رقم در سال آبی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ تا اندازه‌ای بهبود یافت و به ۲۰۳/۹ میلی‌متر رسید، اما این میزان بارندگی در فصل مناسب (پاییز، زمستان و بهار) رخ نداد و کار به‌جایی رسید که سدهای پایتخت، بیش از ۷۶ درصد کسری آب داشتند.

در مقایسه با دوره ۱۳۶۳-۱۳۸۳ پیش‌بینی می‌شود در دوره ۱۴۰۴-۱۴۲۸، دماهای حدی حداکثری در پهنه ایران زمین، به‌ویژه در مناطق جنوبی آن حاکم شود و دوره‌های خشکی بیش‌تری (بارندگی کم‌تر از ۲ میلی‌متر، به مدت بیش از ۱۲۰ روز و دمای بیش از ۳۰ درجه سانتی‌گراد) به‌همراه شرایط مرطوب (بارندگی بیش‌تر از ۱۱۰ میلی‌متر، به مدت ۳ روز و یا کم‌تر) بر کشور حاکم شود. تلفیق این شرایط، دوره‌های طولانی‌تر خشکسالی، با فواصل بارندگی‌های شدید میان دوره‌ای که پیامد آن، افزایش سیلاب‌ها است، را به‌همراه دارد. افزون بر آن، نشست بیش‌تر زمین، متأثر از وابستگی بیش‌تر به استحصال آبخوان‌های زیرزمینی، کاهش بازدهی تولید محصول‌های کشاورزی، به‌ویژه در مناطق مرکزی و جنوبی، زوال بیش‌تر کیفیت آب‌ها، متعاقب پیشروی آب‌های شور و برداشت آب از لایه‌های پایین‌تر، تخریب زیرساخت‌ها و تأسیسات، مهاجرت و غیره از پیامدهای محتوم غیرمستقیم تغییر اقلیم بر کشور ما است.

بدیهی است تقلیل پیامدهای ناخواسته گفته شده و سازگاری با شرایط جدید، نیازمند عزم و اراده ملی و برنامه‌ریزی‌های دقیق و عالمانه، با رعایت نیازهای واقعی ذی‌نفعان در سه سطح کوتاه مدت (۱ تا ۳ سال)، میان مدت (۳ تا ۱۰ سال) و بلند مدت (بیش‌تر از ۱۰ سال)، و به خدمت‌گرفتن ابزارها و انضباط‌های مهندسی و حقوقی و پای‌بندی به آن‌ها و تغییر نگاه به آب، به‌عنوان یک ثروت ملی است. به یاد داشته باشیم که منابع آب، یکی از با ارزش‌ترین دارایی‌های هر کشور است. آب در سطح زمین جریان می‌یابد، به درون خاک نفوذ می‌کند، سبب تداوم حیات و رشد موجودات زنده می‌شود و پس از مشروب ساختن انسان‌ها، کشتزارها و صنایع، سرانجام به‌سمت دریاها جریان می‌یابد تا برای کشور، ثروت و قدرت به ارمغان آورد. از این‌رو حیانت از آب -به‌مانند حفاظت از یک ثروت گرانقدر ملی- وظیفه امروز و فردای همه ما است.

منابع

امیدی، م.، و زرین‌پنجه، ن.، (۱۳۹۳)، *جهان در ۲۰۵۰*، (ترجمه)، چاپ دوم، انتشارات مهر ویستا.

Research Paper

مقاله پژوهشی

Investigation of Arsenic Removal from Drinking Water Using Alum Coagulant

حذف آرسنیک از آب آشامیدنی با استفاده از ماده منعقدکننده آلوم

Sina Karimi¹, Hadi Ramezani Etedali^{2*} and Abbas Sotoodehnia²

سینا کریمی^۱، هادی رضانی اعتدالی^{۲*} و عباس ستوده‌نیا^۲

1- MS.c. Student of Irrigation and Drainage, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

* Corresponding Author, Email: ramezani@eng.ikiu.ac.ir

* نویسنده مسئول، ایمیل: ramezani@eng.ikiu.ac.ir

Received: 14/12/2022

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳

Revised: 09/04/2023

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۱/۲۰

Accepted: 10/05/2023

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

Increasing urbanization and industrialization of cities has led to an increase in pollutants and the production of many toxic elements. One of these pollutants is arsenic, which is known as one of the most toxic and dangerous elements in drinking water. The aim of this study is to investigate the method of minimizing the amount of this toxic substance by coagulation and flocculation in drinking water. In order to determine the optimal conditions for arsenic removal by coagulation and flocculation methods, in the first stage, the optimal pH is determined by Jar test as 6. Then by selecting alum as coagulant, lime as coagulant and the optimal pH, the optimal amount of chemical material is obtained as 7.5 mg/lit. Determining the optimal places in the current situation can be the novelty of this paper. At the end, the residual concentration of arsenic is determined by atomic hydride absorption spectroscopy. According to the concentration of arsenic in the incoming water sample which is equal to 91 micrograms per liter, the Jar test is performed in two stages with alum coagulants. Based on the optimal pH obtained in different concentrations of coagulants and also a constant concentration of coagulants, the arsenic removal efficiency in the best case in alum coagulants reached 88.46%, which is equal to 10 micrograms per liter, which according to the WHO, is an acceptable result. The result of this study indicates that the coagulation and flocculation method with alum coagulant and a constant amount of lime as a coagulant has a high efficiency in arsenic removal.

افزایش روزافزون جمعیت و همین‌طور تقاضای انسان برای زندگی راحت‌تر موجب استفاده بیش از حد از منابع آب‌های سطحی و زیرسطحی شده و در نتیجه آن انواع عناصر سمی به محیط‌زیست وارد شده است. یکی از این عناصر سمی آرسنیک است. آرسنیک از سمی‌ترین و خطرناک‌ترین عنصرهای موجود در آب آشامیدنی شناخته می‌شود. هدف از این تحقیق بررسی روش به حداقل رساندن میزان این ماده سمی به روش انعقاد و لخته‌سازی در آب آشامیدنی است. در روش انعقاد و لخته‌سازی برای حذف آلاینده یک مقدار بهینه از pH و ماده منعقدکننده وجود دارد که در کمتر و بیشتر از این مقادیر بهینه درصد کاهش حذف آلاینده کمتر می‌شود. به‌منظور تعیین شرایط بهینه حذف آرسنیک به روش انعقاد و لخته‌سازی، در مرحله اول میزان pH بهینه به کمک آزمایش جار تعیین شد و مقدار آن ۶ به‌دست آمد. سپس با انتخاب آلوم به‌عنوان ماده منعقدکننده و آهک به‌عنوان کمک منعقدکننده و هم‌چنین میزان pH بهینه، مقدار بهینه ماده شیمیایی ۷/۵ میلی‌گرم بر لیتر به‌دست آمد، که تعیین نقاط بهینه در شرایط موجود را می‌توان نواوری در این تحقیق نامید. در پایان غلظت باقیمانده آرسنیک به‌روش طیف‌سنجی جذب اتمی هیدرید تعیین شد. با توجه به غلظت آرسنیک نمونه آب ورودی که برابر با ۹۱ میکروگرم بر لیتر بود، آزمایش جار در طی دو مرحله با منعقدکننده آلوم صورت گرفت. با توجه به میزان pH بهینه به‌دست آمده در غلظت‌های مختلفی از مواد منعقدکننده و هم‌چنین غلظت ثابتی از مواد کمک منعقدکننده، راندمان حذف آرسنیک در بهترین حالت با منعقدکننده آلوم به ۸۸/۴۶ درصد رسید که برابر با ۱۰ میکروگرم بر لیتر است و با توجه به میزان استاندارد سازمان بهداشت جهانی، نتیجه قابل‌قبولی است. نتیجه این پژوهش بیان‌گر آن است که روش انعقاد و لخته‌سازی با منعقدکننده آلوم و میزان ثابتی از آهک به‌عنوان کمک منعقدکننده، کارایی قابل‌قبولی در حذف آرسنیک دارد و می‌تواند گزینه مناسبی برای حذف آرسنیک باشد.

Keywords: Alum, Arsenic, Coagulation and flocculation, Drinking water.

کلمات کلیدی: آرسینیک، آب آشامیدنی، انعقاد و لخته سازی، آلوم.

مزایای آن مانند راه‌اندازی ساده‌تر، بازسازی آسان‌تر و راندمان حذف بالاتر به‌طور گسترده‌ای استفاده شده است (Nicomel et al., 2016). در مطالعه‌ای که توسط Ansari et al. (2017) برای حذف آرسنیک با کامپوزیت‌های مختلف بر مبنای CeO_2 انجام شد، از نانو کامپوزیت CeO_2/Fe_2O_3 برای حذف آرسنیک استفاده شد. مقدار K_F برای CeO_2 ، Fe_2O_3 و CeO_2/Fe_2O_3 براساس ایزوترم جذب فروندلیچ به ترتیب ۱/۳۱، ۱/۳۷ و ۵ به‌دست آمد که بیانگر جذب مطلوب‌تر توسط نانو کامپوزیت CeO_2/Fe_2O_3 است (Ansari et al., 2017). در این بین انعقاد و ته‌نشینی، قدیمی‌ترین روش شناخته شده برای حذف فلزات از آب است (Mólgora et al., 2013). انعقاد، لخته‌سازی، ته‌نشینی و فیلتراسیون با نمک‌های فلزات و آهک جزء روش‌های مهم در حذف آرسنیک هستند. فرآیند انعقاد شیمیایی یک روش موثر برای کنترل آلاینده‌های فلزات سنگین است که می‌تواند به تنهایی یا همراه با دیگر روش‌های تصفیه آب مورد استفاده قرارگیرد (سلیمی، ۱۳۹۶). باغوند و همکاران (۱۳۹۰) به‌منظور یافتن شرایط عملیاتی بهینه برای آب‌های با سطح کدورت کم تا زیاد، سولفات آلومینیوم و کلرید فریک در pHهای مختلف و دوزهای مختلف مواد منعقدکننده مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند استفاده از دوزهای پایین سولفات آلومینیوم و کلرید فریک می‌تواند کدورت‌های کم تا متوسط را به‌طور موثر کاهش دهد. در پژوهش هاشمی و همکاران (۱۳۹۵) که برای حذف آرسنیک به روش انعقاد و لخته‌سازی از آب آشامیدنی صورت گرفت، بیشترین درصد حذف آرسنیک ۷۹ درصد محاسبه شد.

Guo et al. (2006) برای حذف آرسنیک سه و پنج ظرفیتی از سیدریت ($FeCO_3$) استفاده کردند. نتایج نشان داد ظرفیت جذب برای آرسنیک سه و پنج ظرفیتی به ترتیب ۱۰۴۰ و ۵۲۰ میکروگرم بر گرم است. Goswami et al. (2012) از نانو ذرات مس دو ظرفیتی برای حذف آرسنیک سه ظرفیتی استفاده کردند. نتایج نشان داد یک گرم از نانو جاذب می‌تواند تا ۲۰۰ میکروگرم بر لیتر آرسنیک تا ۱۰۰ درصد حذف آرسنیک را داشته باشد. هم‌چنین در مطالعه Dharmadhikari and Zade (2007) مشخص شد Fe_2O_3 از Al_2O_3 در جذب آرسنیک مؤثرتر است. در سیستم‌های تصفیه آب‌های سطحی با فرآیند متداول با استفاده از مواد منعقدکننده فریک یا آلوم، آرسنیک به آسانی در طول فرآیند انعقاد ته‌نشینی حذف می‌شود. در تحقیقاتی توسط Nriagu and Kim (2000) فرآیند انعقاد و لخته‌سازی به کمک مواد شیمیایی از قبیل آلوم، کلروفریک و سولفات فرو انجام شد که نتایج آن نشان‌داد یکی از مواد مناسب برای فرآیند انعقاد و

امروزه با توجه به آلودگی آب‌های سطحی توسط انواع آلاینده‌ها مانند صنایع، بسیاری از این آب‌ها در واقع به نوعی پساب تبدیل شده‌اند که باید با استفاده از انواع فرایندهای تصفیه آب برای استفاده به حدود کیفی موردنظر برسند. در میان این آلاینده‌ها فلزات سنگین به‌دلیل عدم تجزیه و همین‌طور اثرات مخرب بر روی سلامت انسان‌ها و موجودات زنده از اهمیت بالایی برخوردار هستند (Rajkumar et al., 2010). وجود فلزات سنگین در منابع آب به‌صورت طبیعی و یا بر اثر فعالیت‌های بشر صورت می‌گیرد (Hou et al., 2013). آب‌های سطحی ناشی از آب کشاورزی دارای نیترات، فسفات و آرسنیک هستند، به‌خصوص در مناطقی که از آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی در کشاورزی استفاده می‌شود (چالکش امیری، ۱۴۰۲). یکی از آلاینده‌ها آرسنیک است که بر اثر فعالیت‌های بشری و یا طبیعی موجب آلودگی منابع آب برخی مناطق شده است (Karim, 2000). آرسنیک یک شبه فلز موجود در پوسته زمین است که جزء اصلی بیش از ۲۰۰ ماده معدنی را تشکیل می‌دهد (Parmanik et al., 2016). این عنصر شبه فلزی است که برای انسان، گیاهان، حیوانات و میکروارگانیسم‌ها سمی است. متوسط غلظت آن در بین ۲ تا ۵ ppm است که یکی از آلاینده‌های غیر آلی آب آشامیدنی است (Baroni et al., 2000). این عنصر سمی به‌طور چشم‌گیری در قرن بیستم برای ساخت حشره‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها و مواد محافظ چوب کاربرد داشته است (Grover et al., 2010). آرسنیک غیرآلی می‌تواند در حالت‌های +۵، +۳، ۰ و -۳ ظرفیتی در واکنش‌ها وجود داشته باشد که فقط آرسنات (As^{+5}) و آرسنیت (As^{+3}) مربوط به آب آشامیدنی هستند که هر دو آن‌ها برای انسان‌ها و گیاهان سمی است (Choong Thomas et al., 2007). اثرات بهداشتی این آلاینده سمی منجر شد که سازمان بهداشت جهانی و سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا استاندارد آرسنیک در آب آشامیدنی را از ۵۰ میکروگرم بر لیتر را به ۱۰ میکروگرم بر لیتر کاهش دهد (Hu et al., 2012، Kong et al., 2017، Pio et al., 2017). براساس استاندارد آب آشامیدنی ایران، حد مجاز غلظت آرسنیک را برابر با همین مقدار تعیین نموده‌اند (Jong and Parry, 2003).

امروزه روش‌های مختلفی برای حذف آرسنیک از آب وجود دارد که شامل فرآیندهای تبادل یونی، اسمز معکوس، فرآیندهای غشایی، روش‌های شیمیایی، جاذب‌ها، سبک‌سازی با آهک، فیلتراسیون و در آخر انعقاد و لخته‌سازی است (Song et al., 2006). از میان روش‌های حذف آرسنیک فناوری جذب به‌دلیل

آرسنیک در نمونه آب ۹۱ میکروگرم بر لیتر محاسبه شد. مواد منعقدکننده مورد استفاده برای انجام آزمایش آلوم است و از آهک به عنوان کمک منعقدکننده مورد استفاده قرار گرفته است. برای تنظیم pH نیز از اسیدکلریک ۱ نرمال و هیدروکسید سدیم ۰/۰۵ نرمال استفاده شد. در هر دو مرحله ۴ ساعت قبل از انجام آزمایش به نمونه ورودی به میزان ۱ ppm کلر برای تبدیل آرسنیک سه ظرفیتی به آرسنیک پنج ظرفیتی تزریق شد. تمامی مراحل انجام آزمایش جار در دمای اتاق ۲۰-۲۵ درجه سانتی گراد صورت گرفت. تمام وسایل مورد استفاده در آزمایش با آب مقطر کاملاً آب‌کشی شده و تمام دستگاه‌های مورد استفاده نیز مطابق با دستورالعمل راهنمای دستگاه کالبره شده است. در فرآیند انعقاد، برای تعیین pH بهینه که یک پارامتر مهم محسوب می‌شود، برای شروع آزمایش ابتدا در هر یک از ظروف (بشر) یک لیتر از نمونه آب خام اضافه شده است. با استفاده از محلول‌های اسیدی و بازی نام برده، pH هر یک از ظرف‌های حاوی نمونه آب ورودی (در دستگاه جارتست) با فاصله یک واحد از ۴ تا ۹ تغییر داده شده است. سپس مقدار ثابتی از منعقدکننده موردنظر (۵ میلی‌گرم آلوم) به صورت مجزا به داخل شش ظرف تزریق شده است. بعد از تزریق ماده دستگاه را روشن کرده و هم‌زن‌ها بر روی سرعت ۱۴۰ دور در دقیقه تنظیم شده است و به مدت دو دقیقه این شرایط برای انجام اختلاط سریع ادامه پیدا می‌کند. بعد از اتمام این زمان، سرعت هم‌زن‌ها به ۳۵ دور در دقیقه کاهش داده شد که این روند تا مدت زمان ۱۸ دقیقه ادامه پیدا کرد تا لخته‌سازی به طور کامل صورت گیرد. بعد از اتمام ۱۸ دقیقه دستگاه را خاموش کرده و ۳۰ دقیقه در حالت استراحت قرار داده تا عمل ته‌نشینی کاملاً صورت گیرد.

پس از اتمام مدت زمان مشخص شده نمونه‌ها را از عمق یک سانتی‌متری از سطح آب هر یک از ظرف‌ها به صورت جداگانه برداشت کرده تا میزان آرسنیک باقی‌مانده در pHهای مختلف اندازه‌گیری شود. بعد از تعیین pH بهینه، مرحله دوم آزمایش شروع می‌شود. برای شروع اندازه‌گیری مقدار بهینه مواد منعقدکننده و تأثیر کمک منعقدکننده، مقدار pH نمونه ورودی را به مقدار pH بهینه تغییر داده و نمونه آب ورودی در داخل شش ظرف قرار داده شده و تمامی هم‌زن‌ها در داخل ظرف‌ها قرار گرفته است. سپس مقدار ۵ میلی‌گرم در لیتر از ماده شیمیایی (آلوم) به ظرف اول مانند مرحله اول (به عنوان شاهد) تزریق شده و در ظرف‌های آزمایش بعدی با افزایش وزن ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر نسبت به نمونه قبلی (۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵، ۷، ۷/۵) از آلوم تزریق شده است. بعد از تزریق کامل ماده منعقدکننده در تمامی ظرف‌ها

لخته‌سازی آلوم است، که در این آزمایش نیز از آن استفاده شد. در پژوهش حاضر با ایجاد شرایط بهینه در فرایند انعقاد و لخته سازی غلظت آرسنیک در آب آشامیدنی کاهش داده می‌شود. شرایط بهینه که نوآوری این پژوهش است با تعیین مقدار بهینه ماده افزودنی آلوم و کمک منعقدکننده آهک و PH بهینه به آب آلوده تعیین می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از آب طبیعی حاوی آرسنیک استفاده شده است. نمونه ورودی مورد استفاده در آزمایش از چاه شماره ۲ متعلق به شرکت آب و فاضلاب تأمین کننده آب آشامیدنی شهر آبگرم واقع در شهرستان آوج استان قزوین تهیه شده است. انجام آزمایش‌ها در آزمایشگاه کنترل کیفیت تصفیه‌خانه شماره ۲ (کن) تهران متعلق به شرکت آب و فاضلاب استان تهران صورت گرفت. برای نمونه‌برداری و انجام آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی از دو ظرف پلاستیکی به حجم ۱۰ لیتر استفاده شد. ظرف‌های مورد استفاده برای نمونه‌برداری با آب شهری شسته شد، سپس به وسیله آب مقطر آب‌کشی شدند تا احتمال وجود هرگونه آلودگی از بین برود. پس از نمونه برداری برای اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه انتقال داده شد. این آزمایش یک مدل کوچک از واحدهای انعقاد سریع، انعقاد آهسته و همین‌طور ته‌نشینی در تصفیه‌خانه است که می‌توان با افزودن مواد شیمیایی پارامترهای مورد مطالعه را در مقیاس آزمایشگاهی ارزیابی نمود. با استفاده از آزمایش جار، راهبر می‌تواند میزان تزریق مواد شیمیایی هنگامی که پارامترهای شاخص کیفیت آب تغییر می‌کند را به صورت تقریبی مشخص کند. با توجه به نتیجه به دست آمده از این آزمایش، میزان تزریق مواد شیمیایی به تصفیه‌خانه را می‌توان تنظیم کرد. این آزمایش برای دستیابی به شرایط بهینه در دو مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله اول برای دستیابی به pH بهینه و در مرحله دوم برای یافتن مقدار بهینه ماده منعقدکننده انجام شده است. برای پیش‌بینی شرایط انعقاد و تعیین میزان مناسب pH و مواد شیمیایی مورد نیاز برای لخته‌سازی از دستگاه جارتست استفاده شده است. دستگاه جارتست از شش ظرف شیشه‌ای (بشر) به حجم یک لیتر و هم‌زن‌های کاملاً یکسان که با یک موتور کار می‌کنند، تشکیل می‌شوند. هر هم‌زن داخل یکی از ظرف‌ها قرار می‌گیرد. شرایط در تمامی بشرها یکسان است به طوری که حجم نمونه اولیه تمامی بشرها یک لیتر و سرعت هم‌زن‌های قرارداده داخل بشرها نیز یکسان است. غلظت اولیه

سنجش کدورت را تا 4000 NTU فراهم می‌کند. برای اندازه‌گیری میزان آرسنیک از روش طیف‌سنجی جذب اتمی تولید هیدرید با نام اختصاری HG-AAS (Hydrid Generation Atomic Absorption Spectrometric)، عناصر به صورت گازهای هیدریدی وارد اتم‌ساز می‌شوند. دستگاه مورد استفاده از سری Agilent 33B AA است.

۳- نتایج

نمونه اولیه طبق استانداردهای گفته شده در ظرف تمیز به آزمایشگاه انتقال داد شد. پارامترهای، میزان آرسنیک، pH، هدایت الکتریکی و کدورت نمونه اندازه‌گیری شد. این اطلاعات در جدول ۱ آورده شده است. میزان آرسنیک نمونه اولیه برابر ۹۱ میکروگرم بر لیتر بود که از میزان استاندارد تعیین شده (۱۰ میکروگرم بر لیتر) بسیار بیشتر است.

برای افزایش راندمان حذف و جلوگیری از کاهش pH به دلیل اثر مواد منعقدکننده، در تمامی ظرف‌ها به اندازه ۱ میلی‌گرم در لیتر آهک به‌عنوان کمک منعقدکننده تزریق شده است. سپس دستگاه را روشن کرده تا همانند روش تعیین pH بهینه، بهینه‌ترین مقدار ماده منعقدکننده به دست آید.

در پایان آزمایش از فاصله یک سانتی‌متری از سطح آب از تمامی ظرف‌ها نمونه برداشته تا با دستیابی به حداکثر کاهش غلظت آرسنیک به مقدار بهینه دسترسی پیدا شود. برای اندازه‌گیری pH از دستگاه pH متر رومیزی مدل ۷۸۰ شرکت Metrohm سوئیس استفاده شده است. دستگاه کدورت‌سنج مورد استفاده در این آزمایش مدل N2100 از شرکت HACH است که قابلیت اندازه‌گیری کدورت براساس واحد NTU را دارا است. برای کالیبراسیون این دستگاه باید از پنج محلول استاندارد استفاده کرد. این دستگاه بر اساس استاندارد جهانی USEPA180/1 نتایج آنالیز را ارائه می‌دهد. این مدل دارای سه دتکتور است که امکان

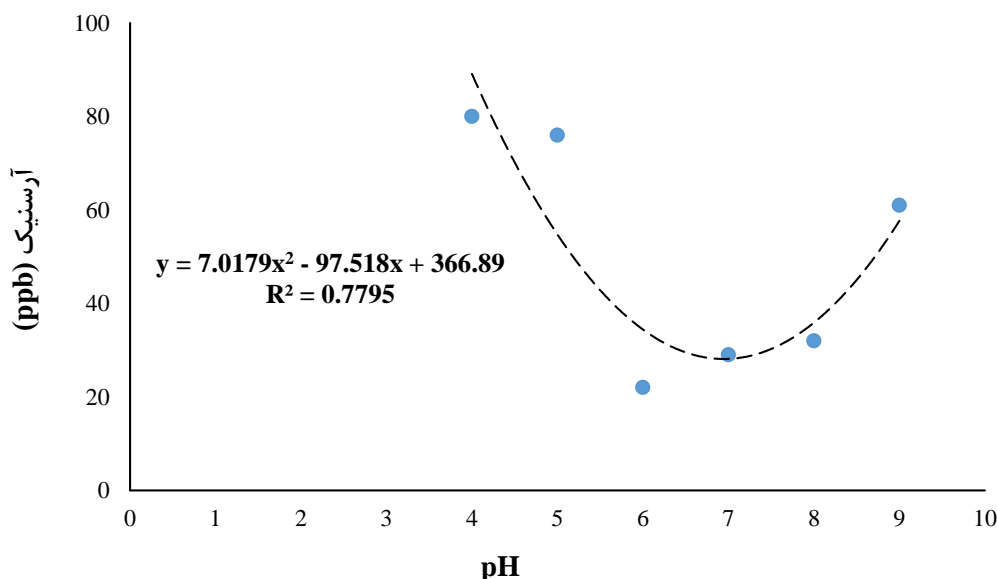
جدول ۱- مشخصات نمونه آب برداشت شده از چاه

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	آرسنیک (ppb)	۹۱
۲	pH	۸/۰۴
۳	EC (μcm)	۱۷۶۰
۴	کدورت (NTU)	۰/۲

۳-۱- مرحله اول: تعیین pH بهینه

مختلف با وجود منعقدکننده آلوم، بیشترین میزان حذف آرسنیک ۷۵/۸۲ درصد است که در میزان pH برابر با ۶ رخ داده است. پس در نتیجه pH بهینه برای منعقدکننده آلوم برابر با ۶ است.

در مرحله اول، آزمایش‌ها برای تعیین مقدار pH انجام شد. در این آزمایش مشاهده شد با توجه به تغییرات آرسنیک در pHهای



شکل ۱- تغییرات آرسنیک در pHهای مختلف برحسب منعقدکننده آلوم

جدول ۲- درصد حذف آرسنیک در pHهای مختلف برحسب منعقدکننده آلوم

pH	درصد حذف آرسنیک
۴	۱۲/۰۸
۵	۱۶/۴۸
۶	۷۵/۸۲
۷	۶۸/۱۳
۸	۶۴/۸۳
۹	۳۲/۹۶

یافته‌های جدول ۳، نشان دهنده خروجی SPSS مدنظر در این مبحث است که معنی‌داری کلی مدل رگرسیون را آزمون می‌کند. مقدار آماره آزمون معنی‌داری مدل همان آماره F با درجه آزادی ۱ است. البته با توجه به سطح معنی‌داری (p) مقدار آزمون که برابر ۰/۰۳۵ بوده و کمتر از ۰/۰۵ است فرض صفر با اطمینان ۹۵ درصد رد می‌شود. یعنی مدل موجود با اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بوده و براساس داده‌های موجود این مدل قادر به بیان تغییرات آرسنیک است. آلوم در تغییرات آرسنیک در شرایط pH بهینه موثر است.

جدول ۳- تجزیه واریانس تغییرات آرسنیک در pHهای مختلف برحسب منعقدکننده آلوم

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
رگرسیون	۶۹۱/۴۲۹	۱	۶۹۱/۴۲۹	۱۰۸۳	۰/۰۰۳۵*
باقی مانده	۲۵۵۴/۵۷۱	۴	۶۳۸/۶۴۳		
مجموع	۳۲۴۶/۰۰۰	۵			

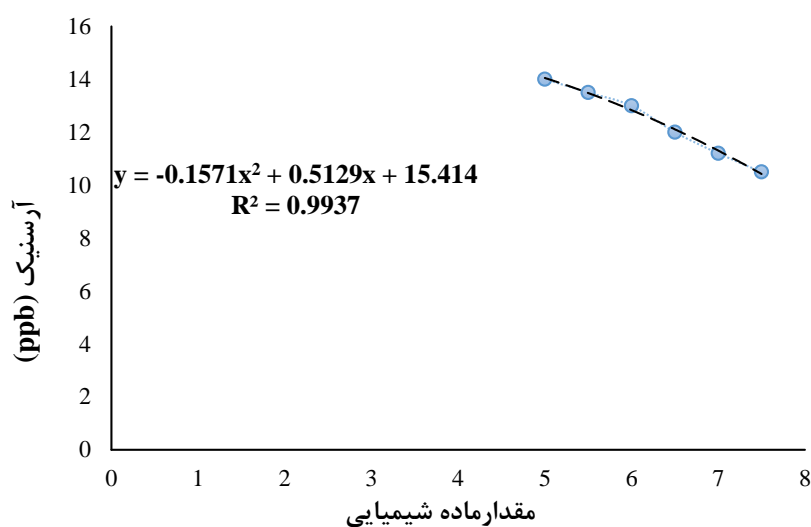
مقدار ۷/۵ میلی‌گرم بر لیتر با ۸۸/۴۶ درصد است.

۲-۳- مرحله دوم آزمایش: تعیین مقدار بهینه

مرحله پایانی برای رسیدن به شرایط بهینه در فرآیند انعقاد و لخته‌سازی تعیین مقدار است. بعد از به دست آوردن pH بهینه و تغییر نمونه مورد آزمایش میزان بهینه، مقدارهای مختلفی از منعقدکننده را به سیستم اضافه کرده تا فرآیند صورت گیرد. پس از اتمام مرحله مقدار بهینه با منعقدکننده آلوم، میزان آرسنیک تمام نمونه‌ها براساس مقدار منعقدکننده اندازه‌گیری شد (جدول ۴). طبق مشاهدات با افزایش مقدار منعقدکننده آلوم درصد میزان کاهش آرسنیک نیز کاهش می‌یابد، که بیشترین میزان حذف با

جدول ۴- درصد حذف آرسنیک بر حسب مقادیر منعقدکننده آلوم

مقدار ماده شیمیایی (mg/l)	درصد حذف آرسنیک
۵	۸۴/۶۱
۵/۵	۸۵/۱۶
۶	۸۵/۷۱
۶/۵	۸۶/۸۱
۷	۸۷/۶۹
۷/۵	۸۸/۴۶



شکل ۲- تغییرات آرسنیک برحسب واحد مقدار ماده منعقدکننده آلوم

F با درجه آزادی ۱ است. البته با توجه به سطح معنی‌داری (p) مقدار آزمون که برابر ۰/۰۰۰ بوده و کمتر از ۰/۰۵ است فرض

معنی‌دار بودن مدل کلی رگرسیون داده‌های آزمون در جدول ۵ ارائه شده است. مقدار آماره آزمون معنی‌داری مدل همان آماره

مدل قادر به بیان تغییرات آرسنیک است.

صفر با اطمینان ۹۵ درصد رد می‌شود یعنی مدل موجود با اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بوده و براساس داده‌های موجود این

جدول ۵- جدول تجزیه واریانس تغییرات آرسنیک بر حسب مقدار منعقدکننده آلوم

Sig.	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مدل
.۰۰۰*	۷۳۹/۳۱۵	۹/۲۷	۱	۹/۷۱	رگرسیون
		۰/۲۹	۴	۰/۱۱۷	باقی مانده
			۵	۹/۳۳	مجموع

آزمایش برحسب مقدار منعقدکننده آلوم، سطح معنی‌داری (p) برابر ۰/۰۰۸ بوده و کمتر از ۰/۰۵ است فرض صفر با اطمینان ۰/۹۵ درصد رد می‌شود. یعنی مدل موجود با اطمینان ۰/۹۵ درصد معنی‌دار بوده و براساس داده‌های موجود این مدل قادر به بیان تغییرات pH است. در آزمایش‌های مربوط به بررسی تغییرات آرسنیک برحسب مقدار منعقدکننده آلوم، مقدار سطح معنی‌داری (p) آزمون برابر ۰/۰۰۰ بوده و کمتر از ۰/۰۵ است، فرض صفر با اطمینان ۰/۹۵ درصد رد می‌شود. یعنی مدل موجود با اطمینان ۰/۹۵ درصد معنی‌دار بوده و براساس داده‌های موجود این مدل قادر به بیان تغییرات آرسنیک است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به منظور بررسی حذف آرسنیک از آب آشامیدنی با استفاده از روش انعقاد و لخته‌سازی انجام گرفت. ماده منعقدکننده مورد استفاده در آزمایش آلوم بود. در روش انعقاد و لخته‌سازی برای حذف آرسنیک تعیین pH بهینه و مقدار بهینه از اهمیت بالایی برخوردار است که کمتر و بیشتر از مقدار بهینه باعث کاهش حذف آلاینده می‌شود. زیرا در مقدار بهینه لجن‌های ریزتری تشکیل شده و مقدار بیشتری آرسنیک از آب آشامیدنی حذف می‌شود. نتایج به دست آمده در مرحله اول آزمایش pH بهینه نشان داد زمانی که pH برابر ۶ باشد بیشترین کاهش در مقدار آرسنیک رخ می‌دهد. بعد از تعیین pH بهینه، مرحله دوم آزمایش یعنی مقدار بهینه ماده منعقدکننده تعیین شد. نتایج به دست آمده در این مرحله با وجود pH بهینه تعیین شد. براساس مشاهدات با افزایش مقدار منعقدکننده آلوم درصد میزان کاهش آرسنیک نیز افزایش می‌یابد، که در نتیجه آن بیشترین میزان حذف با مقدار ۷/۵ میلی‌گرم بر لیتر با درصد حذف آرسنیک ۸۸/۴۶ محاسبه شد. در نتیجه در حذف آرسنیک از آب آشامیدنی به وسیله ماده منعقدکننده آلوم نتایج قابل قبولی به دست آمد. در پژوهشی که توسط هاشمی و همکاران (۱۳۹۵) برای حذف آرسنیک به روش انعقاد و لخته‌سازی از آب آشامیدنی صورت گرفت pH بهینه برابر ۶/۴ و غلظت بهینه منعقدکننده آلوم ۱۴۱/۵۱ ppm به دست آمد که در نتیجه آن بیشترین درصد حذف آرسنیک ۷۹ درصد محاسبه شد. بذرافشان و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از عصاره دانه بنه به عنوان کمک منعقدکننده و منعقدکننده کلورفریک و pH برابر ۶ توانستند آرسنیک را تا ۹۴ درصد از آب آشامیدنی حذف کنند. در پژوهش کریمی و همکاران (۱۴۰۱) با منعقدکننده کلورفریک pH بهینه با استفاده از آزمون جار تست ۶ به دست آمد و مقدار بهینه منعقدکننده ۶/۵ میلی‌گرم بر لیتر با درصد حذف ۹۸/۳۵ آرسنیک از آب آشامیدنی محاسبه شد. با توجه به آزمایش‌های مربوط به بررسی تغییرات pH بعد از

۵- مراجع

باغوند، ا.، رضازاده، نجمه، صالحی، م.، پورباور، م.، و دریابیگی، ع.، (۱۳۹۰)، "استفاده از فرایند لخته‌سازی و انعقاد در تصفیه آب آشامیدنی"، پنجمین همایش تخصصی مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران.

بذرافشان، ا.، کرد مصطفی‌پور، ف.، احمد آبادی، م.، و افشارنیا، م.، (۱۳۹۴)، "بررسی کارایی عصاره دانه بنه به عنوان یک کمک منعقدکننده طبیعی در حذف آرسنیک از محیط‌های آب"، نشریه پژوهش و سلامت، ۵(۱)، ۴۲-۴۹.

چالکش امیری، م.، (۱۴۰۲)، اصول تصفیه آب، چاپ شانزدهم، نشر ارکان دانش، اصفهان.

سلیمی، ف.، (۱۳۹۶)، "مروری بر فرآیند انعقاد شیمیایی برای حذف فلزات سنگین از آب"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۴(۴)، ۵۳-۴۱.

<https://doi.org/10.22112/JWWSE.2018.91145.1033>

کریمی، س.، اعتدالی رضانی، ه.، و ستوده‌نیا، ع.، (۱۴۰۱)، "بررسی حذف آرسنیک از آب آشامیدنی با استفاده از ماده منعقدکننده کلورفریک"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب،

- solutes”, *Environmental Science and Pollution Research*, 24(3), 2381-2393, <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7994-1>.
- Nicomel, N.R., Leus, K., Folens, K., Van Der Voort, P., and Du Laing, G., (2016), “Technologies for arsenic removal from water: Current status and future perspectives”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(1), 62, <https://doi.org/10.3390/ijerph13010062>.
- Mólgora, C.C., Dominguez, A.M., Avila, E.M., Drogui, P., and Buelna, G., (2013), “Removal of arsenic from drinking water: A comparative study between electrocoagulation- microfiltration and chemical coagulation-microfiltration process”, *Separation and Purification Technology*, 118, 645-651, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.08.011>.
- Pio, I., Scarlino, A., Bloise, E., Mele, G., Santoro, O., Pastore, T., and Santoro, D., (2015), “Efficient removal of low- arsenic concentrations from drinking water by combined coagulation and adsorption processes”, *Separation and Purification Technology*, 147, 284-291, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.05.002>.
- Rajkumar, M., Ae, N., Prasad, M.N.V., and Freitas, H., (2010), “Potential of siderophore-producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction”, *Trends in Biotechnology*, 28(3), 142-149, <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.12.002>.
- Song, S., Lopez-Valdivieso, A., Hernandez-campos, D.J., Peng, C., and Monroy-Fernandez, M.G., (2006), “Arsenic removal from high-arsenic water by enhanced coagulation with ferric and coarse calcite”, *Water Research*, 40(2), 364-372, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.09.046>.
- Street, J.J., Lindzay, W.L., and Sabey, B.R., (1977), “Solubility and plant uptake of cadmium in soils amended with cadmium and sewage sludge”, *Journal of Environmental Quality*, 6(1), 72-77, <https://doi.org/10.2134/jeq1977.0047242500060001016x>.
- World Health Organization (WHO), (2011), *Guidelines for drinking-water quality*, 4th Edition, 631 p, Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>.
- Zade, P.D., and Dharmadhikari, D.M., (2007), “Removal of arsenic as arsenite from groundwater/wastewater as stable metal ferrite”, *Journal of Environmental Science and Health*, 42(8), 1073-1079, <https://doi.org/10.1080/10934520701418565>.
- هاشمی، م.، مهدیارفر، م.، و آهنجی، ا.، (۱۳۹۵)، “بهبودسازی عوامل موثر در حذف آرسنیک از آب آشامیدنی به روش انعقاد و لخته‌سازی”، سومین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در شیمی و مهندسی شیمی، کنفدراسیون بین‌المللی مخترعان جهان (IFIA)، تهران.
- Ansari, R., Hassanzadeh, M., and Ostovar, F., (2017), “Arsenic removal from water samples using CeO₂/Fe₂O₃ Nanocomposite”, *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 13(4), 335-345.
- Baroni, F., Boscagli, A., Protano, G., and Riccobono, F., (2000), “Antimony accumulation in *Achillea ageratum*, *Plantago lanceolata* and *Silene vulgaris* growing in an old Sb-mining area”, *Environmental Pollution*, 109(2), 347-352.
- Choong, T.S., Chuah, T.G., Robiah, Y., Koay, F.G., and Azni, I., (2007). “Arsenic toxicity, health hazards and removal techniques from water: An overview”, *Desalination*, 217(1-3), 139-166.
- Goswami, A., Raul, P.K., and Purkait, M.K., (2012), “Arsenic adsorption using copper (II) oxide nanoparticles”, *Chemical Engineering Research and Design*, 90(9), 1387-1396, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.12.006>.
- Grover, K., Komarneni, S., and Katsuki, H., (2010), “Synthetic hydroxalite-type and hydrocalumite-type layered double hydroxides for arsenate uptake”, *Applied Clay Science*, 48(4), 631-637, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.03.017>.
- Guo, H., Stüben, D., and Berner, Z., (2007), “Adsorption of Arsenic (III) and Arsenic (V) from groundwater using natural siderite as the adsorbent”, *Journal of Colloid and Interface Science*, 315(1), 47-53, <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.06.035>.
- Hu, C., Lio, H., Chen, G., and Qu, J., (2012), “Effect of aluminum speciation on arsenic removal during coagulation process”, *Separation and Purification Technology*, 89, 55-40, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.10.017>.
- Jong, T., and Parry D.L., (2003), “Removal of sulfate and heavy metals by sulfate reducing bacteria in short term bench scale upflow anaerobic packed bed reactor runs”, *Water Research*, 37(14), 3379-3389, [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00165-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00165-9).
- Karim, M., (2000), “Arsenic in groundwater and health problems in Bangladesh”, *Water Research*, 34(1), 304-310, [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00128-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00128-1).
- Kim, M.J., and Nriagu, J., (2000), “Oxidation of Arsenite in groundwater using ozone and oxygen”, *Science of The Total Environment*, 247(1), 71-79, [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00470-2](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00470-2).
- Kong, Y., Kang, J., Shen, J., Chen, Z., and Fan, L., (2017), “Influence of humic acid on the removal of arsenate and arsenic by ferric chloride: Effects of pH, As/Fe ratio, initial As concentration, and co-existing



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

Grey Water Quantity and Quality Assessment (Case Study: Isfahan University Dormitories)

برآورد کمی و کیفی پساب خاکستری (مطالعه موردی: مجموعه خوابگاهی دانشگاه اصفهان)

Shervin Jamshidi¹ and Ali Dehnavi^{1*}

شروین جمشیدی^۱ و علی دهنوی^{۱*}

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

* Corresponding Author, Email: a.dehnavi@eng.ui.ac.ir

* نویسنده مسئول، ایمیل: a.dehnavi@eng.ui.ac.ir

Received: 24/02/2023

Revised: 28/04/2023

Accepted: 10/05/2023

© IWVA

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۴

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

In this study, the quantity and quality of Grey Water (GW) were surveyed in the dormitories of Isfahan University by the aim of its reuse. For this purpose, the non-potable water consumption (bathing and washing clothes) was monitored in both boys and girls dormitories, where its variations were evaluated daily in the academic semesters (October-November and May-June) alongside its quality. Results showed that the average daily GW production of students is 111 liters per capita per day, in which by considering 4400 residents in the dormitories, this wastewater can supply at least 10% of the water required for the irrigation of campus green areas. It was also indicated that the daily average grey water production of girls' dormitories per capita was significantly higher about 20% than boys'. In addition, the daily grey water production per capita of students on weekends was significantly higher than the other days about 16%. Based on these data, the daily and hourly peak coefficients of grey water production were about 1.16 and 1.25, respectively. The quality analysis of discharged grey water showed that the average concentrations of BOD, COD and TSS were 65, 142 and 52 mg/L, respectively, which has a relatively low biodegradability and suspended solids.

در این پژوهش، وضعیت کمی و کیفی پساب خاکستری در خوابگاه‌های دانشگاه اصفهان با هدف استفاده مجدد از آن مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، مصرف آب غیرشرب (استحمام و شستشوی لباس) به تفکیک خوابگاه برادران و خواهران، طی روزهای هفته و کیفیت پساب در طول ترم تحصیلی (مهر-آبان و اردیبهشت-خرداد) با نمونه‌برداری از منهول خروجی حمام‌ها پایش شد. نتایج نشان داد که سرانه متوسط مصرف آب غیرشرب و تولید پساب خاکستری دانشجویان ۱۱۱ لیتر به ازای هر نفر در روز است که با احتساب ۴۴۰۰ نفر ساکن در خوابگاه‌ها، پساب تولیدی می‌تواند حداقل ۱۰٪ نیاز آبی فضای سبز دانشگاه را تامین کند. هم‌چنین مشخص شد سرانه تولید پساب خاکستری دختران ۲۰٪ بیشتر از پسران بوده و این اختلاف قابل‌ملاحظه است. به‌علاوه، سرانه تولید پساب خاکستری در آخر هفته (پنجشنبه و جمعه) به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای (۱۶٪) بیشتر از سایر روزها است. بر این اساس، ضرایب حداکثر روزانه و ساعتی تولید پساب خاکستری به‌ترتیب ۱/۱۶ و ۱/۲۵ برآورد شد. آنالیز کیفی پساب خاکستری نیز نشان داد که غلظت متوسط آلاینده‌های BOD، COD و TSS در این پساب به‌ترتیب برابر ۶۵، ۱۴۲ و ۵۲ میلی‌گرم بر لیتر است که میزان تجزیه‌پذیری بیولوژیکی و ذرات معلق نسبتاً کمی دارد.

Keywords: Green University, Grey Water, Sustainability, Wastewater Treatment and Reuse, Water Consumption.

کلمات کلیدی: پساب خاکستری، مصرف آب، تصفیه و بازیافت فاضلاب، دانشگاه سبز، پایداری.

شهری مانند شستشوی خیابان، کارواش، آبیاری فضای سبز، آتش‌نشانی، سرویس‌های بهداشتی عمومی و سایر موارد از جمله، استفاده در فلاش‌تانک‌ها، کشت محصولات غیرخوراکی (مانند پرورش گل و چوب) است (Al-Ghaitidak and Yadav, 2013; Husseini et al., 2021).

تاکید شده است که در استفاده از این پساب برای آبیاری مزارع کشاورزی (غرقابی یا بارانی)، ساخت و ساز (مانند تولید بتن) و کارواش، به دلیل تماس با افراد و کارگران، ضروری است میزان BOD و COD، تخم‌انگل و کلیفرم پساب پس از استفاده از فرآیندهای تصفیه مناسب، اندازه‌گیری شود و به‌طور مستقیم مورد استفاده قرار نگیرد (Elhegazy and Eid, 2020). در جدول ۱، مقادیر نمونه مهم‌ترین شاخص‌های کیفی پساب خاکستری مطابق مراجع آمده است. می‌توان مشاهده کرد که کیفیت پساب خاکستری تابع منبع تولید (استحمام، آشپزخانه یا لباس‌شویی) است که می‌تواند متاثر از مصرف شوینده‌ها و میزان مصرف آب باشد. به‌علاوه مولفه‌هایی مانند موقعیت جغرافیایی، سطح بهداشت، فرهنگ و رفاه اقتصادی نیز می‌تواند بر کیفیت پساب خاکستری موثر باشد (Al-Jayyousi, 2003; Albalawneh and Chang, 2015).

با توجه به میزان آلودگی پساب خاکستری مطابق جدول ۱، در تحقیقات و پژوهش‌های مرتبط، روش‌های مختلفی برای تصفیه پساب خاکستری پیشنهاد شده است. از آنجایی که یکی از مشکلات بازچرخانی پساب خاکستری جداسازی آن از سایر فاضلاب‌ها در محل تولید و نیاز به احداث شبکه مجزا برای انتقال و تصفیه است، پیشنهاد شده است که تصفیه به‌صورت درجا و بازچرخانی پساب خاکستری به‌صورت غیرمتمرکز انجام شود. با توجه به قابلیت تصفیه و بازچرخانی درجای پساب خاکستری، استفاده از آن در منازل و شهرک‌های مسکونی، ادارات، رستوران‌ها، مجتمع‌های تفریحی و اقامتی (هتل‌ها و شهرهای بازی) برای افزایش پایداری در مناطق خشک و نیمه‌خشک ضروری است. به‌عنوان نمونه، برای تصفیه پساب خاکستری ادارات و منازل مسکونی در اسرائیل از روش‌های فیزیکیوشیمیایی شناورسازی، ته‌نشینی و فیلترشنی استفاده شده و حذف آلاینده‌های TSS، BOD و COD به ترتیب ۹۲٪، ۶۵٪ و ۹۴٪ به‌دست آمده است (Friedler and Alfiya, 2010).

در اردن، سیستم متوالی بی‌هوازی-هوازی برای تصفیه پساب خاکستری استفاده شد که عملکرد بی‌هوازی در حذف COD ۴۰٪ و هوازی ۶۰٪ بوده است (Abu Ghunmi et al., 2011). هم‌چنین با روش RBC، غلظت BOD و TSS در پساب خاکستری به ترتیب

در سال‌های اخیر، بازیافت پساب‌های تولیدی با توجه به مصرف بی‌رویه آب در بخش‌های مختلف شهری و روستایی، صنعت و نیز کشاورزی، علاوه بر این‌که در کانون توجه تحقیقات مربوطه قرار گرفته، به امری ضروری نیز تبدیل شده است. پساب خاکستری یکی از پساب‌هایی است که به‌علت حجم قابل‌توجه و نیز آلودگی میکروبی کمتر نسبت به فاضلاب خانگی، مورد توجه محققین مختلف برای بازیافت قرار گرفته است.

تاکنون تعاریف متفاوتی از پساب خاکستری و این‌که شامل چه فاضلاب‌هایی می‌شود، ارائه شده است. در برخی موارد، پساب خاکستری معادل فاضلاب بخش‌های مختلف ساختمان به جز (۱) توالت، (۲) سینک آشپزخانه حاوی باقی‌مانده غذایی خرد شده، (۳) ماشین ظرفشویی و (۴) با مواد مغذی زیاد در نظر گرفته شده است (Al-Jayyousi, 2003). اما به‌طور کلی و در اکثر مطالعات، پساب خاکستری شامل فاضلاب تولیدی از فعالیت‌های استحمام (دوش، وان، جکوزی، روشویی) تحت‌عنوان پساب خاکستری روشن^۱، به‌همراه شستشوی لباس (دستی یا ماشین لباسشویی) و سینک آشپزخانه تحت عنوان پساب خاکستری تیره^۲ است (Ghaitidak and Yadav, 2013). فاضلاب استحمام شامل شوینده‌ها (صابون و شامپو)، اوره، مو، پوست و چربی بدن، روغن مو، ترکیبات شن و ماسه است، اما فاضلاب آشپزخانه شامل دترجنت‌ها، چربی و روغن، بقایای غذا، آب گوشت، پوست میوه و سبزی، ذرات چای و قهوه و ترکیبات نگهدارنده مواد خوراکی است. فاضلاب شستشوی لباس نیز شامل دترجنت‌ها، روغن، حلال‌ها، رنگ، یاف سلولزی و پارچه‌ای است (Elhegazy and Eid, 2020).

به‌طور معمول و در مقایسه با پساب سیاه (فاضلاب توالت) تصور می‌شود که پساب خاکستری، عاری از آلاینده‌های میکروبی است اما باید توجه نمود برخی از محققان نشان دادند که در پساب خاکستری، انواع باکتری‌ها و پاتوژن‌ها وجود دارد که ممکن است در آنالیز متعارف پاتوژن‌ها، که با آزمایش کلیفرم مدفوعی انجام می‌شود، دیده نشوند و لذا لایه‌های بیوفیلمی جداره لوله‌ها، فیلترها و مخازن می‌تواند محلی برای تجمع آن‌ها باشد (Nagarkar et al., 2021). در دانشگاه ایالتی اوهایو طی دوره شیوع ویروس کرونا مشخص شد که این ویروس در پساب خاکستری خوابگاه‌های دانشگاه وجود دارد و میزان حضور ژن‌های فعال آن با غلظت TSS ارتباط مستقیمی دارد (Lu et al., 2022). بنابراین، مطابق رویکردهای بین‌المللی، کاربرد بازچرخانی پساب خاکستری در بخش غیرشرب و غذایی است و شامل انواع خدمات

حتی روش‌های اکسیداسیون پیشرفته استفاده شود (Kurniawan et al., 2021). در قالب بررسی‌های فنی-اقتصادی، هم‌چنین پیشنهاد شده است که از سیستم RBC برای تصفیه پساب خاکستری مجتمع‌های مسکونی کمتر از ۳۰ واحد (۷ طبقه) استفاده شود، در حالی که استفاده از MBR برای مجتمع‌های مسکونی بزرگتر (بیشتر از ۳۵ طبقه) توجیه اقتصادی خواهد داشت (Anuja et al., 2021).

بین ۹۳-۹۶٪ و ۸۴-۹۵٪ کاهش یافته است (Abdel-Kader, 2013). بنابراین، به نظر می‌رسد که برای تصفیه پساب خاکستری، انواع روش‌های کارآمد در دو دسته فیزیکی-شیمیایی و بیولوژیکی وجود دارد. به‌طور کلی پیشنهاد شده است که برای کاهش آلودگی پساب خاکستری با ترکیبات متعارف از فرآیندهای فیزیکی-شیمیایی (مانند انعقاد و فیلتراسیون) استفاده شده و در صورت وجود سورفاکتانت‌ها و ترکیبات آلی از فرآیندهای بیولوژیکی و

جدول ۱- مقادیر نمونه کیفیت پساب خاکستری به تفکیک منبع تولیدی

مرجع	غلظت آلاینده‌ها به تفکیک منبع پساب خاکستری			پارامتر کیفی	ردیف
	آشپزخانه	استحمام	شستشوی لباس		
Ghaitidak and Yadav (2013)	۶۲۵-۱۳۴	۷۸-۵۸	۳۱۵-۱۸۸	TSS (mg/L)	۱
Kurniawan et al. (2021)	۵۹	۷۴	۹۱		
(Shamabadi et al. (2015)	۸۹	۷۰	۱۲۲		
Ghaitidak and Yadav (2013)	۸۹۰-۴۱	۱۷۳-۱۲۹	۴۶۲-۴۴	BOD ₅ (mg/L)	۲
Kurniawan et al. (2021)	۱۳۶۳	۲۶۳	۸۳۱		
Shamabadi et al. (2015)	۱۳۰	۱۲۹	۱۱۵		
Delhiraja and Philip (2020)	۶۷۹	۲۷۳	۴۰۵	COD (mg/L)	۳
Ghaitidak and Yadav (2013)	۱۳۴۰-۵۸	۳۶۷-۲۳۰	۱۳۳۹-۵۸		
Kurniawan et al. (2021)	۲۰۷۲	۳۹۰	۱۱۱۹		
(Delhiraja and Philip (2020)	۱۵۰۷	۵۴۴	۸۰۳		
Shamabadi et al. (2015)	۳۰۰	۲۹۱	۳۰۵		

استفاده شد که غلظت COD طی یک دوره یک ساعته، تا ۸۵٪ کاهش یافت که این عملکرد با استفاده از روش تکمیلی اوزن‌زنی و اشعه فرابنفش به ۹۵٪ افزایش یافت (Barzegar et al., 2019). مطالعات فوق نشان می‌دهد که مطالعات متعددی برای شناسایی عملکرد فناوری‌های مختلف تصفیه درجا پساب خاکستری، حتی در خوابگاه‌های دانشجویی، انجام شده است. در اکثر این پژوهش‌ها، حذف آلاینده‌ها بدون احتساب نوسانات کمی و کیفی پساب خاکستری و با متوسط‌گیری و بعضاً در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است. یک نیاز اساسی بهره‌برداری مناسب از سیستم‌های تصفیه درجا و غیرمتمرکز، ضرورت سازگاری با نوسانات احتمالی کمی و کیفی پساب ورودی و منطبق با خصوصیات پساب خاکستری همان منطقه است. به‌عنوان نمونه، انتظار می‌رود خوابگاه‌های دانشجویی به‌عنوان محل زندگی موقت دانشجویان با فرهنگ‌های مختلف، سطح بهداشت نسبتاً بالا و قشر جوان و با توان مالی ناچیز، از پساب خاکستری با کمیت و کیفیت متفاوت از پساب خاکستری شهری برخوردار باشند. از آنجایی که پیش نیاز طراحی فرآیندی برای تصفیه پساب خاکستری، چگونگی استفاده از آن و غیره، مستلزم اطلاع کافی از کمیت و کیفیت آن است، لذا یکی از هدف‌گذاری‌ها در پژوهش‌های مرتبط

مجتمع‌های دانشگاهی و خوابگاه‌های دانشجویی یکی از مناطقی است که پتانسیل تصفیه درجا و بازچرخانی پساب خاکستری را دارد. در دانشگاه شارجه امارات و به‌منظور ارتقای پایداری، اقداماتی از جمله تفکیک پساب خاکستری مجتمع خوابگاه‌های دانشگاه و تصفیه آن به‌روش فیلتراسیون برای آبیاری فضای سبز انجام شده است (Siddique et al., 2021). این درحالی است که این دانشگاه تصفیه‌خانه فاضلاب مجزا برای تصفیه پساب سیاه به‌روش بیولوژیکی نیز دارد. انعقاد و فیلتراسیون پساب خاکستری استحمام دانش‌آموزان در کشور غنا توانسته است غلظت TSS را تا ۹۰٪ کاهش دهد (Kwabena Ntibrey et al., 2020).

در مقیاس آزمایشگاهی، فیلتر شنی و کربن فعال تا ۶۵٪ غلظت COD پساب خاکستری خوابگاهی در اتیوپی را کاهش داده (Tusiime et al., 2022) و در کشور مصر، سیستم بیوراکتور غشایی (MBR) آلاینده‌های TSS، COD و سورفاکتانت‌ها در پساب خاکستری مجموعه خوابگاه‌های دانشجویی را به‌ترتیب ۹۰٪، ۹۵٪ و ۸۰٪ حذف کرده است (Smith and Bani-Melhem, 2012). در ایران نیز با هدف بازچرخانی پساب خاکستری خوابگاه دانشجویی در آبادان، از روش انعقاد الکتریکی

بررسی همه آن‌ها، یکی از خوابگاه‌های خواهران (نیک‌نژادی) و نیز یکی از خوابگاه‌های برادران (شهید رجائی) انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت و سپس، نتایج برای سایر خوابگاه‌های دانشگاه تعمیم داده شد. خوابگاه شهید رجایی با ظرفیت ۳۸۰ نفر در دو فاصله زمانی (مهر و اردیبهشت) و نیز خوابگاه شهید نیک‌نژادی با ظرفیت ۲۰۰ نفر در دو فاصله‌ی زمانی (اردیبهشت و خرداد) از نظر کمی، میزان مصرف آب و تولید پساب خاکستری مورد ارزیابی قرار گرفتند. اطلاعات خوابگاه‌های دانشجویی دانشگاه اصفهان بعنوان محدوده‌ی مورد مطالعه در جدول ۲ آمده است. شایان ذکر است که در دانشگاه اصفهان، در حدود ۱۰۰ هکتار فضای سبز شامل درختان غیرمثمر و مثمر از جمله زیتون، توت، انجیر، انار، گردو، آلودچه و بادام وجود داشته که بخش مثمر، ۳۴٪ مساحت فضای سبز دانشگاه و ۲۱٪ نیاز آبی سالانه را در بر می‌گیرد. از طرفی، درختان سرو و کاج، درختچه‌های زینتی (مانند شمشاد)، چمن و گل نیز مابقی فضای سبز را شامل می‌شود. در این جا بیشترین میزان نیاز آبی سالانه متعلق به چمن است که ۷۲٪ نیاز آبی سالانه را شامل می‌شود.

و خصوصاً کشورهای کمتر توسعه‌یافته، می‌تواند بررسی کمی و کیفی پساب خاکستری باشد.

هدف این پژوهش بررسی کمی و کیفی پساب خاکستری تولیدی خوابگاه‌های دانشجویی دانشگاه اصفهان با جمعیتی در حدود ۴۴۰۰ نفر است. در این خصوص، ضمن بررسی مصرف آب غیر شرب، دبی پساب خاکستری تولیدی و نیز کیفیت آن ارزیابی شده و با مراجع معتبر و مرتبط، مورد مقایسه قرار گرفته است. آنالیز کمی به تفکیک محل استقرار دانشجویان آقا و خانم و طی روزهای هفته اطلاعات ارزشمندی از ویژگی‌های پساب خوابگاهی ارائه نموده که در ادامه به روش آنالیزها و نتایج حاصل اشاره شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی مطالعه موردی

مطالعه حاضر متمرکز بر آنالیز کمی و کیفی پساب خاکستری تولیدی خوابگاه‌های دانشجویی دانشگاه اصفهان است. در این تحقیق و با توجه به زیاد بودن تعداد خوابگاه‌ها و عدم امکان

جدول ۲- آمار ظرفیت خوابگاه‌های خواهران و برادران دانشگاه اصفهان به تفکیک

نام خوابگاه (خواهران)	تعداد دانشجوی	نام خوابگاه (برادران)	تعداد دانشجوی
نور	۲۸۸	شهید فهمیده	۳۸۴
کوثر	۶۸۲	سلیمان خاطر	۱۶۰
شهید علم‌الهدی	۹۶۰	شهید مفتح	۳۸۰
شهید نیک‌نژادی	۲۰۰	شهید رجایی	۳۸۰
همدانیان	۲۰۴	شهید تندگویان	۳۸۰
-	-	شهید باهنر	۳۸۴
جمع کل	۲۳۳۴	جمع کل	۱۶۸۴

فصلی در تحلیل لحاظ شده باشد.

در خوابگاه‌های دانشگاه اصفهان، دو نوع لوله‌کشی شامل آب شرب و آب غیرشرب (بهداشتی) وجود دارد که نوع دوم برای مصارفی از جمله استحمام است که مستقیماً پساب خاکستری تولید می‌کند. در تحقیق حاضر، بررسی‌ها بر آب غیرشرب و پساب خاکستری تولیدی از آن متمرکز بوده است. شایان ذکر است، از آن‌جایی که پخت غذا در سلف مرکزی دانشگاه صورت می‌پذیرد، پخت و پز و در نتیجه پساب خاکستری تولیدی در آشپزخانه در خوابگاه‌های مورد بررسی به‌مقدار قابل توجه وجود ندارد. بنابراین، بیشترین میزان پساب خاکستری تولیدی در حمام تولید می‌شود که محلی برای شستشوی لباس نیز هست و برای آن، محلی جداگانه وجود ندارد. بنابراین، پساب خاکستری تولیدی از حمام‌ها

۲-۲- روش و پارامترهای مورد مطالعه

برای بررسی میزان کمی آب مصرفی، کنتور ۱/۲ اینچ مدل SIMW در خطوط آب غیرشرب خوابگاه‌های پایلوت نصب شد و مقادیر مصرف آب غیرشرب و معادل آن یعنی تولید پساب خاکستری در بازه زمانی ۴ ساعته در هر شبانه‌روز در طول دوره مورد بررسی، برحسب لیتر ثبت شد. قابل ذکر این‌که دوره‌های زمانی موردنظر به‌نحوی انتخاب شد که روزهای تعطیل و غیرتعطیل در طول نیمسال‌های تحصیلی را شامل شود تا تغییرات مصرف آب و تولید پساب خاکستری تحت این شرایط قابل برآورد باشد. هم‌چنین، پایش مصرف و نمونه‌برداری طی دو هفته در مهرماه و آبان‌ماه سال ۱۳۹۳ و دو هفته در اردیبهشت و خرداد سال ۱۳۹۴ انجام شد تا اثر نیمسال‌های اول و دوم و نیز شرایط

جدول ۳- متوسط دانشجویان ساکن در خوابگاه (نفر) در دوره نمونه برداری به تفکیک روزهای هفته

روز هفته	خوابگاه نیک‌نژادی (خواهران)	خوابگاه رجائی (برادران)
شنبه	۹۸	۲۷۰
یکشنبه	۱۰۶	۲۷۴
دوشنبه	۱۰۷	۲۷۹
سه شنبه	۹۰	۲۷۰
چهارشنبه	۷۸	۲۹۷
پنج شنبه	۷۳	۲۸۸
جمعه	۸۲	۳۰۱

برای محاسبه ضریب حداکثر روزانه و ساعتی تولید پساب خاکستری، به ترتیب از روابط (۲) و (۳) استفاده شده است. در این روابط، ضریب پیک روزانه (C_p) براساس حداکثر مصرف روزانه در طول هفته به ازای متوسط مصرف هفتگی (q) برآورد شده است. در این رابطه، i : معرف در هفته (شنبه تا جمعه) است. همچنین ضریب پیک ساعتی (C_h) براساس حداکثر مصرف ساعتی در طول یک شبانه‌روز به ازای متوسط مصرف روزانه (q) برآورد شده است. در رابطه (۳)، z : معرف بازه‌های زمانی ۴ ساعته در طول شبانه‌روز است.

$$C_p = \frac{\text{Max}(Q_i)}{q} \quad (2)$$

$$C_h = \frac{\text{Max}(Q_j)}{q'} \quad (3)$$

به منظور مقایسه آماری داده‌های گردآوری شده، از روش آنالیز مقایسه واریانس تک‌مسیره با استفاده از نرم‌افزار Minitab19 استفاده شد. مطابق تعریف، سطح ۰/۰۵٪ معنی‌داری در شرایطی صدق می‌کند که شاخص P کمتر از ۰/۰۵ باشد.

۳- نتایج

بررسی داده‌های برداشت شده کمی به تفکیک خوابگاه‌های دختران و پسران نشان می‌دهد که متوسط سرانه مصرف آب غیرشرب و تولید پساب خاکستری در خوابگاه‌های دختران برابر ۱۴۵ لیتر به ازای هر نفر در روز و خوابگاه پسران ۱۲۱ لیتر به ازای هر نفر در روز است. مطابق نتایج آنالیز مقایسه آماری تک‌مسیره مندرج در شکل ۱، می‌توان مشاهده نمود که اختلاف این مقادیر نیز در سطح ۰/۰۵٪ معنی‌دار است ($P = 0.004$). به عبارتی، متوسط سرانه مصرف روزانه دختران در حدود ۰/۲۰٪، بیشتر از پسران است.

شامل دو بخش استحمام و شستشوی لباس است و در نتیجه پساب خاکستری مورد بررسی شامل فعالیت استحمام و شستشوی لباس است و سایر موارد به علت ناچیز بودن یا عدم امکان جداسازی، مورد بررسی قرار نگرفته است.

شاخص‌های کیفی پساب خاکستری تولیدی نیز شامل COD محلول، BOD و TSS بوده که مطابق روش استاندارد نمونه‌برداری شده و در آزمایشگاه دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی اصفهان مورد آزمون قرار گرفت (APHA, 2017). برای اندازه‌گیری پارامتر BOD از دستگاه انکوباتور (دقت ۰/۱ درجه سانتیگراد) مطابق روش استاندارد 5210B، برای اندازه‌گیری TSS به روش استاندارد 2540D از ترازو (دقت یک میکروگرم) و آون استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری COD به صورت محلول، پس از عبور نمونه از کاغذ صافی مطابق روش استاندارد 5220D، از دستگاه CODmeter (با دقت ۱۰ میکروگرم) استفاده شد. برای نمونه‌برداری پساب خاکستری نیز از منهول خروجی مجموعه حمام‌های خوابگاه‌های شهید رجایی و نیک‌نژادی به صورت هفتگی از دو نقطه نمونه‌ها برداشت شد (در مجموع ۸ نمونه). به این منظور، حجم مناسب آزمایش در هر دوره زمانی برداشت و در دمای زیر ۴ درجه سلسیوس نگهداری می‌شد. سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه مورد نظر منتقل شد.

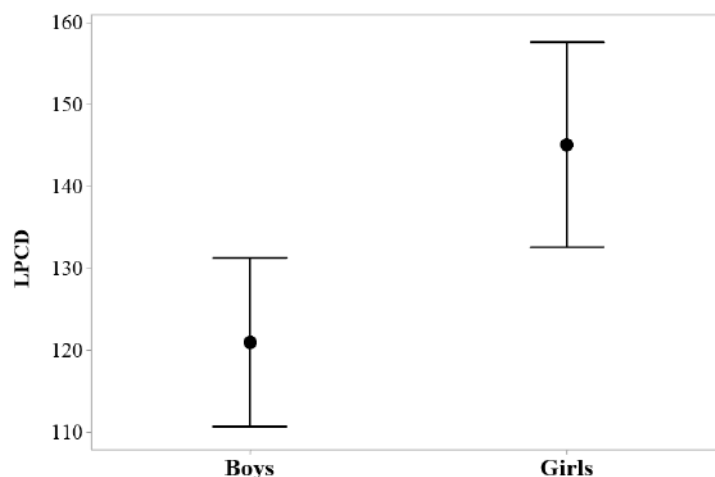
۳-۲- روش تحلیل و مقایسه داده‌ها

در این پژوهش و برای محاسبه سرانه مصرف آب غیرشرب و تولید پساب خاکستری (GW) برحسب لیتر به ازای هر نفر در روز (LPCD) از رابطه (۱) استفاده شده است. در این رابطه، میزان آب مصرفی غیرشرب قرائت شده با کنتورها (Q) برحسب لیتر در روز به تعداد دانشجویان حاضر در خوابگاه طی همان روز (P) تقسیم شده است. بدین منظور، تعداد دانشجویان ساکن خوابگاه دختران براساس آمار ورود و خروج روزانه و پسران براساس برآورد مسئولین مربوطه در همان روز لحاظ شده است. در جدول ۳، تعداد دانشجویان دو خوابگاه نیک‌نژادی و رجائی برای دوره مطالعه نشان داده شده است. بنابراین، در محاسبه سرانه تولید پساب خاکستری و برخلاف مطالعات گذشته که از کل ظرفیت خوابگاه استفاده می‌شده، از تعداد افراد حاضر در خوابگاه استفاده شده تا برآورد دقیق‌تری از سرانه مصرف در اختیار قرار دهد. براساس ظرفیت‌ها و ارقام جدول ۳ و مقایسه با ارقام مشابه جدول ۲، می‌توان مشاهده کرد که ۰/۴۵٪ ظرفیت خوابگاه دختران و ۰/۷۴٪ ظرفیت خوابگاه پسران در دوره مطالعه تکمیل بوده است.

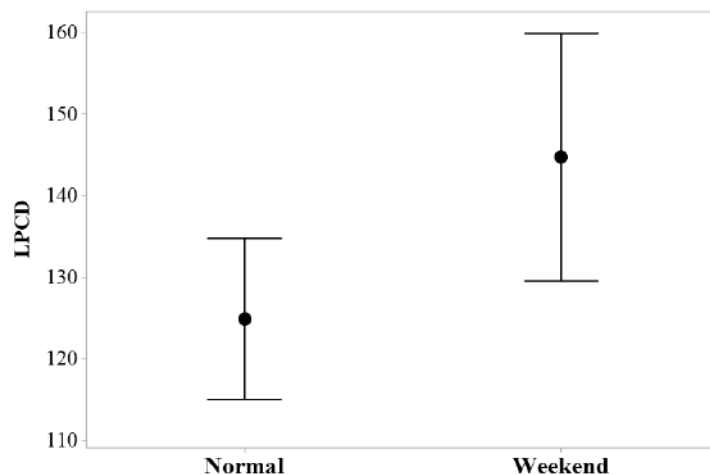
$$GW = \frac{Q}{P} \quad (1)$$

روز و برای روزهای غیر تعطیل، ۱۲۵ لیتر به ازای هر نفر در روز بوده است. به عبارتی، مصرف آب طی آخر هفته در مجتمع‌های خوابگاهی دانشگاه، شامل خوابگاه دختران و پسران، به ازای هر نفر، ۱۶٪ بیشتر از روزهای عادی در طی هفته بوده است (شکل ۲).

مقایسه داده‌های مصرف آب و تولید پساب خاکستری به تفکیک روزهای هفته نشان می‌دهد که مصرف آب در روزهای آخر هفته (پنجشنبه و جمعه) به نسبت روزهای متعارف هفته (شنبه تا چهارشنبه)، به صورت قابل ملاحظه بیشتر است ($P = 0.032$). براساس بررسی‌های انجام شده، متوسط سرانه مصرف روزانه در روزهای تعطیل آخر هفته، ۱۴۵ لیتر به ازای هر نفر در



شکل ۱- مقایسه سرانه تولید پساب خاکستری (لیتر به ازای هر نفر در روز) به تفکیک خوابگاه دختران و پسران



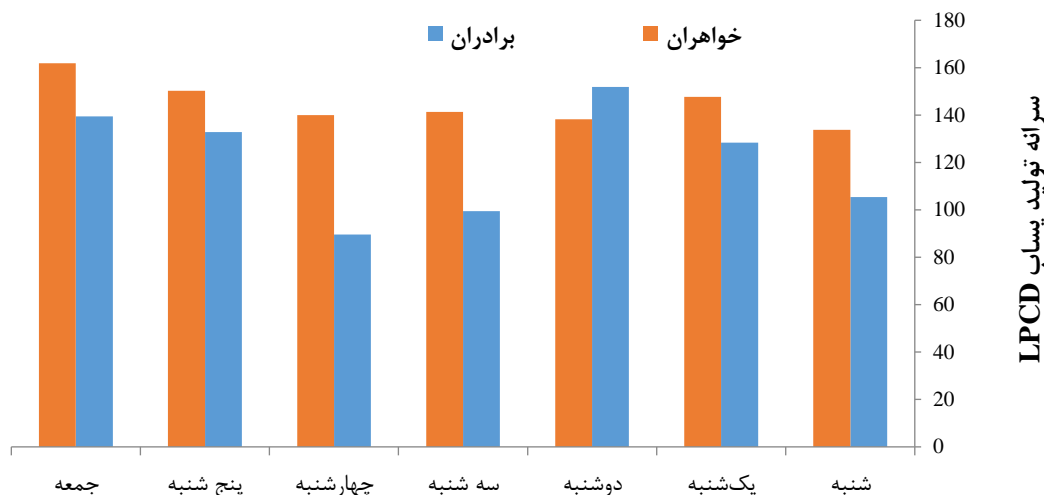
شکل ۲- مقایسه سرانه تولید پساب خاکستری (لیتر به ازای هر نفر در روز) در روزهای عادی و آخر هفته

استحمام می‌کنند و مصرف آب در آخر هفته به دلیل شستشوی لباس کمی افزایش می‌یابد، اما مصرف آب و تولید پساب خاکستری در خوابگاه پسران در روزهای دوشنبه و جمعه افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد، به طوری که انحراف معیار داده‌ها در طول هفته به ۲۸ واحد می‌رسد. به عبارتی، می‌توان نتیجه گرفت که دانشجویان پسر به طور متوسط هفته‌ای دو بار استحمام می‌کنند و روزهای آخر هفته مجدد به دلیل شستشوی لباس (پنجشنبه و

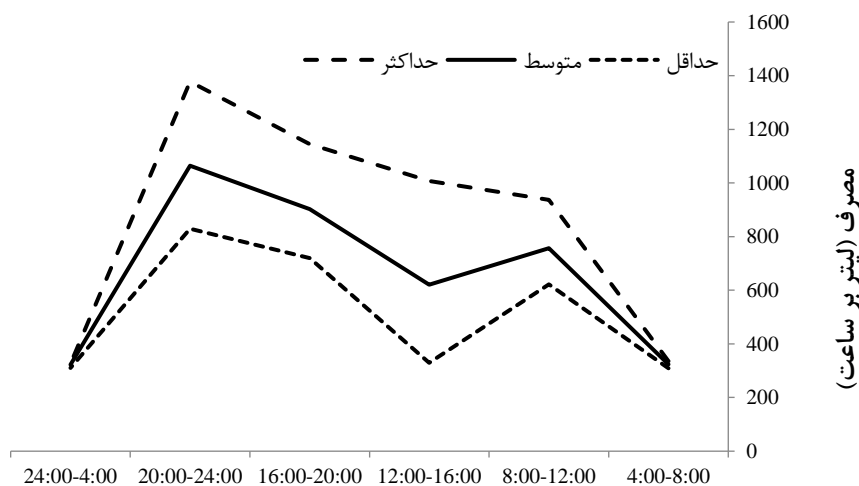
به منظور بررسی رفتار دانشجویان در استفاده از آب و در نتیجه تولید پساب خاکستری، متوسط سرانه مصرف روزانه به تفکیک روزهای هفته و به تفکیک خوابگاه پسران و دختران نیز مورد مقایسه قرار گرفت. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، رفتار مصرفی در خوابگاه دختران طی روزهای هفته نسبتاً ثابت و با انحراف معیار ۹ واحد است که در آخر هفته افزایش محسوسی پیدا می‌کند. به عبارتی، به نظر می‌رسد که دختران تقریباً روزانه

آب غیرشرب (دوره‌های ۴ ساعته) برای روزهای تعطیل و غیرتعطیل، می‌توان مشاهده کرد که حداکثر مصرف آب غیرشرب خوابگاه و تولید پساب خاکستری در بین ساعات ۸ تا ۱۲ شب اتفاق می‌افتد و مصرف در ساعات اولیه صبح به حداقل خودش می‌رسد. براین اساس، ضریب پیک ساعتی طی یک شبانه‌روز ۱/۲۵ برآورد شد.

جمعه) که ممکن است در طول هفته جمع شده باشد، افزایش محسوسی دارد. این رفتار بر ضرایب پیک روزانه مصرف آب و تولید پساب خاکستری موثر است. بر این اساس، به‌طور متوسط، ضریب پیک روزانه تولید پساب خاکستری در مجتمع خوابگاهی دانشگاه اصفهان ۱/۱۶ برآورد شده است که برای خوابگاه دختران ۱/۱ و برای پسران ۱/۳ است. در شکل ۴ و براساس داده‌های ساعتی قرائت شده از مصرف



شکل ۳- متوسط سرانه تولید پساب خاکستری طی روزهای هفته به تفکیک خوابگاه پسران و دختران



شکل ۴- نوسانات مصرف آب غیرشرب در خوابگاه طی یک شبانه‌روز

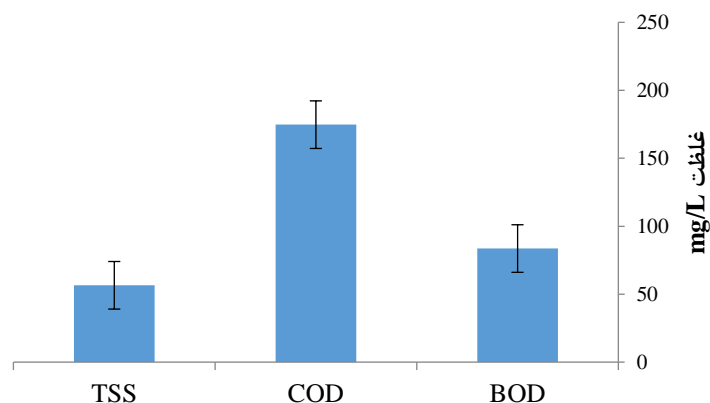
اصلاحی ۰/۸۳ مدنظر قرار گیرد؛ متوسط سرانه تولید پساب خاکستری دانشجویان خوابگاه در طول سال، ۱۱۱ لیتر به ازای هر نفر در روز است. با احتساب ۴۴۰۰ نفر ظرفیت کل دانشجویان ساکن خوابگاه‌ها، سالانه حداکثر در حدود ۱۷۸ هزار مترمکعب پساب خاکستری در خوابگاه‌های دانشگاه اصفهان تولید می‌شود

بنابراین، براساس جمیع داده‌های کمی، سرانه متوسط مصرف آب غیرشرب (استحمام و شستشوی لباس) و تولید پساب خاکستری در خوابگاه‌های دانشگاه اصفهان ۱۳۷ لیتر به ازای هر نفر در روز در طول ترم تحصیلی برآورد شد. در صورتی که ۱۰ هفته تعطیلی خوابگاه (تابستان، بین ترم و ایام عید)، با ضریب

تولیدی برای دوره مطالعاتی به ترتیب ۶۵، ۱۴۲ و ۵۲ میلی گرم بر لیتر برآورد شده است (شکل ۵). نسبت ۴۶٪ غلظت BOD به COD پساب خاکستری خام نشان از مقادیر کم ترکیبات آلی زود تجزیه پذیر در پساب خاکستری و به نسبت مقادیر بیشتر ترکیبات شیمیایی (مانند شوینده‌ها) آن است. بنابراین، استفاده از روش‌های تصفیه بیولوژیکی با زمان ماند کم (مانند لجن فعال متعارف) برای تصفیه در جای این پساب پیشنهاد نمی‌شود.

که می‌تواند برای تامین ۱۰ تا ۱۵٪ نیاز آبی سالانه فضای سبز دانشگاه مورد استفاده قرارگیرد. باید توجه داشت که رقم محاسباتی فوق صرفاً براساس ظرفیت کل (و نه ساکن) از مجتمع خوابگاهی دانشگاه بوده و سایر مراکز اداری و آموزشی و رستوران‌ها را هم شامل نمی‌شود.

در این پژوهش هم‌چنین کیفیت پساب خاکستری تولیدی در خوابگاه‌های دانشجویی مورد بررسی قرارگرفت. با توجه به نوسانات روزانه، متوسط غلظت BOD، COD و TSS پساب



شکل ۵- متوسط غلظت آلاینده‌های پساب خاکستری در خوابگاه‌های دانشگاه اصفهان

۴- بحث

غذا و انواع میان‌وعده و شستشوی ظروف ناشی می‌شود. در این خصوص، سهم استحمام ۴۷٪، شستشوی لباس ۲۶٪ و آشپزخانه ۲۷٪ از کل پساب خاکستری تولیدی است (Ghaitidak and Yadav, 2013). از طرفی، نمونه کشور یمن نشان می‌دهد که پساب خاکستری برای مناطق با کمبود آب و سطح بهداشت پایین می‌تواند تا ۲۰ تا ۳۰ لیتر در شبانه روز به ازای هر نفر نیز کاهش یابد که احتمالاً می‌تواند به‌عنوان حداقل سرانه تولید پساب خاکستری فرض شود (Albalawneh and Chang, 2015). به‌طور مشابه، در بررسی کمی و کیفی پساب خاکستری تولید شده از منازل مسکونی در کشور هند مشخص شد که میزان مصرف آب و تولید پساب به سطح رفاه و درآمد اقتصادی وابسته است. بر این اساس، سرانه مصرف آب بین ۷۷ تا ۱۴۹ لیتر به ازای هر نفر در روز و سرانه تولید پساب خاکستری (شامل مصارف شستشو لباس، استحمام و آشپزخانه) بین ۳۸ تا ۹۰ لیتر به ازای هر نفر در روز متغیر بوده است. لذا، ضریب تبدیل آب مصرفی به تولید پساب خاکستری در این کشور حدوداً بین ۵۰-۶۰٪ (متوسط ۵۴٪) است که ۳۶٪ به استحمام، ۱۲٪ به شستشوی لباس و ۶٪ به آشپزخانه اختصاص دارد (Delhiraja and Philip, 2020; Rakesh et al., 2020).

سهم ۵۰٪ پساب خاکستری از آب مصرفی به‌طور مشابه در

میزان پساب خاکستری تولیدی ارتباط مستقیمی با شیوه زندگی، رفتار اجتماعی و فرهنگی و میزان آب در دسترس دارد. بطور کلی و مطابق تحقیقات گذشته بین ۱۸ کشور، سهم پساب خاکستری از کل فاضلاب تولیدی بین ۲۳٪ تا ۸۷٪ (به‌طور متوسط ۶۴٪) برآورد شده و سرانه تولید پساب خاکستری به ازای هر نفر بین ۳۵ تا ۱۱۷ لیتر در روز (به‌طور متوسط ۷۲ لیتر در روز) است. هم‌چنین، ضریب تبدیل آب مصرفی به پساب خاکستری نیز بین ۳۱٪ تا ۸۷٪ (متوسط ۶۰٪) تخمین زده شده است (Ghaitidak and Yadav, 2013). سرانه تولید پساب خاکستری برای کشورهای در حال توسعه، مانند یمن، اردن، سنگال به‌ترتیب ۳۵، ۵۹، ۶۰ لیتر به ازای هر نفر در روز، برای کشورهای هندوستان و آفریقای جنوبی ۷۹ و ۸۰ لیتر، برای انگلستان و اسرائیل ۹۶ و ۹۸ لیتر، برای استرالیا ۱۱۷ لیتر و برای کشورهای آمریکای شمالی (ایالات متحده و کانادا) تا ۱۹۶ لیتر در روز می‌رسد (Ghaitidak and Yadav, 2013). بنابراین، افزایش سطح رفاه جامعه، سطح اقتصادی و دسترسی به آب، عواملی است که می‌تواند باعث افزایش سرانه تولید پساب خاکستری شود که از دفعات استحمام، استفاده از وان و جکوزی، شستشوی بیشتر لباس، دفعات صرف

جمعه مصرف به ۱۲۰ لیتر به ازای هر نفر در روز می‌رسد (Valentukeviciene and Rynkun, 2016). درحالی‌که در دانشگاه اصفهان، متوسط مصرف آب غیرشرب و تولید پساب خاکستری در روز چهارشنبه حداقل ۹۰ لیتر به ازای هر نفر در روز و در جمعه به حداکثر خود (۱۲۰ لیتر بازای هر نفر در روز) می‌رسد. بنابراین، در قالب همین مقایسه می‌توان به‌طور ضمنی نتیجه گرفت تولید پساب خاکستری به‌صورت روزانه در خوابگاه دختران تا حدودی عامل اختلاف قابل ملاحظه پساب خاکستری تولیدی دو دانشگاه است.

هم‌چنین غلظت BOD و COD پساب خاکستری در دانشگاه ویلنیوس لیتوانی به ترتیب ۱۱۳ و ۱۸۴ میلی‌گرم بر لیتر تعیین شد (Valentukeviciene and Rynkun, 2016). نسبت این دو پارامتر (برابر ۰/۶۱) در مقایسه با کیفیت پساب خاکستری تولیدی در دانشگاه اصفهان (نسبت ۰/۴۶) حاکی از تجزیه‌پذیری بیولوژیکی بالاتر پساب دانشگاه لیتوانی است. این اختلاف به دلیل لحاظ پساب آشپزخانه در دانشگاه لیتوانی و عدم لحاظ آن در دانشگاه اصفهان است. در جدول ۴، غلظت‌های آنالیز شده پساب خاکستری دانشگاه اصفهان (پژوهش حاضر) با سایر دانشگاه‌ها و مجتمع‌های خوابگاهی در ایران و خارج کشور مقایسه شده است.

اسرائیل نیز برآورد شده است (Anuja et al., 2021). بر این اساس، سرانه تولید پساب خاکستری خوابگاه‌های دانشگاه اصفهان با رقم متوسط ۱۱۱ لیتر به ازای هر نفر در روز، علیرغم نبود هرگونه استخر و وان و جکوزی یا عدم لحاظ مصرف آب آشپزخانه، در محدوده نسبتاً مرفه قرار می‌گیرد که می‌تواند ناشی رفتار دانشجویان به دلیل اسکان موقت و عدم مالکیت آن‌ها باشد، زیرا دانشجویان مسئول پرداخت آب‌بها نیستند. در بررسی کمی میزان پساب خاکستری تولیدی از خوابگاه‌های دانشجویی در کشور لیتوانی، مشخص شد که فقط متوسط سرانه استحمام بین ۴۰ تا ۴۸ لیتر به ازای هر نفر در روز بوده است (Valentukeviciene and Rynkun, 2016). در صورتی‌که سرانه مربوط به شستشوی لباس هم به این سرانه اضافه شود آنگاه ممکن است ارقام به سرانه تولید پساب خاکستری در دانشگاه اصفهان نزدیک شود. به نظر می‌رسد که تولید پساب خاکستری دانشگاه بالا است و باید به‌روش‌های فنی و غیرفنی (مانند آموزش و فرهنگی) کاهش یابد. هم‌چنین، مشابه آن‌چه در پژوهش حاضر نتیجه شد، سرانه مصرف آب در روزهای هفته در دانشگاه لیتوانی متفاوت است، به‌طوری‌که بیشترین مصرف در روز دوشنبه (اول هفته) در حدود ۱۴۰ لیتر به ازای هر نفر در روز و کمترین آن روزهای چهارشنبه و پنجشنبه (وسط هفته) در حدود ۶۰ لیتر به ازای هر نفر در روز است و

جدول ۴- غلظت آلاینده‌ها در پساب خاکستری مجتمع‌های دانشگاهی و خوابگاه‌ها

ردیف	محل دانشگاه	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	مرجع
۱	اردن	۹۶	۱۶۸	-	Al-Jayyousi (2003)
۲	ایالتی اوهایو آمریکا	-	-	۲۷۰۰-۵۰	Lu et al. (2022)
۳	لیتوانی	۱۱۳	۱۸۴	-	Valentukeviciene and Rynkun (2016)
۴	ترکیه	۶۷	۱۹۸	۱۳۹	Giresunlu and Beler Baykal (2016)
۵	چین	-	۲۹-۱۷	-	Diao (2020)
۶	اندونزی	۶۸-۳۷	۱۲۶-۸۶	-	Yulistyorini et al. (2019)
۷	نیشابور	۳۱۱	۴۶۷	۴۶۶	Gholipour and Stefanakis (2021)
۸	بیرجند	۲۱۰-۳۴	۵۲۹-۸۳	۶۸-۳۴	Kabiri, Akbarpour and Akbari (2021)
۹	دانشگاه اصفهان	۶۵	۱۴۲	۵۲	پژوهش حاضر

می‌تواند به دلیل اختلاط پساب سیاه و فاضلاب رستوران‌های دانشگاه با پساب خاکستری خوابگاه‌ها باشد که باعث شده مقادیر آلاینده‌ها تا نمونه فاضلاب‌های شهری افزایش یابد. زیرا مطابق پژوهش Delhiraja and Philip (2020) متوسط BOD و COD پساب خاکستری برای شستشوی لباس ۴۰۵ و ۸۰۳ میلی‌گرم بر لیتر، برای استحمام ۲۷۳ و ۵۴۴ میلی‌گرم بر لیتر و برای آشپزخانه، ۶۷۹ و ۱۵۰۷ میلی‌گرم بر لیتر تعیین شده است. بنابراین، استفاده از پساب خاکستری بدون تصفیه می‌تواند برای

به‌طور مقایسه‌ای، میزان BOD و COD پساب خوابگاه‌های دانشگاه اصفهان در بازه نمونه‌های مشابه در ترکیه، اندونزی و اردن (کشورهای مسلمان) است. حتی در ترکیه پیشنهاد شده است تا ضمن جداسازی پساب خاکستری از فاضلاب خانگی، پساب زرد نیز که حاوی ترکیبات اوره است، جدا جمع‌آوری شود تا قابلیت استفاده به‌عنوان ماده مغذی خاک داشته باشد (Baykal, 2019). مقادیر بالاتر دانشگاه‌های نیشابور و بیرجند در مقایسه با مطالعه حاضر یا مطالعات مشابه در کشورهای مسلمان،

متعادل سازی و شناورسازی، انعقاد و لخته سازی، اکسیداسیون پیشرفته به همراه تصفیه بیولوژیکی مبتنی بر رشد چسبیده پیشنهاد می شود.

۶- پی نوشتها

- 1- Light grey
- 2- Dark grey

۷- مراجع

- Abdel-Kader, A.M., (2013), "Studying the efficiency of grey water treatment by using rotating biological contactors system", *Journal of King Saud University, Engineering Sciences*, 25(2), 89-95, <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2012.05.003>.
- Abu Ghunmi, L., Zeeman, G., Fayyad, M., and van Lier, J.B., (2011), "Grey water biodegradability", *Biodegradation*, 22(1), 163-174, <https://doi.org/10.1007/s10532-010-9385-5>.
- Al-Husseini, T.H., Al-Anbari, R.H., and Al-Obaidy, A.H.M.J., (2021), "Greywater environmental management: A review", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 779(1), 1-11, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/779/1/012100>.
- Al-Jayyousi, O.R., (2003), "Greywater reuse: Towards sustainable water management", *Desalination*, 156(1-3), 181-192, [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00340-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00340-0).
- Albalawneh, A., and Chang, T.-K., (2015), "Review of the greywater and proposed greywater recycling scheme for agricultural irrigation reuses", *International Journal of Research, GRANTHAALAYAH*, 3(12), 6-35, <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v3.i12.2015.2882>.
- Anuja, J., Darshan, B., Saraswathi, G., and Meyyappan, N., (2021), "Study on reuse of grey water, A review", *Journal of Physics: Conference Series*, 1979(1), 1-7, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1979/1/012004>.
- APHA, (2017), *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 23rd Edition, Washington D.C., U.S.A: Water Environment Federation (WEF), American Public Health Association (APHA), American Water Work Association (AWWA).
- Barzegar, G., Wu, J., and Ghanbari, F., (2019), "Enhanced treatment of greywater using electrocoagulation/ozonation: Investigation of process parameters", *Process Safety and Environmental Protection*, 121(January), 125-132, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.10.013>.
- Baykal, B.B., (2019), "Recycling/reusing grey water and yellow water (Human urine): Motivations, perspectives and reflections into the future", *Desalination and Water Treatment*, 172(October

فضای سبز غیرمثمر دانشگاه مطابق استانداردهای موجود مورد استفاده قرار گیرد، اما در صورت تصفیه و بهره برداری مناسب، برای آبیاری درختان مثمر نیز قابل استفاده خواهد بود.

در مطالعه جامع ارزیابی رفتار محیطزیستی دانشجویان ساکن مجتمع های خوابگاهی، مشخص شد قصد و نیت دانشجویان، معادل مفهوم نگرش محیطزیستی (Jamshidi and Dehghani, 2021)، تعیین کننده رفتار محیطزیستی دانشجویان خواهد بود (Du and Pan, 2021). بنابراین، پیشنهاد می شود به منظور ارتقای سطح پایداری در مجتمع های دانشگاهی و خوابگاهی، علاوه بر اقدامات فنی مانند بازچرخانی پساب خاکستری، فعالیت های فرهنگی-آموزشی نیز برای ارتقای سطح سواد محیطزیستی دانشجویان صورت پذیرد.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش میزان مصرف آب غیرشرب و تولید پساب خاکستری براساس مصارف استحمام و شستشوی لباس در خوابگاه های دانشجویی دانشگاه اصفهان مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج این بررسی ها، این امکان فراهم شد تا سرانه تولید پساب خاکستری هر دانشجو به تفکیک جنسیت مشخص شده و تغییرات تولید پساب در طول شبانه روز و طی روزهای هفته (ایام تعطیل و غیرتعطیل) تعیین شود. بر این اساس، اولاً مشخص شد که سرانه تولید پساب خاکستری دانشجویان دختر نسبت به پسر بیشتر است و سرانه تولید این پساب نیز در ایام آخر بیشتر از ایام غیرتعطیل است. همچنین، متوسط سرانه تولید پساب خاکستری دانشجویان در محدوده مورد مطالعه به نسبت سرانه تولید پساب خاکستری در شهرهای دیگر کشورها نسبتاً بالا است و تقریباً معادل کشورهای مرفه است که می تواند به دلیل عدم تملک یا پرداخت آب بها توسط دانشجویان باشد. با این وجود، بازچرخانی پساب خاکستری پس از یک تصفیه مناسب می تواند بخشی از نیاز آبی فضای سبز دانشگاه را تامین نماید. به علاوه، آنالیز کیفی پساب خاکستری نشان داد که این پساب نسبتاً آلودگی زود تجزیه پذیر و ذرات معلق کمی در مقایسه با نمونه های مشابه دارد که می تواند به دلیل منشا تولید این پساب، رقیق بودن آلاینده ها در مقایسه با حجم پساب تولیدی و استفاده از انواع شوینده ها و عدم اختلاط با پساب آشپزخانه باشد. بنابراین، تصفیه پساب صرفاً مبتنی بر فرآیندهای بیولوژیکی با زمان ماند کم نمی تواند ترکیبات دیرتجزیه پذیر محلول را به خوبی تصفیه نماید. لذا، برای کنترل نوسانات جریان ورودی و کاهش آلودگی، استفاده از سیستم های

- senior high schools in Ghana", *Heliyon*, 6(8), e04627, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04627>.
- Lu, E., Ai, Y., Davis, A., Straathof, J., Halloran, K., Hull, N., Winston, R., Weir, M.H., Soller, J., Bohrerova, Z., Oglesbee, M., and Lee, J., (2022), "Wastewater surveillance of SARS-CoV-2 in dormitories as a part of comprehensive university campus COVID-19 monitoring", *Environmental Research*, 212(PE), 113580, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113580>.
- Nagarkar, M., Keely, S.P., Brinkman, N.E., and Garland, J.L., (2021), "Human- and infrastructure-associated bacteria in greywater", *Journal of Applied Microbiology*, 131(5), 2178-2192, <https://doi.org/10.1111/jam.15118>.
- Rakesh, S., Ramesh, D.P., Murugaragavan, D.R., Avudainayagam, D.S., and Karthikeyan, D.S., (2020), "Characterization and treatment of grey water: A review", *International Journal of Chemical Studies*, 8(1), 34-40, <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i1a.8316>.
- Shamabadi, N., Bakhtiari, H., Kochakian, N., and Farahani, M., (2015), "The investigation and designing of an onsite grey water treatment systems at Hazrat-e-Masoumeh university, Qom, Iran", *Energy Procedia*, 74(August), 1337-1346, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.780>.
- Siddique, M., Semerjian, L., Bettayeb, M.A., Al-Sadoon, Z., Al Jaberi, B.H., Eltarabishi, F., and AlSane, S.I., (2021), "Water conservation and management practices at the university of Sharjah to achieve sustainability excellence", *Journal of Sustainability Perspectives*, 1(2), 86-93, <https://doi.org/10.14710/jsp.2021.11746>.
- Smith, E., and Bani-Melhem, K., (2012), "Grey water characterization and treatment for reuse in an arid environment", *Water Science and Technology*, 66(1), 72-78, <https://doi.org/10.2166/wst.2012.167>.
- Tusiime, A., Solihu, H., Sekasi, J., and Mutanda, H.E., (2022), "Performance of lab-scale filtration system for grey water treatment and reuse", *Environmental Challenges*, 9(August), 100641, <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100641>.
- Valentukeviciene, M., and Rynkun, G., (2016), "Water reuse possibilities at students dormitories", *Annual Set The Environment Protection*, 18(August), 920-929.
- Yulistiyorini, A., Puspasari, A.K., Mujiyono, and Sari, A.A., (2019), "Removal of BOD and TSS of student dormitory greywater using vertical sub-surface flow constructed wetland of ipomoea aquatica", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 515(1), 1-6, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/515/1/012056>.
- (2018), 212-223, <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24667>.
- Delhiraja, K., and Philip, L., (2020), "Characterization of segregated greywater from Indian households: Part A: Physico-chemical and microbial parameters", *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(7), 428, <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08369-0>.
- Diao, L., (2020), "Application of MBR technology in schoolyard Ddomestic sewage treatment", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 526(1), 1-7, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/526/1/012002>.
- Du, J., and Pan, W., (2021), "Examining energy saving behaviors in student dormitories using an expanded theory of planned behavior", *Habitat International*, 107(September 2020), 102308, <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2020.102308>.
- Elhegazy, H., and Eid, M.M.M., (2020), "A state-of-the-art-review on grey water management: A survey from 2000 to 2020s", *Water Science and Technology*, 82(12), 2786-2797, <https://doi.org/10.2166/wst.2020.549>.
- Friedler, E., and Alfiya, Y., (2010), "Physicochemical treatment of office and public buildings greywater", *Water Science and Technology*, 62(10), 2357-2363, <https://doi.org/10.2166/wst.2010.499>.
- Ghaitidak, D.M., and Yadav, K.D., (2013), "Characteristics and treatment of greywater-a review", *Environmental Science and Pollution Research*, 20(5), 2795-2809, <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1533-0>.
- Gholipour, A., and Stefanakis, A.I., (2021), "A full-scale anaerobic baffled reactor and hybrid constructed wetland for university dormitory wastewater treatment and reuse in an arid and warm climate", *Ecological Engineering*, 170(July), 106360, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106360>.
- Giresunlu, E., and Beler Baykal, B., (2016), "A case study of the conversion of grey water to a flush water source in a Turkish student residence hall", *Water Supply*, 16(6), 1659-1667, <https://doi.org/10.2166/ws.2016.078>.
- Jamshidi, S., and Dehghani, H., (2021), "Water literacy evaluation in urban society (Case study: Isfahan City)", *Journal of Environmental Studies*, 46(4), 684-702.
- Kabiri, M., Akbarpour, A., and Akbari, M., (2021), "Evaluation of the efficiency of a gray water treatment system based on aeration and filtration", *Water Reuse*, 11(3), 361-372, <https://doi.org/10.2166/wrd.2021.084>.
- Kurniawan, S., Yuliwati, E., Ariyanto, E., Morsin, M., Sanudin, R., and Nafisah, S., (2021), "Greywater treatment technologies for aquaculture safety: Review", *Journal of King Saud University, Engineering Sciences*, 35(5), 327-334, <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.014>.
- Kwabena Ntibrey, R.A., Kuranchie, F.A., and Gyasi, S.F., (2020), "Antimicrobial and coagulation potential of Moringa oleifera seed powder coupled with sand filtration for treatment of bath wastewater from public



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

Investigating the Effect of the Sizes of CuO Nanomaterials on Improving the Water Flux and Antifouling Properties of PVDF Nanocomposite Ultrafiltration Membrane in Urban Wastewater Treatment

بررسی تاثیر ابعاد نانو مواد CuO در بهبود خواص آبدهی و گرفتگی غشای اولترافیلتراسیون نانوکامپوزیت PVDF در تصفیه فاضلاب شهری

Mahyar Pakan¹, Maryam Mirabi^{2*} and Alireza Valipour³

1- Ph.D. Student, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3- Senior Research Expert, and Head of the Treatment Processes Department, Water and Wastewater Research Center (WWRC), Water Research Institute (WRI), Tehran, Iran.

* Corresponding Author, Email: m_mirabi@sbu.ac.ir

مهیار پاکان^۱، مریم میرابی^{۲*} و علیرضا ولی پور^۳

۱- دانشجوی دکتری دانشکده عمران، آب و مهندسی محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- استادیار دانشکده عمران، آب و مهندسی محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳- کارشناس پژوهشی و سرپرست گروه فرآیندهای تصفیه، مرکز تحقیقات آب و فاضلاب، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول، ایمیل: m_mirabi@sbu.ac.ir

Received: 25/01/2023

Revised: 15/05/2023

Accepted: 31/05/2023

© IWWA

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۵

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

In recent years, using PVDF polymer in the fabrication of ultrafiltration membranes has attracted the attention of water and wastewater industry researchers. However, the hydrophobic property of PVDF polymer has brought implementation and exploitation challenges. This study evaluates the effectiveness of copper oxide nanomaterials in three types of geometric shapes (nanoparticle, nanosheet, nanoball) to modify the PVDF polymer's hydrophobic structure. In this research, nanomaterials were synthesized by the hydrothermal method in different dimensions and sizes and then, were identified and characterized. Ultrafiltration membrane was made in the presence of PVDF (16% wt), PVP (1% wt), and CuO nanoparticles (1% wt) by the phase inversion method. The characterization results showed that the sheet nanomaterials are well dispersed in the membrane structure. Also, the amount of water flux and rejection of BSA protein in the membrane containing nanosheets was 263% and 98%, respectively. Compared to other nanocomposites, a lower amount of BSA was deposited on the surface of the membrane. Also, the release rate of copper ions in the water coming out of the membrane was within the standard range, which indicates the stability of CuO in the membrane structure. In this regard, sheet nanomaterials perform much better in modifying polymer nanocomposites.

Keywords: CuO NMs, Morphology, Nanocomposite membrane, Polyvinylidene Fluoride (PVDF), Ultrafiltration (UF).

چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از پلیمر PVDF در ساخت غشای اولترافیلتراسیون مورد توجه محققین صنعت آب و فاضلاب قرار گرفته است. با این حال خاصیت آب‌گریزی پلیمر PVDF چالش‌های اجرایی و بهره‌برداری به‌همراه داشته است. این مطالعه اثربخشی نانوذرات CuO در سه نوع شکل هندسی (نانو ذره، نانو صفحه، نانو توپی) به‌منظور اصلاح ساختار آب‌گریز پلیمر PVDF را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در این پژوهش، نانو ذرات به‌روش هیدروترمال در ابعاد و اندازه‌های مختلف سنتز شده و مورد شناسایی و مشخصه‌یابی قرار گرفتند. غشای اولترافیلتراسیون در حضور PVDF (۱۶٪ wt)، PVP (۱٪ wt) و نانو ذرات اکسید مس (۱٪ wt) به‌روش وارونگی فاز ساخته شد. نتایج مشخصه‌یابی نشان‌داد که نانو مواد صفحه‌ای به‌خوبی در ساختار غشا پراکنده شده است. هم‌چنین میزان آبدهی و پس‌زنی پروتئین BSA در غشای حاوی نانو صفحات به‌ترتیب LMH ۲۶۳ و ۹۸٪ بوده و نسبت به سایر نانو کامپوزیت‌ها میزان کمتری BSA به سطح غشا رسوب کرده است. هم‌چنین، میزان رهاسازی یون مس در آب خروجی از غشا در حد استاندارد بوده است که نشان‌دهنده پایداری CuO در ساختار غشا است. براین اساس، نانو مواد صفحه‌ای به‌مراتب عملکرد بهتری در اصلاح نانو کامپوزیت‌های پلیمری دارند.

کلمات کلیدی: اولترافیلتراسیون (UF)، پلی وینیلیدین فلوراید (PVDF)، مس اکسید (CuO)، مورفولوژی، غشای نانو کامپوزیت.

از سه مورفولوژی مختلف نقره (نانوسیم، نانوذره و میکرو ذره) برای اصلاح ساختار غشای PSF کامپوزیت استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که ترکیب نانوسیم‌های نقره در ساختار پلیمر، شار آب (LMH 1138) بالاتری نسبت به نانوسیم‌های نقره (LMH 199) و میکرو ذرات نقره (LMH 374) ایجاد می‌کند. (Wang and Sun, 2020) غشاهای PVDF را با مورفولوژی مختلف ZnO (نانو متخلخل، نانو میله‌ها و نانو صفحات) مخلوط کردند و شار آب بالاتری را در غشای با نانو متخلخل (LMH 78) نسبت به نانو میله‌ها (LMH 55) نانو صفحات (LMH 56) مشاهده کردند. بنابراین می‌توان انتظار داشت که عملکرد نانو ذرات با شکل و اندازه متفاوت (در یک درصد مشخص وزنی) عملکرد متفاوتی در بهبود ساختار غشا داشته باشد. با توجه به این‌که فرآیند تولید نانو ذرات پرهزینه است، رسیدن به مورفولوژی بهینه در اصلاح ساختار غشا می‌تواند پراهمیت باشد. بدین طریق می‌توان بسیاری از هزینه‌های تولید و ساخت غشا را کاهش داد.

هدف از این مطالعه بررسی اثربخشی نانو مواد CuO با مورفولوژی‌های مختلف (نانو ذره (NP)، نانو صفحه (NS)، نانو توپ (NB)) مخلوط شده در ساختار غشای PVDF برای تصفیه آب است. در این مطالعه، مورفولوژی‌های مختلف نانو مواد CuO از طریق یک‌روش آسان دوستدار محیط‌زیست (هیدروترمال) با تنظیم دما، زمان و مواد واکنش‌دهنده سنتز شدند. تمامی غشاهای نانو کامپوزیت اصلاح شده PVDF با تکنیک وارونگی فاز در این مطالعه ساخته شدند. مورفولوژی، ویژگی‌های سطح، آبدهی، راندمان تصفیه پس‌زنی، و خواص ضدگرفتگی غشاهای نانو کامپوزیت PVDF/CuO به‌طور سیستماتیک مورد مطالعه قرار گرفت. تاکنون، هیچ مطالعه‌ای در مورد استفاده از مورفولوژی‌های مختلف نانو مواد CuO برای ساخت غشاهای پلیمری UF انجام نشده است. انتظار می‌رود که این تحقیق بتواند به‌عنوان یک رویکرد جدید برای استفاده از نانو فلزات اکسیدی در ساخت غشاهای UF برای تصفیه آب در نظر گرفته شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

به‌منظور ساخت نانو ذرات CuO، مس سولفات ۵ آب (CuSO₄.5H₂O)، سدیم هیدروکسید (NaOH)، سترات سدیم (Na₃C₆H₅O₇)، ستیل تری متیل آمونیوم بروماید (C₁₉H₄₂BrN)، از شرکت مرک^۱ تهیه شد. در این پژوهش، از پلیمر پلی وینیلیدین فلوراید (PVDF kynar 761 شرکت آرکما فرانسه^۲) و

در سال‌های اخیر، فرآیند اولترافیلتراسیون^۱ (UF) به‌عنوان یک رویکرد عملی و سازگار با محیط‌زیست برای تصفیه آب و فاضلاب مورد توجه قرار گرفته است (Alighardashi et al., 2017؛ دولت‌شاه و همکاران، ۱۴۰۱؛ هاشم‌زاده و اکبرزاده، ۱۴۰۱). پلی وینیلیدین فلوراید (PVDF) به‌دلیل مقاومت شیمیایی عالی، استحکام مکانیکی و پایداری حرارتی در ساخت غشاهای UF استفاده می‌شود (Beygmohammdi et al., 2020). باوجود این، ماهیت آب‌گریز پلیمر PVDF سبب می‌شود که به‌راحتی دچار گرفتگی شده و شار آب در طول فرآیند UF کاهش یابد (Liu et al., 2011). روش‌های مختلفی به‌مانند ایجاد پوشش سطحی، ایجاد پیوند سطحی، پر کردن منافذ و غیره به‌منظور اصلاح ساختار غشاهای پلیمری مورد توجه محققین بوده است، اما روش اختلاط نانو مواد با محلول اولیه پلیمری ساخت غشا از روش‌های کارآمد است (Alpatova et al., 2015; Wang and Sun, 2020). در این روش، نانو مواد معدنی به‌عنوان افزودنی می‌تواند عملکرد غشا را از نظر نفوذپذیری آب، پس‌زنی، آب دوستی، ویژگی ضد گرفتگی، استحکام مکانیکی، پایداری حرارتی و شیمیایی در فرآیند جداسازی غشا بهبود بخشد (Goh et al., 2015).

تاکنون نانو ذرات معدنی مختلفی برای اصلاح غشا PVDF مانند Al₂O₃ (Liu, Abed, et al., 2011)، TiO₂ (Ong et al., 2015)، ZnO (Jia et al., 2017; Liang et al., 2012)، Fe₂O₃ (Baghbanzadeh et al., 2015)، CuO (Alpatova et al., 2015) و ZrO₂ (Alpatova et al., 2015) استفاده شده است. بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که عملکرد غشاهای اصلاح شده با نانو ذرات به عواملی هم‌چون ترکیب شیمیایی، خواص سطح، تمایل به انباشتگی، فاز کریستالی، بلورینگی نانو ذرات بستگی دارد (Rajendran et al., 2020; Slavin et al., 2017). در این میان، نانو مواد CuO به‌دلیل خواص شیمیایی و فیزیکی منحصر به‌فرد دارای مزایای بسیاری از جمله سمیت کم، پایداری حرارتی بالا، هزینه تولید کم و آسان در مقایسه با سایر اکسیدهای فلزی دارد (Korkmaz et al., 2016; Zhang et al., 2014). با این حال، ابعاد و شکل نانو مواد عامل مهم دیگری است که می‌تواند عملکرد غشاها اصلاح شده را تحت تاثیر قرار دهد، مورفولوژی‌های مختلف از یک نوع ماده می‌تواند پارامترهای فیزیکی مانند مساحت سطح، اندازه و بار سطحی متفاوتی داشته باشند (Mersian and Alizadeh, 2020; Valipour et al., 2019; Yang Hu et al., 2015; Zhou et al., 2017). در این رابطه

شده و توسط آب و الکل چندین بار شسته شد.

۲-۳- روش ساخت غشا

برای رطوبت‌زدایی، ابتدا تمامی مواد اولیه شامل PVP، CuO و PVDF به مدت ۲۴ ساعت در اون با درجه حرارت ۵۰ درجه قرار داده شدند. برای ساخت محلول پلیمری غشا، ابتدا ۱ wt.% از ماده نانو ذره CuO در ۸۳ wt.% حلال NMP در یک ظرف cc ۱۰۰ سربسته ریخته شده و سپس به مدت ۱ ساعت در محفظه اولتراسونیک پراکنده شد. در ادامه، به میزان ۱۶ wt.% پلیمر PVDF، ۱ wt.% PVP به محلول فوق اضافه شد. محلول فوق به مدت ۲۴ ساعت بر روی اجاق الکتریکی با سرعت ۴۰۰ rpm هم‌زده شده تا کاملاً اجزا و ساختار همگن ایجاد شود. در نهایت محلول پلیمر نهایی پس از حباب‌زدایی، بر روی سطح شیشه‌ای ریخته شده و با تیغه به ضخامت ۳۵۰ μm فیلم اولیه غشا کشیده شد. سپس بعد از ۱۰ ثانیه، فیلم ایجاد شده به حمام انعقاد منتقل شد تا فرآیند جداسازی فازی صورت پذیرد. غشای رسوب‌کرده از صفحه شیشه جدا شده و به مدت ۲۴ ساعت در محفظه از آب مقطر قرار داده شد تا حلال‌ها به صورت کامل از ساختار غشا خارج شود. در نهایت غشاها به منظور شناسایی و انجام آزمون فیلتراسیون در آب نگهداری شدند.

افزودنی پلیمری پلی وینیل پیرولیدین (PVP شرکت بایو ساینس^۵) و حلال N-متیل-۲-پیرولیدو (NMP شرکت سامچون^۴ کره جنوبی) به منظور ساخت غشا UF استفاده شد. همچنین، از آلومین سرم گاوی (BSA^۶ شرکت سولار بایو ساینس چین) به همراه دی‌سدیم فسفات (Na₂HPO₄) و سدیم فسفات (NaH₂PO₄) شرکت مرک به منظور ساخت محلول سنتتیک فسفات بافر (pH = ۷/۴) آزمایشگاهی BSA استفاده شد. تمام مواد شیمیایی از بالاترین خلوص برخوردار بودند و بدون هیچ‌گونه تصفیه بیشتر مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲- روش ساخت نانو ذرات CuO

نانو ذرات CuO براساس پارامترهای مختلف شامل، غلظت مواد اولیه، مقادیر رسوب‌دهنده، افزودنی، دما و مدت زمان فرآیند براساس جدول ۱ ساخته شدند. به طور خلاصه، مقادیر مورد نظر از مس سولفات ۵ آبه در ۴۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل شده و به داخل راکتور هیدروترمال ۵۰ cc تفلون ریخته شد. در ادامه، به میزان مورد نظر از محلول NaOH (۱۰ M) برای رسوب‌دهی و تغییر میزان pH محیط واکنش استفاده شد. سپس درب تفلون بسته و داخل راکتور هیدروترمال قرار داده شد تا در مدت زمان و درجه حرارت مشخص فرآیند شیمیایی صورت پذیرد. پس از پایان واکنش، رسوب ایجاد شده، توسط دستگاه سانتیفیوژ جدا سازی

جدول ۱- جزییات آماده سازی نانو مواد CuO (ذره‌ای، صفحه‌ای، توبی شکل)

نوع نانو CuO	CuSO ₄ .5H ₂ O (g)	NaOH (ml)	افزودنی (g)	زمان (h)	دما (°C)
نانوذره (NP)	۱	۰/۵		۶	۱۶۰
نانو صفحه (NS)	۰/۲	۰/۸	-	۲۰	۲۰۰
نانو توبی (NP)	۰/۱	۴	CTAB = 0.6 Sodium citrate = 0.25	۲	۱۲۰

الکترونی SEM S-4200 شرکت Hitachi شناسایی و مطالعه شد. برای انجام آنالیز زاویه تماس در سطح غشا از دستگاه ۱۹۰ ساخت شرکت Rame-Hart استفاده شد. همچنین برای محاسبه تخلخل غشا ساخته شده از معادله (۱) استفاده شد:

$$\varepsilon = \frac{W_1 - W_2}{A \times b \times \rho_w} \times 100\% \quad (1)$$

که W_1 و W_2 : به ترتیب وزن خیس و خشک غشا (g)، A : سطح مؤثر غشا (cm²)، b : ضخامت (cm) و ρ_w : چگالی آب (g/cm³) است. برای اندازه‌گیری میانگین اندازه حفرات غشا از معادله (۲) استفاده شد.

$$r_m (nm) = \sqrt{\frac{(2.9 - 1.75\varepsilon) \times 8\eta \cdot b \cdot Q}{\varepsilon \times A \times P}} \quad (2)$$

۲-۴- شناسایی و مشخصه‌یابی

به منظور شناسایی نانو مواد CuO از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی FESEM MIRA3 ساخت شرکت Tescan و از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری EM 208 TEM شرکت Philips برای بررسی دقیق‌تر استفاده شد. همچنین خواص سطح ویژه نانو ذرات CuO در درجه ۷۷ کلون توسط دستگاه BELSORP-Mini II ساخت شرکت BEL مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از روش Brunauer-Emmett-Teller (BET) نتایج آن محاسبه شد. همچنین، برای بررسی خواص بلوری غشا و نانو ذرات از دستگاه XRD شرکت آلمانی Philips استفاده شد. تمامی نمونه‌ها در بازه زاویه ۲۰ تا ۸۰ درجه مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. مقطع غشا توسط دستگاه میکروسکوپ

که ε : درصد تخلخل، A : سطح مؤثر غشا براساس (m^2) ، t : ضخامت غشا (m) ، η : ویسکوزیته آب $(Pa \cdot s)$ ، Q : دبی (m^3/s) و P : فشار عملکردی غشا MPa است.

۲-۵-۲- آزمایش عملکردی غشا

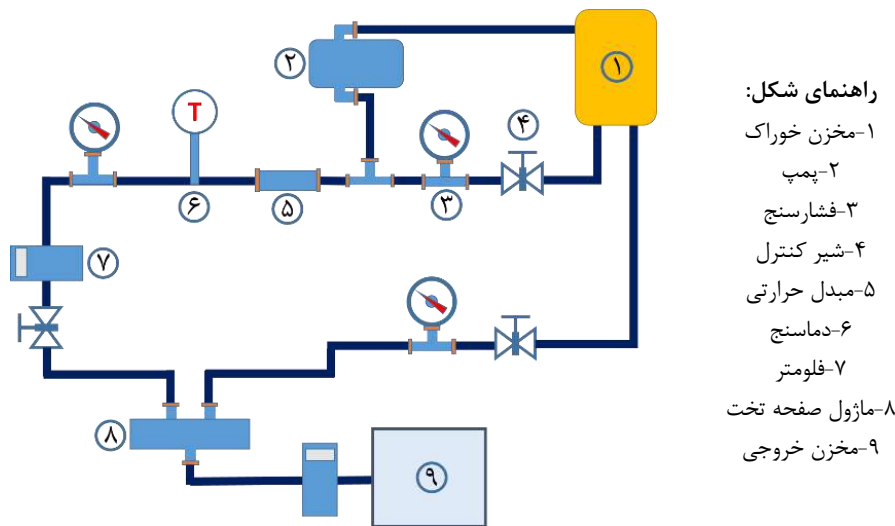
۲-۵-۱- تعیین آبدهی و پس زنی غشا

پس از ساخت غشا، نمونه موردنظر در پایلوت جریان عرضی با سطح مؤثر $28/26 (cm^2)$ در فشار 1 بار قرار داده شد (شکل ۱). در ابتدا غشا به مدت یک ساعت تحت فشار 1 بار برای دستیابی به فلاکس ثابت و انجام فرآیند فشرده سازی غشا راهبری شد. سپس، میزان فلاکس آب (J) طی مدت نیم ساعت در بازه های زمانی 5 دقیقه اندازه گیری شد. میزان آبدهی یا همان فلاکس غشا براساس معادله (۳) محاسبه می شود.

$$R_j\% = (1 - \frac{C_p}{C_f}) \times 100 \quad (4)$$

که C_p و C_f : میزان غلظت محلول استاندارد BSA در خوراک و محلول تراوه از غشا است.

$$J (LMH) = \frac{V}{A \cdot \Delta t} \quad (3)$$



شکل ۱- پایلوت جریان عرضی

که J_1 : میزان فلاکس اولیه غشا و J_2 : میزان فلاکس غشا پس از شستشو است. بزرگتر بودن عبارت فوق نشان دهنده آن است که بازیابی شار اولیه بهتر انجام شده و در واقع میزان کمتری از پروتئین های موجود در خوراک به صورت برگشتناپذیر بر سطح غشا اتصال یافته اند. برای بررسی نوع گرفتگی ایجاد شده در ساختار غشا می توان از روابط (۶) استفاده نمود.

$$\begin{cases} R_T = R_r + R_{ir} \\ R_r = \frac{J_2 - J_p}{J_1} \times 100\% \rightarrow R_T = (1 - \frac{J_p}{J_1}) \times 100\% \\ R_{ir} = \frac{J_1 - J_2}{J_1} \times 100\% \end{cases} \quad (6)$$

۲-۵-۲- آزمایش گرفتگی غشا

پس از آزمایش فیلتراسیون BSA، کل واحد فیلتراسیون و غشای گرفته شده تحت شرایط جریان متقاطع با آب مقطر و بدون هیچ فشاری به مدت 15 دقیقه شستشو فیزیکی داده شد. سپس به مدت 30 دقیقه دیگر، مجدداً در فشار 1 بار شار آب (JW_2) اندازه گیری شد. نسبت بازیابی شار غشا $FRR\%$ از معادله (۵) محاسبه شد.

$$FRR\% = \frac{J_2}{J_1} \times 100 \quad (5)$$

موجود در ساخت کامپوزیت‌های غشایی با نانو ذرات اکسید فلزات است. در این مطالعه به منظور بررسی میزان رهاسازی یون Cu^{2+} از ساختار غشا PVDF/CuO از دستگاه طیف‌سنجی نشر اتمی پلاسما جفت شده القایی^۸ (ICP-OES) استفاده شد. در آزمایش فیلتراسیون، محتوای Cu^{2+} آب تراوش از غشای نانو کامپوزیت در طی فیلتراسیون آب خالص هر ۵ دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه اندازه‌گیری شد. تمام آزمایش‌ها سه بار با سه غشای نمونه جداگانه برای هر آزمایش تکرار شد.

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- بررسی و مشخصه یابی خواص نانوذره اکسید مس

شکل ۲ الگوی XRD نانو مواد CuO سنتز شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. پیک‌های پراش در زوایای 2θ برابر با 38.7° ، 35.5° ، 32.4° ، 48.1° ، 53.5° ، 58.3° ، 61.5° ، 66.2° ، 68.1° و 75.2° درجه شناسایی شدند. این پیک‌ها به ترتیب به صفحات کریستالی (110) ، (111) ، (002) ، $(111)/(200)$ ، (202) ، (020) ، (202) ، (113) ، (311) ، (220) ، (311) و (222) مربوط می‌شوند. این الگو با الگوی استاندارد (JCPDS 048-1548) برای CuO مطابقت دارد. پیک‌های پراش نانو ذرات CuO ساختار بلوری مونوکلینیک را با گروه فضایی C2/c تأیید می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هیچ‌گونه پیک ناخالص بمانند Cu_2O و $\text{Cu}(\text{OH})_2$ در الگوهای XRD مشاهده نشده است که نشان دهنده خلوص بالای فاز CuO در نمونه‌های سنتز شده است.

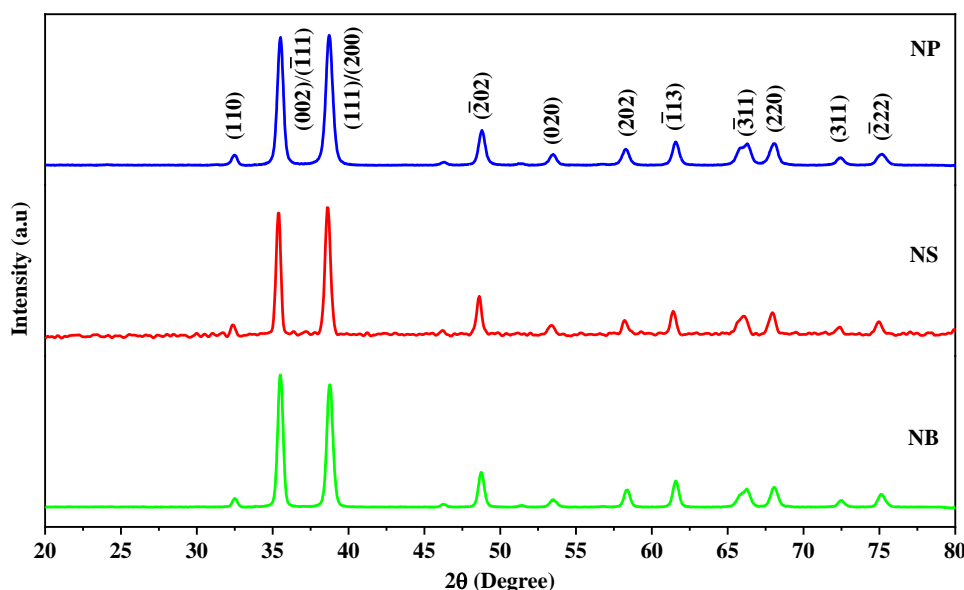
که R_T : میزان درصد کل گرفتگی غشا، R_f : میزان درصد گرفتگی برگشت‌پذیر، R_{ir} : میزان درصد گرفتگی برگشت‌ناپذیر، J_1 : میزان فلاکس اولیه غشا، J_2 : میزان فلاکس غشا بعد از شستشو و J_p : میزان فلاکس غشا در تست محلول BSA است.

۲-۶- آزمایش‌های جذب BSA

جذب پروتئین BSA بر روی غشاها در دو شرایط استاتیکی و دینامیکی مورد مطالعه قرار گرفت. در ابتدا، تمام نمونه‌های غشایی با مساحت 2×2 سانتی‌متر مربع در محلول فسفات بافر (pH = 7.4) و 0.1 M (۰/۱ M) ۳ بار شستشو داده شدند. سپس آزمایش‌های جذب BSA در شرایط استاتیکی با غوطه‌ور نمودن نمونه‌های غشایی در بطری‌های شیشه‌ای درب بسته (۵۰ میلی لیتر) حاوی ۴۰ میلی لیتر (BSA ۱ g/l دارای pH در حدود ۷/۴) در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت انجام شد. جذب BSA بر روی غشاها از تفاوت بین غلظت محلول BSA در قبل و بعد از آزمایش محاسبه شد. همچنین، جذب پروتئین BSA در شرایط دینامیکی صورت‌پذیرفت، در این شرایط محتویات درون بطری و غشا با سرعت ۲۰۰ rpm هم‌زده شدند. غلظت BSA در محلول‌ها با استفاده از اسپکتروفتومتر Shimadzu UV-2401PC، در 280 nm نانومتر اندازه‌گیری شد. برای هر آزمایش، میانگین نتیجه حداقل سه نمونه گزارش شد.

۲-۷- اندازه‌گیری میزان رهاسازی یون Cu^{2+}

رهاسازی یون‌ها فلزی از ماتریس غشا یکی از چالش‌های



شکل ۲- الگوی پراش اشعه ایکس نمونه نانو مواد CuO

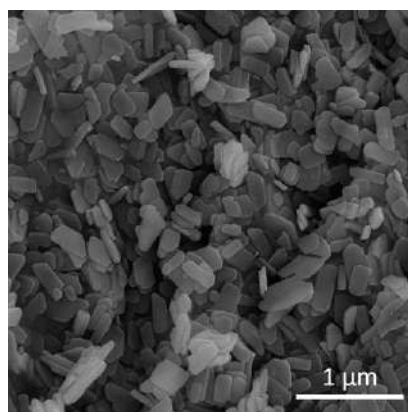
که در شکل ۳-الف نشان داده شده است، نانو مواد ذره‌ای در ابعاد و اندازه‌های بسیار کوچک ایجاد شده‌اند و به دلیل اثر الکترواستاتیکی و اثر خشک‌شدن سوسپانسیون آبی به یکدیگر چسبیده‌اند. بر این اساس، تصویر TEM تشکیل نانو ذرات CuO با ذرات ریز با قطر تقریباً 27 ± 2 نانومتر را نشان می‌دهد (شکل ۳-د). شکل ۳-ب، نانو مواد صفحه‌ای به صورت مستطیلی شکل با لبه‌های منحنی شکل را نشان می‌دهد. با توجه به تصویربرداری TEM (شکل ۳-ه)، طول و عرض این نانو صفحات کمتر از ۲۰۰ نانومتر است. بر اساس شکل ۳-ه، دو عدد نانو ذره صفحه‌ای شکل مشاهده می‌شود که از پهلو به یکدیگر چسبیده‌اند، ضخامت نانو ذرات در محدوده ۲۰-۳۰ نانومتر به دست آمد. شکل ۳-ج نانو ذرات توپی شکل را نشان می‌دهد که دارای اندازه در محدوده ۱ میکرومتر است. این مورفولوژی دارای تیغه‌های ریزی در اطراف خود است که به صورت بسیار متراکم در تمامی جهات رشد نموده است (شکل ۳-و). اندازه تیغه‌های ایجاد شده در حدود کمتر ۲۰ نانومتر تخمین زده می‌شود.

یکی دیگر از روش‌های ارزیابی ساختار نانو مواد استفاده از روش BET به منظور بررسی میزان تخلخل و حفرات نانو ذرات بود. هرچه قدر میزان تخلخل و سطح نمونه‌های نانوذره بیشتر باشد، این امر می‌تواند منجر به برهمکنش بهتر نانو مواد در ساختار پلیمر شود. در واقع، میزان سطح در واحد جرم می‌تواند نشان‌دهنده میزان فعالیت سطح ماده باشد. جدول ۲ سطح ویژه، کل حجم حفرات و میانگین قطر حفرات اکسید مس سنتز شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نانو ذره (NP) با سطح ویژه $6/77 \text{ (m}^2/\text{g)}$ به نسبت سایر نانو مواد صفحه‌ای و توپ شکل از سطح بیشتری برخوردار است. بنابراین مشاهده می‌شود مورفولوژی‌های مختلف از لحاظ فیزیکی عملکرد متفاوتی دارند.

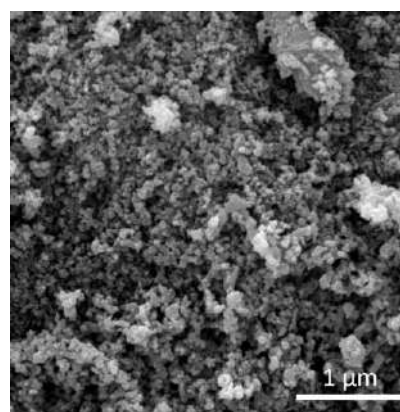
شکل ۳ تصاویر SEM و TEM نانو مواد CuO سنتز شده را نشان می‌دهد. تاثیر مقادیر پیش‌ساز، دمای واکنش، زمان واکنش، غلظت و مواد افزودنی مورد استفاده در سنتز CuO منجر به شکل‌گیری مورفولوژی‌های نانو مواد مختلف می‌شود. همان‌طور

جدول ۲- مشخصات BET نانو مواد CuO سنتز شده در این مطالعه

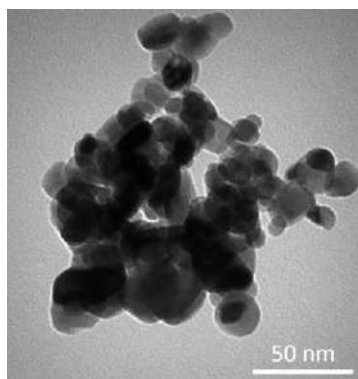
پارامتر	واحد	نانو ذره (NP)	نانو صفحه (NS)	نانو توپ (NB)
سطح ویژه	m^2/g	۶/۷۷	۴/۳۹	۳/۱۱
کل حجم حفرات	cm^3/g	۰/۰۲۱۰	۰/۰۱۳۵	۰/۰۰۹۳
قطر میانگین حفرات	nm	۱۲/۴۰	۱۲/۳۴	۱۱/۹۶۷



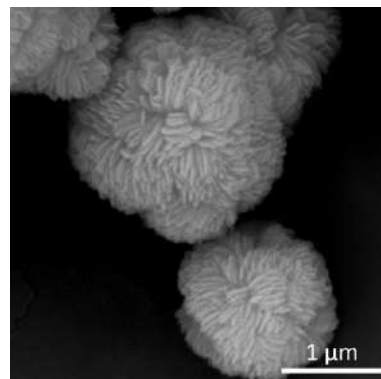
(ب)



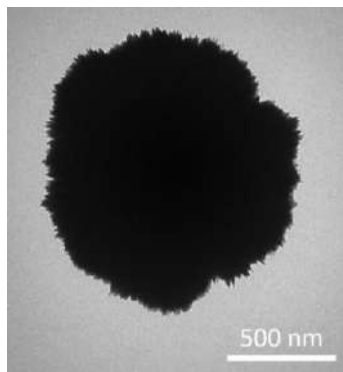
(الف)



(د)



(ج)



(و)



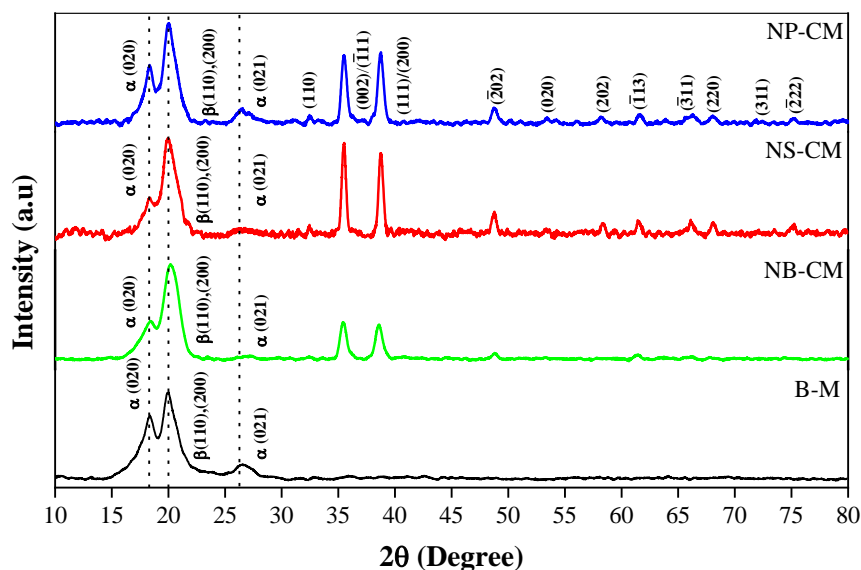
(ه)

شکل ۳- آنالیز مورفولوژی CuO توسط الف-ج) دستگاه FESEM و د-و) دستگاه TEM

۲-۳- بررسی و مشخصه‌یابی خواص غشا

شکل ۴ الگوهای پراش XRD غشاهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، غشای شاهد سه پیک مشخص را در زوایای $18/4$ ، $20/2$ و $26/6$ نشان می‌دهد که به ترتیب مربوط به صفحات (020) ، (110) و (200) پلیمر PVDF است. پیک‌ها مربوطه در زوایای $18/4$ درجه و $26/6$ درجه مربوط به ساختار مونوکلینیک بلوری فاز α هستند، درحالی‌که پیک مربوطه در زاویه $20/2$ درجه به فاز β ارتورومبیک اختصاص داده می‌شود (Martins et al., 2014). این نتیجه با سوابق ادبیات گزارش شده مطابقت دارد که بیان می‌کند غشای PVDF معمولی از دو پلی مورف اصلی فازهای α و β تشکیل شده است (Taha and Mahmoud, 2021). از سوی دیگر، الگوهای پراش XRD غشاهای کامپوزیتی آماده شده، دو پیک پر شدت را در زوایای $32/42$ و $38/8$ درجه و همچنین چندین پیک در زوایای $32/42$ ، $48/6$ ، $53/4$ ، 58 ، $61/6$ ، $66/2$ ، 68 ، 72 و 75 درجه را نشان می‌دهد که به خوبی با فاز CuO مونوکلینیک مرتبط هستند.

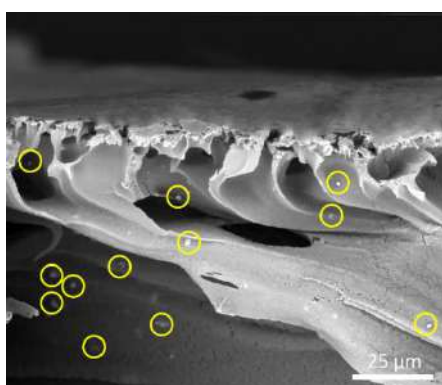
(JCPDS 048-1548). این نتایج نشان می‌دهد نانو مواد CuO با موفقیت در ماتریس PVDF گنجانده شده است. در همین حال، نسبت شدت پیک‌های پراش نانو مواد CuO در NS-CM نسبت به سایرین بسیار افزایش یافته است که نشان‌دهنده ترکیب بیشتر NS با ماتریس پلیمر PVDF است. علاوه بر این، مورفولوژی‌های مختلف CuO در شدت پیک‌های مربوط به فازهای PVDF غشاهای کامپوزیتی تأثیر گذاشتند. به‌طور خاص، بالاترین پیک پراش در زاویه $20/2$ درجه برای غشا با NS به دست آمد که نشان‌دهنده غالب بودن فاز β و افزایش خواص آب‌دوستی در این غشا است. پیک پراش PVDF در $18/4$ درجه و $26/6$ درجه (فاز کریستالی α) در غشای NS به حداقل رسید. حتی اگر مورفولوژی‌های مختلف CuO‌ها دارای شیمی یکسانی هستند، ساختارهای فیزیکی مختلف منجر به امواج، تکانه و انرژی‌های مختلفی در پراش می‌شوند (Cao et al., 2006). از الگوهای XRD می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب مورفولوژی‌های مختلف CuO در تبدیل فاز α به فاز β در غشاهای PVDF مؤثر است.



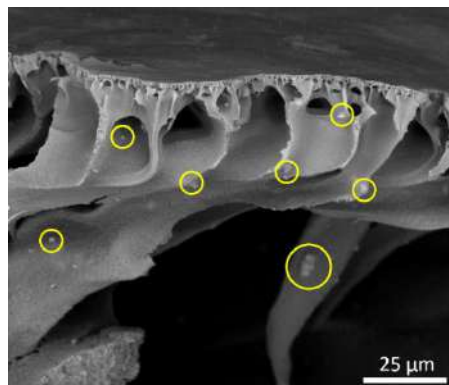
شکل ۴- الگوی پراش اشعه ایکس غشاهای مورد مطالعه

شکل ۵، تصاویر FESEM از سطح مقطع غشاهای نانو کامپوزیت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تمامی غشاهای نانو کامپوزیت دارای ساختار متخلخل نامتقارن هستند. تخلخل غشا از روی سطح به سمت پایین غشا، به دلیل تأخیر در فرآیند وارونگی فاز افزایش می‌یابد. در ساختار غشا، کانال‌های بزرگ به دلیل انتقال سریع جرم بین حلال و غیر حلال در فرآیند ساخت غشا شکل گرفته‌اند. براساس شکل ۵، ساختار شکل‌گیری غشاهای نانو کامپوزیت تقریباً یکسان است، اما توزیع نانو ذرات CuO در ساختار غشاها متفاوت است. برای مثال، در نمونه‌های

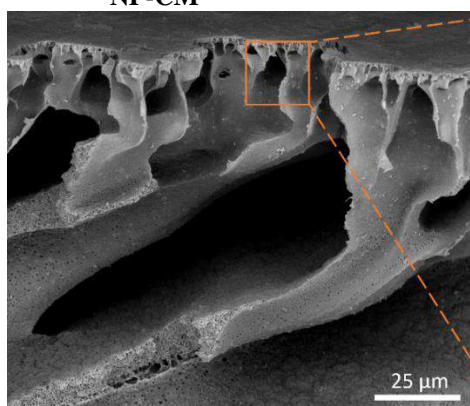
شکل ۵- تصاویر SEM از سطح مقطع غشاهای نانو کامپوزیت. NP-CM و NB-CM مشاهده می‌شود که غشا کلوخه شده‌اند (دایره‌های زرد رنگ)، این در حالی است که در نمونه NP-CM این شرایط قابل مشاهده نیست. تصویر در مقیاس $5 \mu\text{m}$ نشان می‌دهد که نانو ذرات صفحه‌ای به صورت یکنواخت در ساختار غشا پراکنده شده‌اند. بنابراین مشاهده می‌شود نقش مورفولوژی نانو ذرات تا چه در پخش شدگی آن‌ها مؤثر است. هم‌چنین، اندازه نانو ذرات و ساختار هندسی آن‌ها می‌تواند نقش به‌سزایی در به‌دام افتادن آن‌ها در ساختار پلیمر داشته باشد.



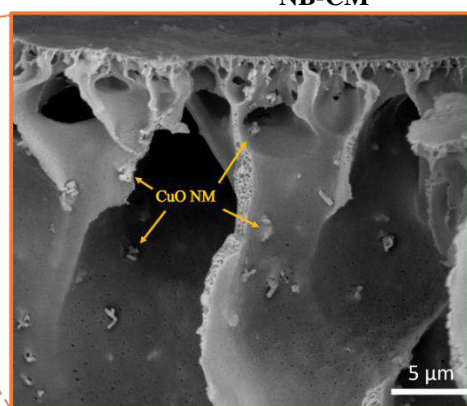
NP-CM



NB-CM



NS-CM



شکل ۵- تصاویر SEM از سطح مقطع غشاهای نانو کامپوزیت.

این پدیده می‌تواند شار آب و عملکرد ضد گرفتگی غشاء را بهبود بخشد. نکته قابل‌توجه آن است که نمونه حاوی نانو ذرات صفحه‌ای شکل (NS) به‌مراتب زاویه تماس کمتری (۴۹) دارند که نشان می‌دهد نانو ذرات بیشتری در ساختار غشا به دام افتاده‌اند (مطابق با تصاویر FESEM). برآیند دو نیروی انرژی سطحی و نیروی گرانشی نقش اصلی در به دام انداختن نانو ذرات ایفا می‌کند. در صورتی که در نمونه‌های دیگر، حرکت نانو ذرات از عمق به سطح غشا و خروج آن‌ها از فیلم غشا به دلیل کاهش انرژی سطحی در فرآیند وارونگی فاز منجر به کاهش برهمکنش نانو مواد در ساختار پلیمر می‌شود.

نانو ذرات که دارای ساختار نامنظم‌تری هستند، بهتر در داخل پلیمر درگیر می‌شوند و نقش به‌سزایی در اصلاح خواص پلیمر دارند. برای بررسی این موضوع آنالیز زاویه تماس بر روی نمونه‌های غشا انجام پذیرفته شد تا خواص آبدوستی آن‌ها مورد بررسی قرارگیرد. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، خواص آبدوستی غشا شاهد در حدود ۷۸ درجه و برای غشای کامپوزیت تا ۲۹ درجه کاهش داشته است. دلیل افزایش خواص آبدوستی می‌تواند مربوط به وجود گروه‌های عامل هیدروکسیل (OH-) در اطراف نانو مواد CuO باشد. گروه‌های عاملی هیدروکسیل می‌توانند مولکول H_2O را جذب کنند و آبدوستی غشا را نه تنها در سطح بلکه در سرتاسر ساختار غشا افزایش دهند.

جدول ۳- زاویه تماس، تخلخل و میانگین اندازه حفرات غشاهای مورد مطالعه

نمونه	زاویه تماس (°)	تخلخل (%)	میانگین اندازه حفرات (nm)
شاهد	۷۸/۳	۶۹±۱	۶۶/۲±۰/۷
NP-CM	۶۵/۲	۸۱±۲	۵۶/۲±۰/۸
NS-CM	۴۹/۴	۷۳±۲	۴۶±۰/۳
NB-CM	۶۰/۱	۷۸±۲	۵۱±۰/۹

PVDF را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، ترکیب نانو مواد CuO در محلول اولیه پلیمری منجر به یک هم‌افزایی در تشکیل منافذ و کاهش اندازه منافذ در غشاهای اصلاح شده می‌شود. از سوی دیگر، نانو مواد CuO آب‌دوستی غشاهای اصلاح شده را افزایش می‌دهند و منجر به تشکیل یک لایه آب روی سطح غشا می‌شوند. این لایه آب به عنوان یک مانع عمل می‌کند و از جذب مستقیم BSA به سطح غشای کامپوزیت جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، نانو مواد CuO در سطح غشا بار منفی تولید می‌کند که می‌تواند BSA را از سطح غشا با دافعه الکترواستاتیکی بین گروه‌های هیدروکسیل روی سطح غشاء و BSA جدا کند.

همان‌طور که در شکل ۶-الف نشان داده شده است، تأثیر مورفولوژی‌های مختلف CuO بر عملکرد غشاء متفاوت بود. ترکیب NS در ماتریس غشا بیشترین میزان پس‌زنی BSA را به همراه داشت، در حالی که نانو مواد NB منجر به کاهش پس‌زنی BSA (۹۱٪) می‌شود. این نتیجه را می‌توان به تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی، مانند اندازه و سطح مساحت نانو مواد CuO نسبت داد. نانو مواد NB اندازه ذرات بزرگ‌تری نسبت به سایر مورفولوژی‌های CuO داشتند که ممکن است منجر به تجمع و انسداد منافذ در کانال غشایی شود. بنابراین، انتخاب یک مورفولوژی طراحی شده برای اصلاح غشا مهم است که بار منفی سطح غشا را افزایش دهد در حالی که در ماتریس غشا انباشته نشود.

۳-۴- بررسی گرفتگی

شکل ۶-ب عملیات فیلتراسیون چند مرحله‌ای را با آب خالص و محلول BSA برای مطالعه ظرفیت ضد گرفتگی غشاهای نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همه غشاهای نانو کامپوزیت عملکرد بهتری نسبت به نمونه شاهد در پایلوت جریان متقاطع در طول فرآیند آزمایش دارند. در چرخه دوم، خوراک به محلول BSA تغییر یافت و شار آب به دلیل جذب و رسوب مولکول‌های BSA روی منافذ، کانال‌ها و سطح غشاهای به سرعت کاهش یافت. نتایج دو چرخه نشان می‌دهد که ترکیب نانومواد CuO در ماتریس PVDF می‌تواند نفوذپذیری آب و شار

از سوی دیگر مشاهده می‌شود که نانو مواد CuO نقش مؤثر در افزایش تخلخل غشا نانو کامپوزیت (۷۳-۸۱٪) در مقایسه با نمونه شاهد (۶۹٪) دارند. ترکیب نانو مواد CuO سبب می‌شود که سرعت اختلاط در فرآیند جداسازی فازی به دلیل افزایش شاخص ویسکوزیتر و بی‌ثباتی ترمودینامیکی افزایش یابد. هم‌چنین، میانگین اندازه حفرات با افزودن نانو ذرات کاهش یافته است (۴۶ تا ۵۶ نانومتر) (Wang et al., 2018). بر این اساس، اثر هسته‌زایی CuO، ماهیت متفاوت PVDF آب‌گریز و CuO آب‌دوست، افزایش شاخص ویسکوزیته از جمله عواملی است که در کاهش اندازه حفرات و افزایش تخلخل مؤثر است.

۳-۳- بررسی عملکرد فیلتراسیون غشا

شکل ۶-الف عملکرد غشای ساخته شده را در شار آب و نرخ پس‌زنی BSA نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۶-الف نشان داده شده است، نفوذپذیری آب غشاهای نانو کامپوزیت CuO بین ۱۴ الی ۳۵٪ در مقایسه با نمونه شاهد (۱۹۵ LMH) بهبود یافته است. افزوده شدن نانو ذرات CuO سبب بهبود ساختار غشا، افزایش خواص آب‌دوستی، افزایش تخلخل غشای پلیمری PVDF شده است. هم‌چنین، مورفولوژی‌های مختلف CuO عملکرد متفاوتی در زمینه آب‌دهی داشته‌اند. در این میان، غشای NS-CM بیشترین میزان آب‌دهی (۲۶۳ LMH) را داشته که به نسبت نمونه شاهد ۳۴/۸٪ درصد بهبود نشان می‌دهد. از سوی دیگر غشای NP-CM کمترین (۲۲۲ LMH) را در میان غشاهای کامپوزیت نشان می‌دهد. این موضوع می‌تواند به دلیل تمایل به انباشتگی در این نوع مورفولوژی باشد که در نهایت می‌تواند سبب انسداد حفرات و کاهش آب‌دهی شود.

از سوی دیگر، عملکرد نانو کامپوزیت‌ها در دفع پروتئین BSA نیز از غشا شاهد بهتر بوده است. به‌طور کلی، متعادل کردن نفوذپذیری آب و نسبت دفع BSA در فرآیند ساخت غشا دشوار است. در غشاهای UF، اندازه مولکولی محلول BSA و اندازه منافذ پارامترهای مهم در ساخت غشا هستند. بنابراین افزایش اندازه منافذ باعث کاهش دفع و پس‌زنی غشا می‌شود. در این مطالعه، PVP به عنوان عامل تشکیل دهنده منافذ، تعداد حفرات غشای

برشی حذف شود. از سوی دیگر، نانو مواد CuO به دلیل وجود گروه‌های عاملی منفی مانند OH⁻ در ساختار آن، بار منفی را بر روی سطح غشا ایجاد کرد. از این رو، بار منفی می‌تواند نیروی دافعه الکترواستاتیکی بین سطح غشای نانو کامپوزیت و مولکول‌های BSA ایجاد کند و عملکرد ضد گرفتگی را بهبود بخشد. علاوه بر این، PVP می‌تواند پیوندهای هیدروژنی بیشتری را در فرآیند پراکندگی نانو مواد CuO در محلول اولیه ساخت غشا ایجاد کند. مطالعات نشان می‌دهد که بخشی از محتوای PVP در ماتریکس غشا باقی می‌ماند و می‌تواند پیوندهای هیدروژنی را تشکیل دهد که می‌تواند منجر به جلوگیری از جذب پروتئین در سطح غشاء شود (Marbelia et al., 2019). در نتیجه، نیروی پیوند هیدروژنی بالاتر و دافعه الکترواستاتیکی می‌تواند دو مکانیسم برای بهبود عملکرد ضد گرفتگی غشاهای کامپوزیت باشد.

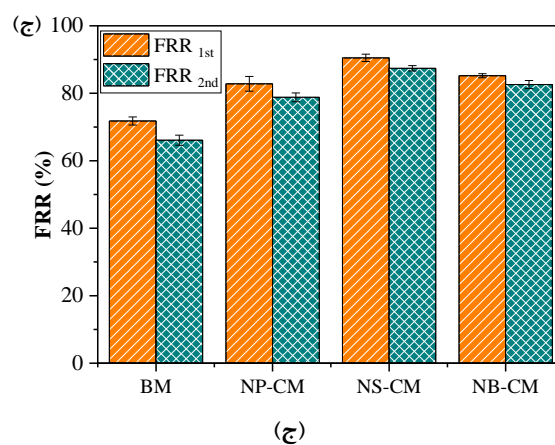
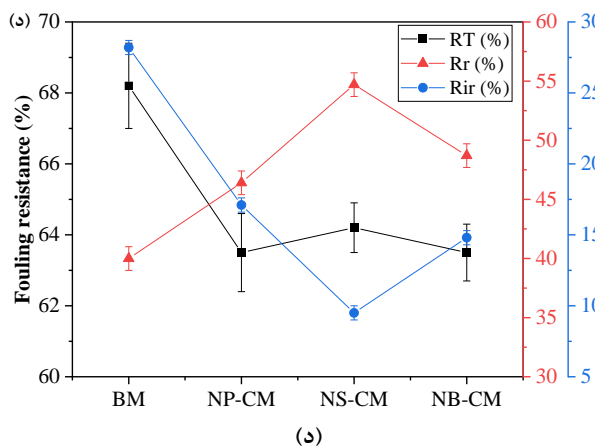
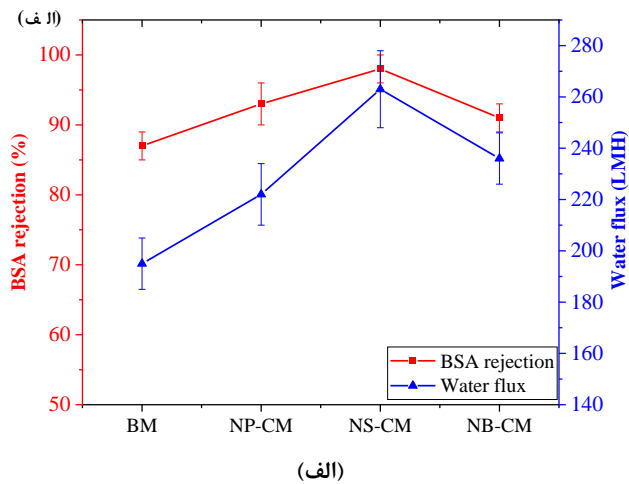
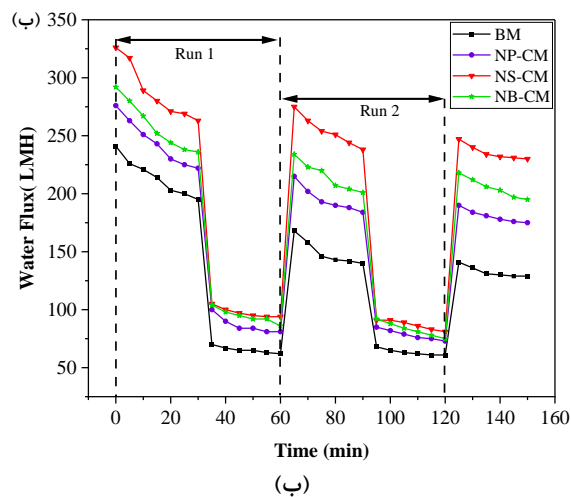
۳-۵- بررسی جذب پروتئین BSA

شکل ۷ نتایج آزمون جذب پروتئین BSA را به صورت استاتیکی و دینامیکی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان جذب پروتئین برای نمونه شاهد از سایر غشاهای کامپوزیت بیشتر است. این نتیجه نشان می‌دهد که نانو مواد CuO می‌تواند مراکز جذب پروتئین را در سطح غشا کاهش دهد و از جذب آلاینده‌ها جلوگیری به عمل آورد. در واقع این خواص سبب افزایش زمان بهره‌برداری و کاهش زمان فواصل شست‌وشوی غشا خواهد شد. در این شرایط جذب BSA برای NS-CM، NP-CM و NB-CM به ترتیب $1.4 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ، $2.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ و $1.5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ بود. غشای NS-CM کمترین میزان جذب پروتئین BSA را داشت، در حالی که NP-CM بالاترین جذب BSA را در میان نانو کامپوزیت‌ها داشت. ظرفیت جذب BSA در شرایط استاتیکی به مقدار و سطح ویژه نانو مواد مخلوط شده در ماتریس غشا و هم‌چنین آب دوستی سطح غشا بستگی دارد.

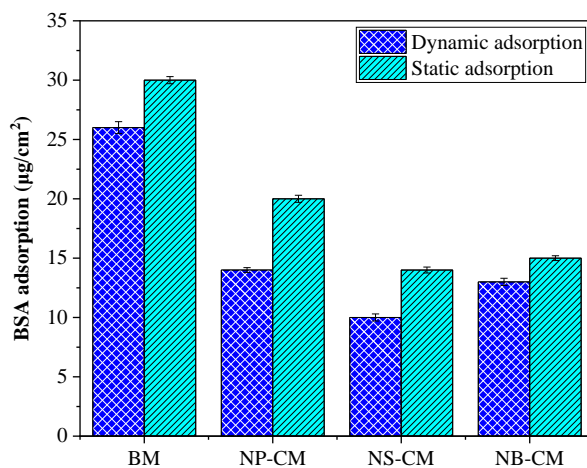
از طرف دیگر، جذب دینامیکی BSA در تمام غشاهای کامپوزیتی کمتر از $1.4 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ بود که می‌تواند به نقش آب دوست غشاها مرتبط باشد. عامل محرک اصلی در مقاومت در برابر جذب بیومولکول در این شرایط، تشکیل پیوند هیدروژنی با آب برای تولید یک لایه هیدراتاسیون است. از شکل ۷، میزان جذب BSA تحت شرایط دینامیکی برای NP-CM کمترین مقدار را در مقایسه با سایر غشاهای کامپوزیتی داشت. بار الکتریکی، زبری و آب دوستی غشا همه عواملی هستند که بر تعامل بین پروتئین و سطح غشا تأثیر می‌گذارند (Nie et al., 2017). بنابراین، مورفولوژی مختلف CuO با مشخصات فیزیکی مختلف عملکرد متفاوتی را در جذب BSA نشان می‌دهد.

BSA را بهبود بخشد. پس از تمیز کردن غشاها، شار آب بازبایی شده در همه غشاها کاهش یافت. زیرا پروتئین محلول BSA ممکن است در منافذ به دام افتاده و مانع از نفوذ آب در ساختار غشا شود، که با شستشوی هیدرولیکی قابل جداسازی نیست. در مقابل، شکل ۶-ج-د عملکرد ضد گرفتگی غشاها را برحسب شاخص‌های R_T ، R_{ir} ، R_r ، FRR بعد از آزمایش محلول BSA نشان می‌دهد. شاخص FRR معمولاً برای مطالعه خواص ضد گرفتگی غشا استفاده می‌شود. شاخص FRR بالاتر نشان می‌دهد که غشای دارای خواص ضد گرفتگی بهتری است. در چرخه اول (شکل ۶-ج)، غشای شاهد دارای شاخص $FRR=71/8$ بود، در حالی که شاخص FRR غشاهای نانو کامپوزیت به طور قابل توجهی بالاتر از نمونه شاهد بود، که برای غشاهای NP-CM، NS-CM و NB-CM به ترتیب برابر با $71/8$ ، $90/5$ و $85/2$ بود. شاخص FRR تحت تأثیر گرفتگی برگشت پذیر و غیرقابل برگشت است. گرفتگی برگشت پذیر (R_r) زمانی رخ می‌دهد که پروتئین به صورت پیوند ضعیف روی سطح غشا (لایه کیک یا ژل) رسوب می‌کند و به راحتی با شستشوی هیدرولیکی پاک شود. برعکس، رسوب برگشت ناپذیر (R_{ir}) زمانی اتفاق می‌افتد که مولکول‌های BSA در منافذ غشایی به دام می‌افتد یا به سختی روی سطح غشا جذب می‌شوند و حذف کامل آن با شستشو با آب سخت می‌شود و نیاز به تمیز کردن شیمیایی دارد. بنابراین، اصلاح نه تنها سطح غشا بلکه کل ساختار غشا نیز به منظور کاهش گرفتگی غیرقابل برگشت بسیار مهم است.

همان‌طور که در شکل ۶-د نشان داده شده است، R_T ، R_r و R_{ir} در تمام غشاهای کامپوزیت کاهش می‌یابد، در حالی که غشای شاهد دارای بالاترین شاخص $R_{ir} = 28/2$ است. این نتایج نشان می‌دهد که به دلیل ماهیت آب‌گریز، نمونه شاهد بیشتر تحت تأثیر گرفتگی غیرقابل برگشت فیزیکی قرار گرفته است. در حالی که شاخص R_{ir} برای غشاهای NP-CM، NS-CM و NB-CM به ترتیب به $17/1$ ، $9/5$ و $14/8$ کاهش یافت. در این جا، NS-CM عملکرد ضد گرفتگی بهتری را در میان سایر موارد نشان داد، که می‌توان گفت نانو مواد صفحه‌ای در ساخت غشای کامپوزیتی از نظر شار آب بالاتر و پس‌زنی BSA عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. نانو مواد CuO گرفتگی برگشت‌ناپذیر غشاهای اصلاح شده را کاهش دادند، که می‌تواند به افزایش آب دوستی غشا نسبت داده شود. آب دوستی بالاتر ممکن است منجر به تشکیل لایه‌ای از مولکول‌های آب بر روی سطح غشا PVDF شود که تأثیر قطبش غلظت را محدود می‌کند و منجر به جذب ضعیف BSA به سطح غشای اصلاح شده می‌شود که می‌تواند به سادگی با نیروی



شکل ۶- الف) شار آب و پس زنی BSA غشاهای مورد مطالعه؛ ب) فیلتراسیون چند مرحله‌ای با آب خالص و محلول BSA؛ ج) عملکرد ضد گرفتگی غشاهای براساس شاخص FRR؛ د) شاخص‌های R_r ، R_{ir} و R_t پس از آزمایش با محلول BSA



شکل ۷- آزمون جذب استاتیکی و دینامیکی پروتئین BSA بر روی غشا

بهداشت (WHO) برای کیفیت آب آشامیدنی در سال ۲۰۱۱، مقدار Cu^{2+} کمتر از ۲ میلی‌گرم در لیتر در آب آشامیدنی کاملاً ایمن است و هیچ خطری برای سلامتی افراد ندارد. این نتیجه نشان می‌دهد که نانو ذرات CuO در ماتریس غشای نانو کامپوزیت، با حداقل انتشار و شسته شدن از Cu^{2+} پایدار هستند.

۳-۶- پایداری یون Cu^{2+} در ماتریس غشا

آزمایش فیلتراسیون برای ارزیابی پایداری CuO در غشای نانو کامپوزیت استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان شستشوی Cu^{2+} در شار آب برای غشاهای کامپوزیتی در شرایط دینامیکی کمتر از ۱۰ میکروگرم در لیتر بود. طبق دستورالعمل سازمان جهانی

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Ultrafiltration
- 2- Merck
- 3- Arkema Inc., France
- 4- Solarbio Life Sciences
- 5- Samchun Pure Chemical
- 6- Bovine serum albumin
- 7- Flux Recovery Ratio (FRR)
- 8- Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES)

۷- مراجع

دولت‌شاه، م.، عطایی، م.، و اسدی، آ.، (۱۴۰۱)، "مروری بر عملکرد غشاهای اصلاح‌شده پلیمری اولترافیلتراسیون به‌منظور کاهش گرفتگی در تصفیه پساب"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*, (۴)۷, ۱۷-۲۹.

هاشم زاده، 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*, (۳)۷, ۷۲-۸۴.

Alighardashi, A., Pakan, M., Jamshidi, S., and Shariati, F.P., (2017), "Performance evaluation of membrane bioreactor (MBR) coupled with activated carbon on tannery wastewater treatmenty", *Membrane Water Treatment*, 8(6), 517-528, <https://doi.org/10.12989/mwt.2017.8.6.517>.

Alpatova, A., Meshref, M., McPhedran, K.N., and Gamal El-Din, M., (2015), "Composite polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane impregnated with Fe₂O₃ nanoparticles and multiwalled carbon nanotubes for catalytic degradation of organic contaminants", *Journal of Membrane Science*, 490, 227-235, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.05.001>.

Baghbanzadeh, M., Rana, D., Matsuura, T., and Lan, C.Q., (2015), "Effects of hydrophilic CuO nanoparticles on properties and performance of PVDF VMD membranes", *Desalination*, 369, 75-84, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.04.032>.

Beygmohammdi, F., Nourizadeh Kazerouni, H., Jafarzadeh, Y., Hazrati, H., and Yegani, R., (2020), "Preparation and characterization of PVDF/PVP-GO membranes to be used in MBR system", *Chemical Engineering Research and Design*, 154, 232-240, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.12.016>.

Cao, X., Ma, J., Shi, X., and Ren, Z., (2006), "Effect of TiO₂ nanoparticle size on the performance of PVDF membrane", *Applied Surface Science*, 253(4), 2003-2010, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.03.090>.

Goh, P.S., Ng, B.C., Lau, W.J., and Ismail, A.F., (2015), "Inorganic nanomaterials in polymeric ultrafiltration membranes for water treatment", *Separation and Purification Reviews*, 44(3), 216-249,

این اصلاح غشا را برای کاربردهای تصفیه آب مناسب می‌سازد درحالی‌که هیچ خطری برای سلامتی موجودات زنده ایجاد نمی‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، غشاهای PVDF UF در حضور PVP و با استفاده از نانو مواد CuO سنتز شده از طریق روش وارونگی فاز ساخته شد. به‌منظور بررسی عملکرد نانو ذرات در بهبود ساختار پلیمر PVDF، سه نوع مورفولوژی مختلف CuO ذره‌ای، صفحه‌ای و توپ مانند) با روش هیدروترمال ساخته شد. نانو مواد CuO سنتز شده از نظر اندازه ذرات (۲۵ نانومتر - ۲ میکرومتر)، و سطح (۱۱/۳ - ۶/۷۷) متفاوت بودند. عملکرد هر کدام از نانو مواد CuO در بهبود آبدوستی، تخلخل، شار آب و خواص ضد گرفتگی مورد ارزیابی قرار گرفت. خصوصیات غشایی نشان داد که مورفولوژی‌های مختلف نانو مواد CuO (به‌ویژه با مورفولوژی صفحه مانند) تأثیر مثبت متفاوتی بر عملکرد غشاهای PVDF UF دارند. غشاهای اصلاح شده با CuO شار آب بالاتری (۲۶۳-۲۲۲ LMH) نسبت به غشای شاهد (۱۹۵ LMH) نشان دادند. در میان تمام غشاهای اصلاح شده، NS-CM دارای بالاترین سطح شار آب (۴-۱۸٪)، تصفیه پروتئین BSA (۹۸٪)، بازیابی شار اولیه (۹۰/۵٪) و عملکرد ضد رسوب برجسته در میان تمام غشاهای اصلاح شده نشان داد. آنالیزهای مشخصه‌یابی نشان دادند که ابعاد و مورفولوژی نانو ذرات تا چه حد می‌تواند بر روی خواص غشا اصلاح شده مؤثر باشند. هم‌چنین، پایداری Cu²⁺ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میزان CuO شسته شده در ماتریس غشا کمتر از ۱۰ میکروگرم در لیتر در تمام غشاهای اصلاح شده بود. بنابراین، استفاده از CuO NMs، به‌ویژه مورفولوژی صفحه‌مانند، راه‌حلی مناسب برای بهبود عملکرد غشای PVDF در فرآیندهای UF ارائه می‌دهد.

۵- قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی خود را از مجموعه دانشگاه شهید بهشتی، موسسه تحقیقات آب و شرکت آب و فاضلاب جنوب شرق استان تهران به‌منظور حمایت‌های معنوی و مالی اعلام می‌دارند. هم‌چنین بخشی از هزینه‌های این پژوهش از گرن ت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (۹۷۰۱۵۶۰۶) تأمین شده است.

- PVDF–PVP–TiO₂ composite hollow fiber membranes for oily wastewater treatment using submerged membrane system”, *Desalination and Water Treatment*, 53(5), 1213-1223, <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.855679>.
- Rajendran, S., Mukherjee, A., Nguyen, T.A., and Shukla, R.K., (2020), *Nanotoxicity: Prevention and antibacterial applications of nanomaterials*, 1st Edition, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/C2018-0-05517-6>.
- Slavin, Y.N., Asnis, J., Häfeli, U.O., and Bach, H., (2017), “Metal nanoparticles: understanding the mechanisms behind antibacterial activity”, *Journal of Nanobiotechnology*, 15(1), 65, <https://doi.org/10.1186/s12951-017-0308-z>.
- Taha, T.A., and Mahmoud, M.H., (2021), “Synthesis and characterization of PVDF-Er₂O₃ polymer nanocomposites for energy storage applications”, *Materials Chemistry and Physics*, 270, 124827, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124827>.
- Valipour, A., Hamnabard, N., Meshkati, S.M.H., Pakan, M., and Ahn, Y.-H., (2019), “Effectiveness of phase- and morphology-controlled MnO₂ nanomaterials derived from flower-like δ-MnO₂ as alternative cathode catalyst in microbial fuel cells”, *Dalton Transactions*, 48(16), 5429-5443.
- Wang, W., and Sun, H., (2020), “Effect of different forms of nano-ZnO on the properties of PVDF/ZnO hybrid membranes”, *Journal of Applied Polymer Science*, 137(36), 49070.
- Wang, W., Zhu, L., Shan, B., Xie, C., Liu, C., Cui, F., and Li, G., (2018), “Preparation and characterization of SLS-CNT/PES ultrafiltration membrane with antifouling and antibacterial properties”, *Journal of Membrane Science*, 548, 459-469.
- Yang, C., Xiao, F., Wang, J., and Su, X., (2015), “3D flower- and 2D sheet-like CuO nanostructures: Microwave-assisted synthesis and application in gas sensors”, *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 207(Part A), 177-185, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.10.063>.
- Zhang, Q., Zhang, K., Xu, D., Yang, G., Huang, H., Nie, F., Liu, C., and Yang, S., (2014), “CuO nanostructures: Synthesis, characterization, growth mechanisms, fundamental properties, and applications”, *Progress in Materials Science*, 60(1), 208-337, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.09.003>.
- Zhou, Q., Zhang, Y., Zeng, T., Wan, Q., and Yang, N., (2021), “Morphology-dependent sensing performance of CuO nanomaterials”, *Analytica Chimica Acta*, 1171, 338663, <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338663>.
- <https://doi.org/10.1080/15422119.2014.926274>.
- Hu, M., Zhong, K., Liang, Y., Ehrman, S.H., and Mi, B., (2017), “Effects of particle morphology on the antibiofouling performance of silver embedded polysulfone membranes and rate of silver leaching”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 56(8), 2240-2246, <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b04934>.
- Jia, H., Wu, Z., and Liu, N., (2017), “Effect of nano-ZnO with different particle size on the performance of PVDF composite membrane”, *Plastics, Rubber and Composites*, 46(1), 1-7, <https://doi.org/10.1080/14658011.2016.1245032>.
- Korkmaz, Ş., Geçici, B., Korkmaz, S. D., Mohammadigharehbagh, R., Pat, S., Özen, S., Şenay, V., and Yudar, H.H., (2016), “Morphology, composition, structure and optical properties of CuO/Cu₂O thin films prepared by RF sputtering method”, *Vacuum*, 131, 142-146, <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.06.010>.
- Liang, S., Xiao, K., Mo, Y., and Huang, X., (2012), “A novel ZnO nanoparticle blended polyvinylidene fluoride membrane for anti-irreversible fouling”, *Journal of Membrane Science*, 394-395, 184-192, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.12.040>.
- Liu, F., Abed, M.R.M., and Li, K., (2011), “Preparation and characterization of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) based ultrafiltration membranes using nano γ-Al₂O₃”, *Journal of Membrane Science*, 366(1-2), 97-103, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.09.044>.
- Liu, F., Hashim, N.A., Liu, Y., Abed, M.R.M., and Li, K., (2011), “Progress in the production and modification of PVDF membranes”, *Journal of Membrane Science*, 375(1-2), 1-27, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.03.014>.
- Marbelia, L., Bilad, M.R., and Vankelecom, I.F.J., (2019), “Gradual PVP leaching from PVDF/PVP blend membranes and its effects on membrane fouling in membrane bioreactors”, *Separation and Purification Technology*, 213, 276-282, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.045>.
- Martins, P., Lopes, A.C., and Lanceros-Mendez, S., (2014), “Electroactive phases of poly(vinylidene fluoride): Determination, processing and applications”, *Progress in Polymer Science*, 39(4), 683-706, <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.07.006>.
- Mersian, H., and Alizadeh, M., (2020), “Effect of diverse Pechini sol-gel parameters on the size, morphology, structural and optical properties of the Tenorite (CuO) NPs: A facile approach for desired properties”, *Ceramics International*, 46(11), 17197-17208, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.275>.
- Nie, C., Yang, Y., Peng, Z., Cheng, C., Ma, L., and Zhao, C., (2017), “Aramid nanofiber as an emerging nanofibrous modifier to enhance ultrafiltration and biological performances of polymeric membranes”, *Journal of Membrane Science*, 528, 251-263, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.12.070>.
- Ong, C.S., Lau, W.J., Goh, P.S., Ng, B.C., and Ismail, A.F., (2015), “Preparation and characterization of



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

Redevelopment of BSM1 Model to Model the Wastewater Treatment System of Carousel Oxidation (Case Study: South Tehran Wastewater Treatment Plant)

Sara Nazif^{1*}, Yaser Khatibi², Anahita Pourmohamadi² and Ali Khajavian³

1- Associate Professor, School of Civil Engineering, College of engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Ph.D. Student, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

3- M.Sc. Student, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

* Corresponding Author, Email: snazif@ut.ac.ir

Received: 14/01/2023

Revised: 27/03/2023

Accepted: 10/05/2023

© IWWA

بررسی سناریوهای مختلف کالبراسیون در مدل باز توسعه داده شده BSM1 برای مدل سازی سیستم تصفیه فاضلاب نهر اکسیداسیون کاروسل (مطالعه موردی: تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران)

سارا نظیف^{۱*}، یاسر خطیبی^۲، آناهیتا پورمحمدی^۲ و علی خواجهان^۳
۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- مهندسی محیط زیست، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مهندسی محیط زیست، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: snazif@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

Due to continuous changes in the quantitative and qualitative characteristics of wastewater influent in wastewater treatment plants (WWTPs), it is necessary to evaluate the performance of WWTPs under different conditions and adopt appropriate control strategies. The first step in evaluating and improving the performance of a WWTP is to model it. In recent years, there has been an increase in the application of simulation software and mathematical models for this purpose. Calibration is considered the most important step in modeling because improper calibration can lead to unrealistic results with a large error. The main objective of this research is to redevelop the BSM1¹ model and provide different calibration scenarios to model the carousel oxidation system on a real scale. The high-accuracy model can then be used for various purposes, such as implementing different control strategies and improving the performance of the WWTP under different operating conditions. The developed model was implemented on modules 5 and 6 of the WWTP located in the south of Tehran. After determining the suitable process models for different units of the wastewater treatment plant, model calibration based on the GMP² protocol was performed under two scenarios: 1) simultaneous calibration of parameters, and 2) step-by-step calibration of parameters. In each scenario, two objective functions were considered to evaluate the effect of main variables, including COD, TSS, and TN, and secondary variables, including X (MLSS³ of the aeration tank) and Xr (MLSS of the return sludge). The genetic algorithm was used to optimize the objective functions during the calibration process. The results showed that in the static calibration, the average error of all variables, as well as the variables considered in the objective function in scenario 2, were significantly reduced compared to scenario 1. The values in scenario 2 for objective function 1 were 2.7%, 7.8%, 8.2%, and 4.3% for the variables mentioned. Additionally, by considering more variables in the objective function, the cumulative error of all variables was reduced. In dynamic calibration, the average error rates of the model for TSS, COD, and TN were 29.8%, 19.8%, and 10.3%, respectively.

Keywords: Modeling of wastewater treatment plant, BSM1, Calibration, Calibration objective function, Carousel oxidation ditch system.

چکیده

به دلیل تغییرات پیوسته مشخصات کمی و کیفی فاضلاب ورودی به تصفیه خانه فاضلاب، ارزیابی عملکرد تصفیه خانه و اتخاذ استراتژی های مناسب و به هنگام ضروری است. اولین گام برای ارزیابی و بهبود عملکرد تصفیه خانه ها، مدل سازی تصفیه خانه است. در سال های اخیر استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی و مدل های ریاضی برای مدل سازی تصفیه خانه فاضلاب توسعه یافته است. کالبراسیون مهم ترین قدم در مدل سازی به شمار می رود، زیرا که کالبراسیون نامناسب نتایج را غیر واقعی و یا همراه با خطای زیاد نشان می دهد. هدف از این مطالعه کاربردی، باز توسعه مدل BSM1^۱ و ارائه سناریوهای مختلف کالبراسیون به منظور مدل سازی سیستم نهر اکسیداسیون کاروسل در مقیاس واقعی است تا بتوان از مدلی با دقت بالا برای اهداف بعدی هم چون اعمال استراتژی های کنترل و بهبود عملکرد تصفیه خانه تحت شرایط بهره برداری مختلف استفاده کرد. مدل توسعه داده شده بر روی مدول ۵ و ۶ تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران پیاده سازی شد. پس از تعیین مدل های فرایندی مناسب برای واحدهای مختلف تصفیه خانه فاضلاب، کالبراسیون مدل بر اساس پروتکل GMP^۲ و تحت دو سناریوی ۱) کالبراسیون همزمان پارامترها به صورت گام به گام انجام شد. در هر یک از سناریوهای ذکر شده، دو تابع هدف در نظر گرفته شده است تا اثر متغیرهای اصلی شامل COD، TSS، TN و متغیرهای فرعی شامل X (MLSS^۳ تانک هوادهی) و Xr (MLSS لجن برگشتی) در نظر گرفته شود. در فرایند کالبراسیون از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی توابع هدف استفاده شده است. نتایج نشان داد که در کالبراسیون استاتیکی، میزان خطای متوسط همه متغیرها و نیز متغیرهای در نظر گرفته شده در تابع هدف در سناریو ۲ نسبت به سناریوی ۱ به میزان قابل توجهی کاهش می یابد که مقدار آن ها در سناریوی ۲ برای تابع هدف ۱ و ۲ به ترتیب ۲.۷٪، ۷.۸٪، ۸.۲٪، و ۴.۳٪ است. همچنین با در نظر گرفتن تعداد متغیر بیشتر در تابع هدف، خطای جمعی همه متغیرها کاهش می یابد. در کالبراسیون دینامیک میزان خطای متوسط مدل در تخمین میزان TSS، COD و TN به ترتیب ۲۹.۸٪، ۱۹.۸٪، و ۱۰.۳٪ به دست آمد.

کلمات کلیدی: مدل سازی تصفیه خانه فاضلاب، BSM1، کالبراسیون، نهر اکسیداسیون کاروسل، تابع هدف کالبراسیون.

در سایر پروتکل‌ها را پوشش می‌دهد. (Lindblom et al., 2020) از پروتکل GMP به منظور ایجاد فرایند مدل‌سازی و بررسی عدم قطعیت داده‌های ورودی با استفاده از روش مونت کارلو استفاده کرده است که استفاده از این پروتکل در رسیدن به هدف مورد نظر تاثیر به‌سزایی داشته است. (Elawwad et al., 2019) از پروتکل STOWA به منظور مدل‌سازی، کالیبراسیون و بهینه‌سازی تصفیه‌خانه فاضلاب استفاده کرده است. در این تحقیق، مدل‌سازی هاضم بی‌هوازی و لجن فعال در نرم‌افزار Biowin انجام شده است. شبیه‌سازی فرآیند تصفیه‌خانه فاضلاب شامل دو مرحله کالیبراسیون و صحت‌سنجی است. کالیبراسیون مدل به منظور تنظیم مجموعه پارامترهای مدل‌های فرآیندی با هدف حداقل کردن خطا میان داده‌های مشاهداتی و داده‌های به‌دست‌آمده از مدل ضروری است. امروزه، انجام کالیبراسیون به‌صورت اتوماتیک توجه زیادی را به‌خود جلب کرده است، این درحالی است که انجام کالیبراسیون به‌صورت دستی، وقت‌گیر و دارای خطای بیشتری است (Shahed Behrouz et al., 2020). در کالیبراسیون اتوماتیک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای تخمین پارامترها استفاده می‌شود که رویکردهای زیادی برای مدل‌سازی تصفیه‌خانه وجود دارد (Zeferino et al., 2009). به‌طور مثال، Kim et al. (2002) امکان استفاده از الگوریتم ژنتیک در مدل لجن فعال ASM1^۹ را در تحقیق خود نشان داد. این درحالی است که Zeferino et al., (2009) از الگوریتم PSO برای کالیبراسیون مدل لجن فعال استفاده کرده است. Sin et al., (2008) یک رویکرد کارآمد با استفاده از روش مونت کارلو برای کالیبراسیون معرفی کرد. (Tomita and Park (2009) در تحقیق خود از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده‌اند که در آن تابع هدف دو متغیره شامل متغیرهای خروجی تصفیه‌خانه و هزینه را به‌منظور بهینه‌کردن نقاط تنظیمی کنترل‌کننده در نظر گرفته‌اند. از طرفی، در بیشتر موارد، تنها تعداد کمی از پارامترها، یا با روش آزمون و خطای دستی یا با ترکیب یک الگوریتم بهینه‌سازی تخمین زده می‌شوند، درحالی‌که بیشتر پارامترها در مقادیر پیش‌فرض خود باقی می‌مانند (Rajaei and Nazif, 2022; Nazif et al., 2023). که این موضوع خود می‌تواند باعث پیچیدگی و حتی ایجاد خطا در مسئله شود که باید دقیق‌تر بررسی شود. هم‌چنین رجایی و همکاران (۱۳۹۶)، به‌منظور بررسی تاب‌آوری سیستم ابتدا کالیبراسیون و صحت‌سنجی را انجام داده است. نتایج به‌دست‌آمده از مرحله کالیبراسیون و صحت‌سنجی استاتیک در تمامی موارد درصد خطای کمتر از ۱۰٪ را نشان داد و در مرحله دینامیک نیز مدل قادر به ارائه تخمین مناسبی از رفتار دینامیک فرآیندهای

امروزه با توجه به گسترش فعالیت‌های مختلف صنعتی و خانگی که منجر به تولید فاضلاب می‌شوند، حفاظت از محیط‌زیست و بهبود کیفیت منابع آب بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است که بدین منظور، استانداردها و قوانین سخت‌گیرانه‌ای در ارتباط با پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب تدوین شده است. با توجه به اهمیت این موضوع، بهبود عملکرد تصفیه‌خانه‌ها در شرایط مختلف بهره‌برداری ضروری است (Cao et al., 2021). برای ارزیابی عملکرد تصفیه‌خانه فاضلاب، استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و مدل‌های ریاضی در سال‌های اخیر رایج شده است که کم‌هزینه، سریع و دقیق بوده (Petersen et al., 2002) و امکان تجزیه و تحلیل و پیش‌بینی رفتار تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را بدون نیاز به انجام آزمایش‌های فیزیکی فراهم می‌کند (Hvala et al., 2018).

برای شبیه‌سازی تصفیه فاضلاب ابزارهای مختلفی با ویژگی‌های متفاوت توسعه یافته‌اند که یک دسته کدهای عمومی بوده که در نرم‌افزارهای مختلف قابل استفاده هستند و یک دسته نرم‌افزارهای خاص هستند که معمولاً یک کتابخانه حاوی مدل‌های موجود برای واحدهای مختلف تصفیه را دارا بوده و کاربر به آسانی قادر به انجام مدل‌سازی خواهد بود (رجایی، ۱۳۹۹). مشکل این دسته از نرم‌افزارها محدودیت‌های موجود در مدل‌های مورد استفاده در نرم‌افزار است (Gernaey et al., 2004). از جمله نرم‌افزارهای این دسته SUMO، SOAT، Biowin، GPS-X هستند (اسدی آسیابدری و همکاران، ۱۳۹۴). علاوه بر این نرم افزارها، یک سری از مدل‌های BSM، از جمله BSM1 و BSM2 (Jeppsson et al., 2013)، در ابتدا به‌عنوان چارچوبی برای ارزیابی استراتژی‌های کنترل مختلف در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب توسعه یافتند. با توجه به انعطاف‌پذیری و دسترسی مدل‌های BSM، آن‌ها در سال‌های اخیر به‌طور گسترده در جنبه‌های مختلف مدل‌سازی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Lu et al., 2023).

با توجه به پیچیدگی مدل‌های تصفیه‌خانه فاضلاب و تعداد زیاد پارامتر در این مدل‌ها، دستورالعمل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی فرآیند تصفیه فاضلاب به‌وجود آمده است. در این میان، پروتکل‌های STOWA^۴، BIOMATH^۵، WERF^۶، HSG^۷ و GMP^۸ (Rieger et al., 2012) کاربرد بیشتری داشته و معمولاً در تحقیقات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. پروتکل GMP یک پروتکل جامع است که مجموعه‌ای از مراحل در نظر گرفته‌شده

آن میزان بهینه زمان ماند هیدرولیکی و جریان برگشتی به تصفیه‌خانه را به دست آوردند، که پس از کالیراسیون به حدود ۴۸٪ اختلاف رسیده است.

به منظور بررسی کالیراسیون، ابتدا باید نوع سیستم و هدف آن مورد ارزیابی قرار گیرد. سیستم مورد بررسی در این تحقیق از نوع نهراکسیداسیون کاروسل است. نهراکسیداسیون کاروسل از جمله سیستم‌های تصفیه مناسب برای حذف نیتروژن است که اغلب برای تصفیه فاضلاب شهری از آن استفاده می‌شود (Luo et al., 2020). (Qiu et al., 2018) در مطالعه‌ای، به منظور بهبود عملکرد نهراکسیداسیون و کاهش مصرف انرژی، بخش هوادهی سیستم را مورد بررسی قرار داده و در آن به پارامترهای مربوط به هوادهی توجه ویژه‌ای کردند. (Liu 2019) به منظور ارتقای عملکرد سیستم نهراکسیداسیون در حذف نیتروژن، مدل سازی و کالیراسیون نهراکسیداسیون را انجام داد تا بتواند از مدل با اطمینان بیشتری برای ارتقای عملکرد استفاده کند. پارامترهای طراحی و راهبری سیستم تصفیه فاضلاب نهراکسیداسیون کاروسل و دامنه تغییرات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

تصفیه‌شده است. کلیوند و همکاران (۱۳۹۹) به منظور ارتقای عملکرد تصفیه‌خانه با ارایه راه‌کارهایی همچون اصلاح سیستم هوادهی و تغییر میزان لجن برگشتی، ابتدا کالیراسیون سیستم را در نرم افزار GPS-X انجام دادند که در آن به منظور انجام کالیراسیون پارامترها، با کم و زیاد کردن پارامترهای موثر بر مدل و بررسی تغییرات ایجادشده، پارامترهای حساس را انتخاب و براساس آن کالیراسیون را انجام دادند که به خطای کمتر از ۲۰ درصد رسیدند. هم‌چنین رهنمافر و همکاران (۱۴۰۰) سه تصفیه‌خانه فاضلاب در خراسان رضوی را بررسی و کالیریه کردند. در هر سه تصفیه‌خانه، نتایج مدل ایجادشده تا حدود ۸۰٪ به نتایج اصلی نزدیک است که با بهینه‌سازی کردن و اضافه کردن ته‌نشینی اولیه به این تصفیه‌خانه، در نهایت عملکرد آن‌ها بهبود یافته است. هم‌چنین راندمان تصفیه‌خانه‌ها در کاهش BOD₅ نسبت به سایر پارامترها بسیار بهتر بوده و در طرف مقابل مقدار کاهش آمونیوم بسیار پایین بوده است. رحیمی و همکاران (۱۴۰۱) کالیراسیون و آنالیز حساسیت پایلوت سیستم تصفیه فاضلاب را به روش A₂O در نرم‌افزار GPS-X انجام دادند. پس از

جدول ۱- پارامترهای طراحی و راهبری سیستم تصفیه فاضلاب نهراکسیداسیون کاروسل و دامنه تغییرات آن‌ها (Noophan et al., 2018; Qasim, 2017)

پارامترها	دامنه تغییرات
F/M	۰/۰۵ - ۰/۱۵
X تانک هوادهی (mg/l)	۳۰۰۰ - ۶۰۰۰
نسبت لجن برگشتی (%)	۵۰ - ۳۰۰
زمان ماند هیدرولیکی (hr)	۲۴
زمان ماند سلولی (day)	۱۵ - ۳۰
اکسیژن محلول (mg/l)	۱/۲ - ۱/۸

بررسی تاثیر در نظر گرفتن متغیرهای مختلف در تابع هدف کالیراسیون است که با تعریف توابع کالیراسیون مختلف پیاده‌سازی می‌شود. بنابراین هدف اصلی در این تحقیق ابتدا بررسی اثر در نظر گرفتن تمام پارامترهای کالیراسیون و سپس بررسی خطای کالیراسیون تحت سناریوهای مختلف است تا بتوان پس از انجام کالیراسیون مناسب با خطای حداقل، از آن در بهبود سیستم نهراکسیداسیون کاروسل در مقیاس واقعی استفاده کرد. برای این کار مدل BSM1 بازتوسعه داده شده است. در این مدل، کالیراسیون استاتیک براساس نوع کالیراسیون (به دو صورت گام‌به‌گام و به صورت یک‌باره) تحت دو سناریوی مختلف انجام شده است. هم‌چنین در هر سناریو، از دو تابع هدف متفاوت استفاده شده است که اثر در نظر گرفتن یا نگرگرفتن متغیرهای اصلی و فرعی بررسی می‌شود. پس از انجام کالیراسیون استاتیک،

همان‌طور که اشاره شد، در مطالعات گذشته کالیراسیون مدل‌های تصفیه‌خانه فاضلاب عمدتاً به صورت گام‌به‌گام انجام شده است و بسیاری از پارامترهای مورد بررسی در کالیراسیون در نظر گرفته نشده‌اند و مقادیر پیش‌فرض برای آن انتخاب شده است. از طرفی نیز، محققان در کالیراسیون مدل، فقط از یک تابع هدف مشخص استفاده کرده و متغیرهای تابع هدف را نیز با توجه به مطالعات گذشته انتخاب کرده‌اند. هم‌چنین تاثیر در نظر گرفتن متغیرهای مختلف مانند کل جامدات معلق (TSS^۱)، میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD^۱)، نیتروژن کل (TN^۱) و غیره در تابع هدف را بر روی نتایج کالیراسیون مورد ارزیابی قرار نداده‌اند. لذا نوآوری این تحقیق بررسی نتایج کالیراسیون به دو صورت کالیراسیون گام‌به‌گام و کالیراسیون به صورت یک‌باره و با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای مدل است. نوآوری دیگر نیز

تحقیق رسیدن به یک کالیبراسیون مناسب با حداقل خطا است تا بتوان از مدل کالیبره شده برای بهره‌برداری مناسب از تصفیه‌خانه فاضلاب در شرایط مختلف و اعمال استراتژی‌های بهره‌برداری مختلف استفاده کرد. به منظور انجام کالیبراسیون مناسب، لازم است سناریوهای مختلف تحت تابع هدف‌های متفاوت برای این منظور تعریف شود تا عملکرد هر یک بررسی و با یکدیگر مقایسه شوند.

۲-۲- تعیین مرزهای سیستم

چگونگی انتخاب مرزهای سیستم، یک گام حیاتی در مدل‌سازی به‌شمار می‌رود. از آن‌جا که طراحی مدول‌های ۵ و ۶ تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران مشابه بوده و به‌صورت یکسان بهره‌برداری می‌شوند، تنها یک مدول برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد که این رویکرد در مطالعات پیشین نیز استفاده شده است (Roeleveld and Van Loosdrecht, 2002). در این تحقیق، با توجه به پیچیدگی‌های مدل‌سازی کامل تصفیه‌خانه فاضلاب و نیز تمرکز این تحقیق بر روی بررسی عملکرد سیستم نهراکسیداسیون کاروسل، خط آب تصفیه‌خانه فاضلاب و خط برگشت لجن مدل‌سازی می‌شود. دیاگرام تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران و مرز سیستم انتخابی برای شبیه‌سازی در شکل ۱ نشان داده شده است.

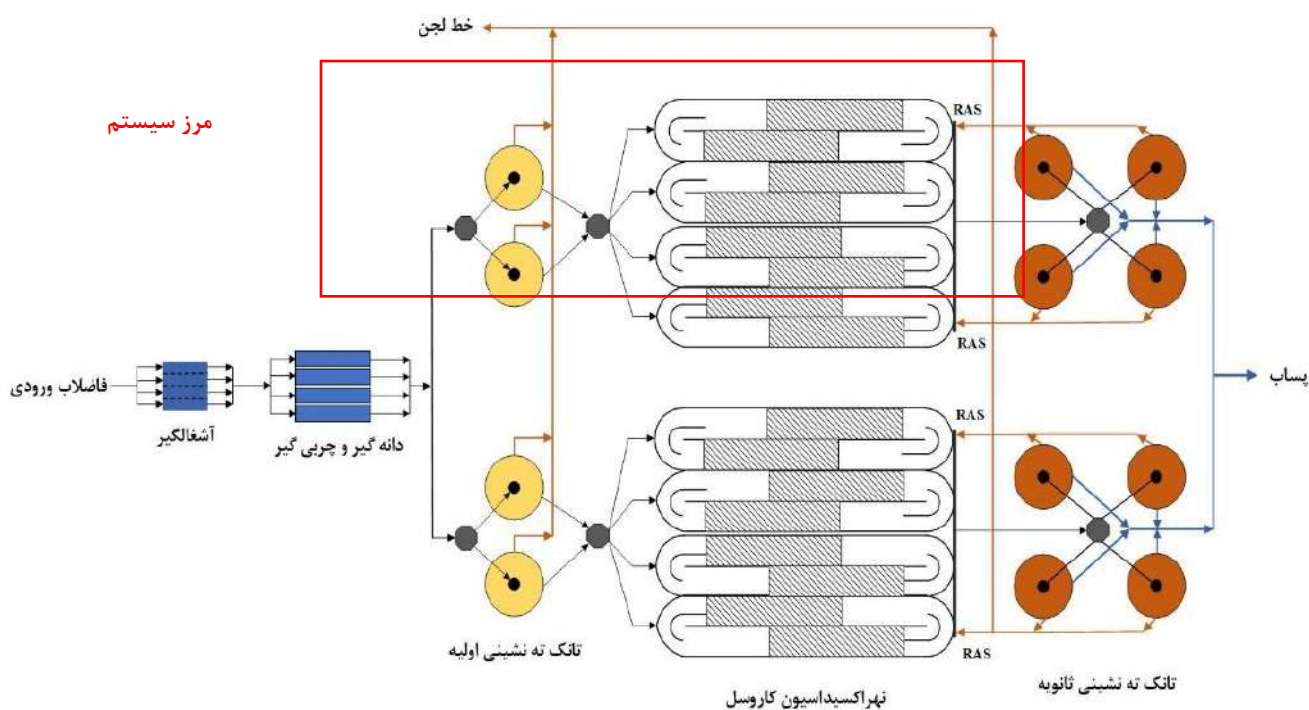
کالیبراسیون دینامیک براساس بهترین نتیجه از کالیبراسیون استاتیک انجام شده است. از مدل بازتوسعه داده شده در این تحقیق می‌توان برای اهداف دیگری همچون اعمال استراتژی‌های کنترل مختلف و بهبود عملکرد سیستم تحت شرایط بهره‌برداری مختلف در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب استفاده کرد.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای شبیه‌سازی سیستم تصفیه‌خانه فاضلاب از دستورالعمل GMP استفاده شده است. طبق این دستورالعمل، مدل‌سازی فرآیندهای تصفیه فاضلاب از چندین مرحله شامل تعیین هدف مدل‌سازی، تعیین مرزهای سیستم، انتخاب مدل‌های فرآیندی (انتخاب و راه‌اندازی مدل‌های فرآیندی، ارتباط میان مدل‌ها)، کالیبراسیون و صحت‌سنجی تشکیل می‌شود (Rieger et al., 2012). در ادامه این بخش، مراحل مدل‌سازی به‌ترتیب بیان می‌شوند.

۲-۱- تعیین هدف مدل‌سازی

اولین گام در شبیه‌سازی فرآیندهای تصفیه فاضلاب، تعیین هدف است. شبیه‌سازی و مدل‌سازی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب می‌تواند با اهداف مختلفی از جمله شناخت، طراحی و بهینه‌سازی فرآیند انجام شود (Hulsbeek et al., 2002). هدف اصلی این



شکل ۱- دیاگرام تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران و واحدهای انتخابی از آن برای شبیه‌سازی

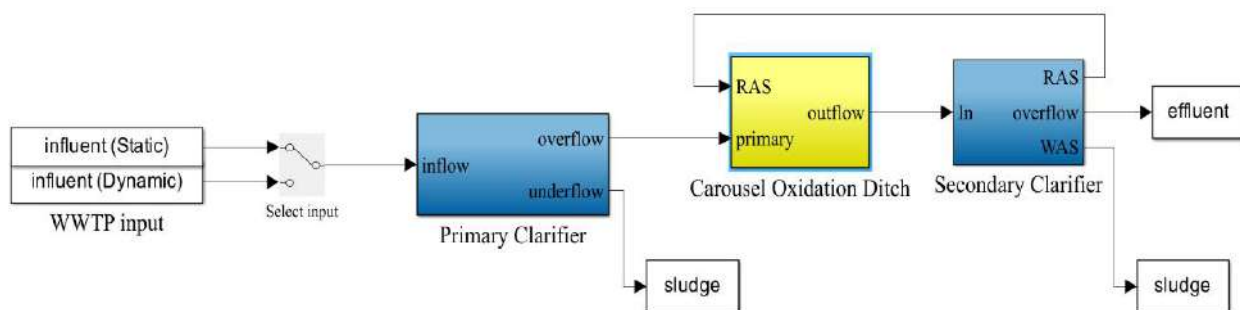
۲-۳- انتخاب مدل‌های فرآیندی

در فرآیند ته‌نشینی اولیه، هدف جداسازی جامدات معلق موجود در فاضلاب خام است، که در طی آن بیش از ۴۰ درصد بار آلی فاضلاب ورودی کاهش می‌یابد (Batstone et al., 2002). در این تحقیق از مدل اوتربل و فروند^{۱۳} (Otterpohl and Freund, 1992) که از جمله مدل‌های متداول در شبیه‌سازی فرآیند ته‌نشینی جامدات در تانک ته‌نشینی اولیه است، استفاده شده است. به‌منظور شبیه‌سازی تانک ته‌نشینی ثانویه، استفاده از مدل‌های یک‌بعدی و چند لایه رایج هستند (Henze et al., 2019). در این تحقیق برای شبیه‌سازی تانک ته‌نشینی ثانویه از مدل تاکاس (Takacs et al., 1991) استفاده شده است. در این مدل، تانک ته‌نشینی ثانویه به ۱۰ لایه تقسیم شده که ته‌نشینی ذرات جامد در همه لایه‌ها اتفاق می‌افتد. در رابطه با مدل‌سازی فرآیند لجن فعال، تحقیقات بسیار زیادی صورت گرفته و مدل‌های متعددی توسعه یافته است (Henze et al., 2019). امروزه ASM1 یکی از رایج‌ترین مدل‌های لجن فعال است که در بسیاری از تحقیقات و پروژه‌های صنعتی برای مدل‌سازی فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی استفاده شده است (Gernaey et al., 2004). رفتار بیولوژیک لجن فعال را با استفاده از هشت فرآیند توصیف کردند که شامل رشد هوازی هتروتروف‌ها، رشد آنوکسیک

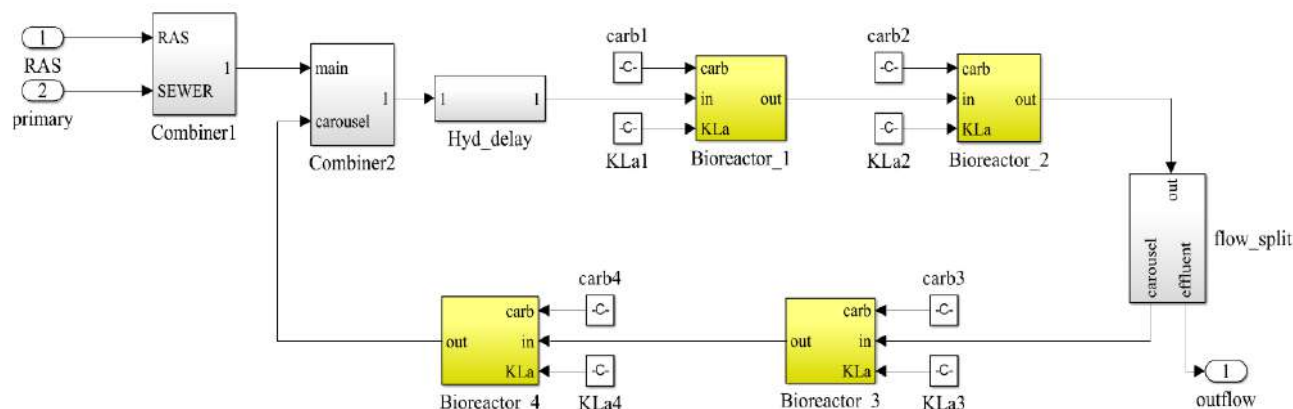
هتروتروف‌ها، رشد هوازی اتوتروف‌ها، زوال هتروتروف‌ها، زوال اتوتروف‌ها، تبدیل نیتروژن آلی محلول به آمونیوم، هیدرولیز مواد آلی به دام افتاده و هیدرولیز مواد آلی نیتروژنی به دام افتاده هستند (رسولی و همکاران، ۱۴۰۱).

۲-۴- پیاده‌سازی مدل

در این تحقیق مدل شبیه‌سازی BSM1 برای ارزیابی عملکرد سیستم نهراکسیداسیون کاروسل و اعمال استراتژی‌های کنترل بر روی آن بازتوسعه داده شده است. مدل بازتوسعه داده شده شامل حوض ته‌نشینی اولیه، نهراکسیداسیون کاروسل و حوض ته‌نشینی ثانویه است که به‌صورت شکل ۲ طراحی شده است. با توجه به این‌که در نهراکسیداسیون کاروسل فاضلاب به‌صورت چرخشی (همانند زمین دو و میدانی) جریان دارد و چهار ناحیه مختلف از لحاظ هوادهی در آن وجود دارد، لذا برای شبیه‌سازی نهراکسیداسیون کاروسل چهار بیورآکتور جداگانه در نظر گرفته که به‌ترتیب به‌صورت آنوکسیک، هوازی، آنوکسیک و هوازی بهره‌برداری می‌شوند. نحوه قرارگیری این بیورآکتور به‌صورت یک حلقه است تا حالت چرخشی جریان فاضلاب را ایجاد کند (شکل ۳).



شکل ۲- نمایی از مدل BSM1 بازتوسعه داده شده



شکل ۳- نحوه مدل‌سازی نهر اکسیداسیون کاروسل

۲-۵- کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل

کالیبراسیون با هدف تنظیم پارامترهای مدل انجام می‌گیرد، به نحوی که خروجی‌های مدل با داده‌های واقعی به دست آمده از تصفیه‌خانه در مقیاس واقعی تطابق داشته باشند تا مدل توصیف دقیقی از فرآیندهای تصفیه را ارائه دهد. کالیبراسیون مدل تصفیه‌خانه فاضلاب به روش‌های مختلفی انجام می‌شود و شامل دو مرحله کالیبراسیون استاتیک و دینامیک است. برای انجام کالیبراسیون در هر یک از گام‌هایی که پیش‌تر بیان شد، از روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی استفاده می‌شود. یکی از رایج‌ترین روش‌ها، استفاده از بهینه‌سازی تکاملی است که در این میان الگوریتم ژنتیک در تحقیقات زیادی استفاده شده و می‌تواند کارایی مناسبی برای این هدف داشته باشد. در این تحقیق، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی در کالیبراسیون مدل تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران استفاده شده است. مشخصات الگوریتم ژنتیک استفاده شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات الگوریتم ژنتیک

احتمال جهش	۰/۶۰
احتمال تزیوج	۰/۸۵
جمعیت هر نسل	۱۰۰
شرط پایان الگوریتم	تغییرات کمتر از ۰/۰۰۱ در تابع ارزیابی در طی گذشت ۲۰ نسل

۲-۶- کالیبراسیون استاتیک

هدف اصلی در کالیبراسیون استاتیک، بهبود کیفیت متغیرهای خروجی است. به علت استفاده از داده‌های میانگین مشاهداتی به عنوان جریان ورودی به این روش استاتیک گفته می‌شود (Petersen et al., 2002). در این تحقیق، به منظور انجام کالیبراسیون استاتیک، از دو سناریو استفاده شده است. در سناریوی اول به منظور انجام کالیبراسیون استاتیک، به طور هم‌زمان ضرایب COD، پارامترهای ته‌نشینی اولیه (مدل اوترپل-فروند)، پارامترهای سیستم لجن فعال (ASM1) و پارامترهای مدل ته‌نشینی ثانویه (مدل تاکاس) به عنوان پارامترهای کالیبراسیون در نظر گرفته شده‌اند که جمعاً شامل ۳۴ متغیر هستند. این در حالی است که در سناریوی دوم، کالیبراسیون پارامترها به طور یک‌باره صورت نگرفته است و به صورت گام‌به‌گام انجام شده است. در واقع، در مرحله اول ابتدا ضرایب COD، پارامترهای ته‌نشینی اولیه (مدل اوترپل-فروند) کالیبره شده‌اند (شامل ۹ پارامتر) و پس از اطمینان از این ضرایب و تنظیم کردن آن‌ها، در مرحله بعد پارامترهای سیستم لجن فعال (ASM1) و

پارامترهای مدل ته‌نشینی ثانویه (مدل تاکاس) که شامل ۲۵ پارامتر است، کالیبره شده‌اند. در جدول ۳، پارامترهای کالیبراسیون استاتیک و مقادیر پیش‌فرض و بازه تغییرات آن‌ها نشان داده شده است.

به منظور بررسی عملکرد کالیبراسیون، در هر یک از سناریوهای ذکر شده در بالا، از درصد خطای موجود بین مقدار به دست آمده از شبیه‌سازی و مقدار اندازه‌گیری شده در تصفیه‌خانه واقعی، به عنوان تابع هدف استفاده می‌شود (Tejaswini et al., 2021). در هر یک از دو سناریوی ذکر شده، از دو تابع هدف متفاوت استفاده شده است. در سناریوی اول، تابع هدف یک که در معادله (۱) به صورت $(OF1)_{scenario 1}$ نشان داده شده است، ۷ متغیر شامل متغیرهای اصلی و فرعی $COD_{primary}$ ، $TSS_{primary}$ ، $COD_{effluent}$ ، $TSS_{effluent}$ ، $TN_{effluent}$ ، X_r و X در تابع هدف در نظر گرفته شده است و در تابع هدف دو که در معادله (۲) به صورت $(OF2)_{scenario 1}$ نشان داده شده است، فقط ۵ متغیر شامل متغیرهای اصلی در نظر گرفته شده است که شامل $COD_{primary}$ ، $TSS_{primary}$ ، $COD_{effluent}$ و $TSS_{effluent}$ است.

$$(OF1)_{scenario 1} = \left| \frac{COD_m - COD_o}{COD_o} \right|_{PST} + \left| \frac{TSS_m - TSS_o}{TSS_o} \right|_{SST} + \left| \frac{COD_m - COD_o}{COD_o} \right|_{SST} + \left| \frac{TSS_m - TSS_o}{TSS_o} \right|_{PST} + \left| \frac{TN_m - TN_o}{N_o} \right|_{SST} + \left| \frac{X_r - X_o}{X_r} \right| + \left| \frac{X_m - X_o}{MLSS_o} \right| \quad (1)$$

$$(OF2)_{scenario 1} = \left| \frac{COD_m - COD_o}{COD_o} \right|_{PST} + \left| \frac{TSS_m - TSS_o}{TSS_o} \right|_{SST} + \left| \frac{COD_m - COD_o}{COD_o} \right|_{SST} + \left| \frac{TSS_m - TSS_o}{TSS_o} \right|_{PST} + \left| \frac{TN_m - TN_o}{N_o} \right|_{SST} \quad (2)$$

که COD : میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی، TSS : کل مواد معلق، TN : نیتروژن کل، X و X_r : به ترتیب نشان‌دهنده $MLSS$ تانک هوادهی و لجن برگشتی، اندیس o و m به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و اندیس PST و SST : نیز به ترتیب نشان‌دهنده تانک ته‌نشینی اولیه و ثانویه هستند.

در سناریوی دوم در هر دو تابع هدف، ابتدا بخش ته‌نشینی اولیه کالیبره شده است، تابع هدف مورد نظر به منظور کالیبراسیون

داده‌های مشاهداتی روزانه تصفیه‌خانه اجرا می‌شود. در کالیراسیون دینامیک، پارامترهای مدل تنشینی اولیه، ضرایب COD و پارامترهای سینتیک ASM1 همان مقادیر به‌دست‌آمده از کالیراسیون استاتیک در نظر گرفته شده‌اند. تابع هدف در نظر گرفته شده در کالیراسیون دینامیک به صورت رابطه (۶) است که در آن n : تعداد داده‌های ورودی است:

$$OF = 1/n \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{(COD_m)_i - (COD_o)_i}{(COD_o)_i} \right|_{SST} + \left| \frac{(TSS_m)_i - (TSS_o)_i}{(TSS_o)_i} \right|_{SST} + \left| \frac{(TN_m)_i - (TN_o)_i}{(TN_o)_i} \right|_{SST} \right) \quad (6)$$

که COD : میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی، TSS : کل مواد معلق، TN : نیتروژن کل، n : تعداد کل داده‌ها، i : نشان‌دهنده گام زمانی داده، اندیس o و m : به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و اندیس SST نیز نشان‌دهنده تانک تنشینی ثانویه هستند.

به منظور اطمینان از عملکرد کالیراسیون لازم است صحت‌سنجی مدل انجام شود. لذا داده‌ها به دو دسته تقسیم شده‌اند. حدود ۶۰٪ کل داده‌ها برای کالیراسیون مدل و ۴۰٪ مابقی برای صحت‌سنجی مدل استفاده شده است (Arnell, 2016).

۲-۷-۱- شاخص ارزیابی عملکرد کالیراسیون دینامیک

در کالیراسیون دینامیک، به علت پیش‌بینی چند نقطه در یک بار اجرای مدل از شاخص MARE (Mean absolute relative error) برای ارزیابی و مقایسه نتایج استفاده شده است. شاخص MARE مطابق رابطه (۷)، متوسط خطای پیش‌بینی نقاط مشاهداتی را محاسبه می‌کند. محدوده خطای پیش‌بینی قابل قبول ۱۵ درصد تعیین شده است. اما در مورد TSS و به طور کلی متغیرهای با مقدار کم و حساسیت پایین، شاخص درصد خطا نماینده مناسبی نیست. لذا معیار ارزیابی نتایج TSS، اختلاف ۳ میلی‌گرم بر لیتر غلظت TSS به‌دست‌آمده از مدل با مقدار مشاهداتی قابل قبول در نظر گرفته شده است.

$$MARE = 1/n \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_m - Y_o}{Y_o} \right| \quad (7)$$

که $MARE$: متوسط خطای نسبی مطلق، Y : متغیر مورد بررسی، n : تعداد کل داده‌ها، اندیس، m و o : به ترتیب نشان‌دهنده متغیر مدل شده و مشاهداتی است.

تنشینی اول به صورت $(OF)_{primary}$ است که در معادله (۳) نشان داده شده است. فقط متغیرهای مربوط به تنشینی اولیه شامل $COD_{primary}$ ، $TSS_{primary}$ در تابع هدف در نظر گرفته شده است، این در حالی است که با رسیدن به تابع هدف مورد نظر، پارامترهای مربوط به تنشینی اولیه و ضرایب COD کالیریه شده‌اند. پس از کالیریه شدن تنشینی اولیه و ثابت کردن ضرایب COD، دو تابع هدف تعریف شده است. در تابع هدف اول که به صورت $(OF1)_{scenario2}$ در معادله (۴) نشان داده شده است، شامل ۵ متغیر $COD_{effluent}$ ، $TSS_{effluent}$ ، $TN_{effluent}$ ، X_r و X است که متغیرهای اصلی و فرعی هستند. در تابع هدف دوم در معادله (۵) که به صورت $(OF2)_{scenario2}$ است، فقط سه متغیر اصلی شامل $COD_{effluent}$ ، $TSS_{effluent}$ ، $TN_{effluent}$ در نظر گرفته شده است.

$$(OF)_{primary} = \left| \frac{COD_m - COD_o}{COD_o} \right|_{PST} + \left| \frac{TSS_m - TSS_o}{TSS_o} \right|_{PST} \quad (3)$$

$$(OF1)_{scenario2} = \left| \frac{TSS_m - TSS_o}{TSS_o} \right|_{SST} + \left| \frac{COD_m - COD_o}{COD_o} \right|_{SST} + \left| \frac{TN_m - TN_o}{N_o} \right|_{SST} + \left| \frac{X_m - X_o}{MLSS_o} \right| + \left| \frac{Xr_m - Xr_o}{Xr_o} \right| \quad (4)$$

$$(OF2)_{scenario2} = \left| \frac{TSS_m - TSS_o}{TSS_o} \right|_{SST} + \left| \frac{COD_m - COD_o}{COD_o} \right|_{SST} + \left| \frac{TN_m - TN_o}{N_o} \right|_{SST} \quad (5)$$

که COD : میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی، TSS : کل مواد معلق، TN : نیتروژن کل، X_r و X : به ترتیب نشان‌دهنده $MLSS$ تانک هوادهی و لجن برگشتی، اندیس o و m : به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و اندیس PST و SST : نیز به ترتیب نشان‌دهنده تانک تنشینی اولیه و ثانویه هستند

۲-۷-۲- کالیراسیون دینامیک

پس از انجام کالیراسیون استاتیک، فرآیند کالیراسیون دینامیک انجام می‌شود. کالیراسیون دینامیک به صورت هم‌زمان برای پارامترهای سیستم لجن فعال و پارامترهای مدل تنشینی ثانویه صورت گرفته است. در کالیراسیون دینامیک برخلاف کالیراسیون دینامیک مدل برای مدت‌زمان طولانی‌تر و با

جدول ۳- پارامترهای کالیراسیون استاتیک و مقادیر پیش فرض و بازه تغییرات آنها (Keskitalo and Leiviskä, 2012; Borzooei et al., 2019)

پارامترهای مدل تاکاس					پارامترهای ASMI				
بازه تغییرات	مقادیر پیش فرض	واحد	معرفی	پارامتر	بازه تغییرات	مقادیر پیش فرض	واحد	معرفی	پارامتر
۴۵۰-۱۰۰	۲۵۰	$m \cdot d^{-1}$	سرعت ته‌نشینی حداکثر	$V_{s,max}$	۰/۷-۰/۵	۰/۶۷		ضریب بازده هتروتروفیک	Y_H
۵۵۰-۱۰۰	۴۷۴	$m \cdot d^{-1}$	سرعت ته‌نشینی حداکثر Vesilind	V_0	۰/۳-۰/۱	۰/۲۴		ضریب بازده اتوتروفیک	Y_A
-۰/۰۰۰۱ ۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۵۷۶	$m^3 \cdot (g SS)^{-1}$	پارامتر بازدارنده ته‌نشینی	r_h	-۰/۰۵ ۰/۲	۰/۰۸	-	نسبت تبدیل بیومس به ذرات معلق	f_P
-۰/۰۰۰۱ ۰/۰۰۹	۰/۰۰۲۸۶	$m^3 \cdot (g SS)^{-1}$	پارامتر انعقاد	r_p	-۰/۰۴ ۰/۵	۰/۰۸۶		نسبت جرم نیتروژن به جرم COD در بیومس	i_{XB}
-۰/۰۰۱ ۰/۰۰۹	۰/۰۰۲۲۸	-	درصد مواد غیر قابل ته‌نشینی	f_{ns}	-۰/۰۳ ۰/۸	۰/۰۶		نسبت جرم نیتروژن به جرم COD در محصولات تولیدی از بیومس	i_{XP}
پارامترهای مدل اوترپل- فروند					۷-۲	۶		نرخ رشد مخصوص حداکثر هتروتروفها	μ_H
بازه تغییرات	مقادیر پیش فرض	واحد	معرفی	پارامتر	۰/۷-۰/۲	۰/۶۲		نرخ زوال هتروتروفها	b_H
۰/۹۹-۰/۱	۰/۶۵	-	فاکتور اصلاحی برای بازدهی حذف	f_{corr}	۱/۵-۰/۳	۰/۸		نرخ رشد مخصوص حداکثر اتوتروفها	μ_A
-۰/۰۰۱ ۰/۰۱	۰/۰۰۷	-	نسبت جریان لجن به جریان ورودی	f_{PS}	-۰/۰۲ ۰/۳	۰/۲		نرخ زوال اتوتروفها	b_A
۰/۹۵-۰/۱	۰/۵	-	درصد قابل ته‌نشینی سوبستره معلق دیرتخریب‌پذیر	f_{SX}	۱/۵-۰/۲	۰/۵	$g NO_3 m^{-3}$	ضریب نیمه اشباع نیترات برای هتروتروفهای فرآیند دنیتریفیکاسیون	K_{NO}
-۰/۰۴۲ ۰/۲	۰/۸۵	-	نسبت COD معلق به کل COD	f_X	۲۲-۳	۲۰	$g COD m^{-3}$	ضریب نیمه اشباع برای هتروتروفها	K_S
ضرایب COD و نرخ هوادهی تانک هوازی					۰/۴-۰/۱	۰/۲		ضریب نیمه اشباع اکسیژن برای هتروتروفها	$K_{O,H}$
بازه تغییرات	مقادیر پیش فرض	واحد	معرفی	پارامتر	۰/۶-۰/۱	۰/۴		ضریب نیمه اشباع اکسیژن برای اتوتروفها	$K_{O,A}$
۰/۱-۰/۰۱	۰/۰۷		COD تخریب‌ناپذیر (محلول)	S_I	۱/۵-۰/۲	۱	$g NH_3 m^{-3}$	ضریب نیمه اشباع آمونیوم برای اتوتروفها	K_{NH}
۰/۵-۰/۰۵	۰/۲۶		سوبستره زود تخریب‌پذیر (محلول)	S_S	۰/۹-۰/۲	۰/۸	-	فاکتور اصلاحی برای رشد آنوکسیک هتروتروفها	η_g
۰/۵-۰/۰۵	۰/۱۶	$gCOD.m^{-3}$	COD تخریب‌ناپذیر (معلق)	X_I	-۰/۰۲ ۰/۱	۰/۰۸	$m^3(gCOD day)^{-1}$	نرخ آمونیفیکاسیون	k_a
۰/۸-۰/۲	۰/۴۷		سوبستره دیر تخریب‌پذیر (معلق)	X_S	۵-۱	۳	$g slowly biodeg. COD (g cell COD day)^{-1}$	نرخ هیدرولیز ویژه حداکثر	k_h
۰/۱۵-۰	۰/۰۳		بیومس هتروتروف	$X_{B,H}$	-۰/۰۱ ۰/۱	۰/۰۳		ضریب نیمه اشباع برای هیدرولیز سوبستره کندتخریب‌پذیر	K_X
۲۰۰-۱۰	۱۰۰	day^{-1}	نرخ هوادهی تانک هوازی	KL_a	۰/۹-۰/۲	۰/۴	-	فاکتور اصلاحی برای هیدرولیز آنوکسیک	η_h

۳- منطقه مورد مطالعه

نهر اکسیداسیون کاروسل است که در آن ضمن حذف اکسیژن خواهی زیستی (BOD)، نیترات‌زایی- نیترات‌زدایی و حذف هوازی به‌طور هم‌زمان انجام می‌شود. مدول ۵ و ۶ تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران شامل تصفیه مقدماتی، تصفیه بیولوژیکی، تصفیه لجن و تصفیه بیوگاز تولیدی از خط لجن است. در شکل ۴ نمای کلی مدول‌های ۵ و ۶ تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران ارائه شده است.

تصفیه‌خانه جنوب تهران در جنوب شهر ری قرار دارد که دارای هشت مدول است. هر مدول با جمعیت تحت پوشش ۵۲۵۰۰۰ نفر و جمعا ۴۲۰۰۰۰۰ نفر احداث شده است (Sadri Moghaddam and Pirali, 2021). بخش موردنظر در این تحقیق مدول ۵ و ۶ است که روش تصفیه بیولوژیکی فاضلاب آن به‌صورت

۳-۱- داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز

برای توسعه و کالیراسیون مدل تصفیه‌خانه فاضلاب اطلاعات مختلفی مانند مشخصات طراحی و بهره‌برداری، خصوصیات مدل بیولوژیکی و ته‌نشینی، داده‌های بهره‌برداری و عملکردی مورد نیاز است (Petersen et al., 2002). داده‌های طراحی با مراجعه به اطلاعات طراحی هر تصفیه‌خانه به سادگی قابل دسترسی است. داده‌های بهره‌برداری نیز به‌طور معمول در تصفیه‌خانه فاضلاب به‌صورت ساعتی و روزانه اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند. در این

تحقیق از داده‌های ۹۰ روز (تیر، مرداد و شهریور ماه) تصفیه‌خانه برای هر متغیر استفاده شده است (۹۰ داده برای هر متغیر) که برای کالیراسیون استاتیک از میانگین داده‌های روزانه اندازه‌گیری شده در تصفیه‌خانه جنوب تهران در تیرماه سال ۱۳۹۸ و برای کالیراسیون دینامیک از داده‌های روزانه اندازه‌گیری شده در تصفیه‌خانه جنوب تهران در مرداد و شهریور سال ۱۳۹۸ استفاده شده است. در جدول ۴ مشخصات کمی و کیفی فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه فاضلاب و پساب خروجی از آن به همراه داده‌های عملکردی ارائه شده است.



شکل ۴- نمای مدول‌های ۵ و ۶ تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران

جدول ۴- مشخصات کمی و کیفی فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه فاضلاب و پساب خروجی از آن

متغیرها	تعریف	واحد	فاضلاب ورودی		پساب خروجی	
			مقدار	انحراف معیار	مقدار	انحراف معیار
Q	دبی	m ³ /d	۱۴۵۰۰±۲۰۰۰	۲۳۱۰/۱	۱۳۶۰۰±۲۰۰۰	۲۵۸۱/۵
T	دما	°C	۲۵±۱۵	۶/۷	-	-
pH	-	-	۷	۰	-	-
COD	میزان اکسیژن خواهی شیمیایی	mg/L	۵۵۰±۱۵۰	۹۷/۷	۲۱±۱۰	۶/۸
TSS	مواد جامد معلق	mg/L	۱۷۰±۳۰	۴۶/۷	۹±۵/۵	۲/۴
NH ₃	آمونیاک	mg/L	۷۲±۱۲	۸/۶	۱۴±۳/۵	۲/۹
TN	نیتروژن کل	mg/L	۷۷±۸	۹/۴	۱۶/۳±۴	۳/۱۲
متغیرها	تعریف	واحد	داده‌های عملکردی		انحراف معیار	
HRT	زمان ماند هیدرولیکی	h	۱۳±۳		۱/۳۲	
SRT	زمان ماند سلولی	days	۱۳±۴		۱/۱	
X	مواد جامد معلق مایع مخلوط	mg/L	۳۰۰۰±۶۰۰		۲۲۰/۱	

۴- نتایج و بحث

۴-۱- کالیبراسیون استاتیک

در جدول ۵، مقادیر متغیرهای کالیبراسیون براساس پارامترهای کالیبره شده برای هر دو سناریو ارائه شده است. در مقایسه کلی تابع هدفهای هر سناریو، همان طور که مشخص است به یک باره کالیبره کردن پارامترها ممکن است خطای برخی از متغیرهای خروجی ته نشینی اولیه مانند COD را کاهش و برخی دیگر مانند TSS را افزایش دهد. همان طور که مشخص است، در سناریوی اول میزان TSS خروجی از ته نشینی اولیه در تابع هدف 1 scenario (OF1) به ۲۵ درصد و در تابع هدف 1 scenario (OF2) به ۳۴ درصد رسیده است. این در حالی است که در سناریوی دوم با انجام کالیبراسیون مرحله ای میزان خطای این متغیر کاهش یافته و به صفر درصد رسیده است و می توان با اطمینان وارد مرحله بعدی شد. همچنین، میزان COD خروجی از ته نشینی اولیه در هر دو سناریو در محدوده ی قابل قبول قرار گرفته است و دارای خطای زیر ۴٪ است. با مقایسه دو سناریو، مشخص است که انجام کالیبراسیون مرحله ای (سناریو دوم)، میزان خطا را به شدت کاهش می دهد و

وضعیت واقعی تری را از شرایط موجود در تصفیه خانه نشان می دهد. همان طور که مشخص است در سناریوی اول میزان خطای تجمعی برای متغیرهای در نظر گرفته شده در تابع هدف یک 1 scenario (OF1) ۹۴٪ و در تابع هدف دوم 1 scenario (OF2) به ۶۷٪ رسیده است. این در حالی است که در سناریوی دوم همین مقادیر به ترتیب به ۳۹٪ و ۱۳٪ رسیده است.

هم چنین در مقایسه توابع هدف در هریک از سناریوها، با در نظر گرفتن تعداد بیشتر متغیر، میزان خطای تجمعی کل متغیرها کاهش یافته است، اگرچه ممکن است میزان خطای تجمعی متغیرهای تابع هدف کم باشد. علت این امر آن است که هرچه تعداد بیشتری متغیر در تابع هدف در نظر گرفته شود، سیستم به طور کلی دارای خطای کمتری است و وضعیت مدل به واقعیت تصفیه خانه نزدیک تر است. این در حالی است که با کمتر گرفتن تعداد متغیرها، اگرچه میزان خطا برای متغیرهای در نظر گرفته شده در تابع هدف کم می شود. ولی سایر متغیرها که در تابع هدف نیستند، دارای خطای بیشتری هستند و شرایطی به وجود می آید که به خوبی شرایط واقعی تصفیه خانه را مدل نمی کند و همراه با خطای زیاد است.

جدول ۵- مقدار متغیرهای کالیبراسیون و درصد خطای آن در کالیبراسیون استاتیک

X	X _r	TSS primary	COD effluent	TN effluent	TSS primary	COD primary	خطای تجمعی همه متغیرها	خطای تجمعی متغیرهای تابع هدف	خطای متوسط متغیرهای تابع هدف	خطای متوسط همه متغیرها	زمان اجرای برنامه
کالیبراسیون سناریوی اول											
۲۲۲۹	۳۲۸۰	۸	۱۸/۳	۱۵	۸۹	۳۱۵	-	-	-	-	مقدار مشاهداتی
۱۷۷۰ (٪۲۱)	۳۵۱۶ (٪۷)	۷ (٪۱۳)	۱۸ (٪۲)	۱۱ (٪۲۷)	۱۱۱ (٪۲۵)	۳۰۸ (٪۲)	٪۹۴	٪۹۴	٪۱۳	٪۱۳	تابع هدف ۱
۲۳۶۷ (٪۶)	۴۷۰۶ (٪۴۳)	۸ (٪۰)	۱۷ (٪۷)	۲۰ (٪۳۳)	۱۲۰ (٪۳۴)	۳۰۰ (٪۴)	٪۱۱۶	٪۶۷	٪۱۶	٪۱۳	تابع هدف ۲
کالیبراسیون سناریوی دوم											
۱۸۱۰ (٪۱۹)	۳۵۹۹ (٪۱۰)	۸ (٪۰)	۱۸ (٪۲)	۱۵ (٪۰)	۸۹ (٪۰)	۳۱۵ (٪۰)	٪۳۹	٪۳۹	٪۸	٪۸	تابع هدف ۱
۲۱۰۵ (٪۰/۰۴)	۴۱۸۲ (٪۲۸)	۷ (٪۱۳)	۱۸ (٪۲)	۱۵ (٪۰)	۸۹ (٪۰)	۳۱۵ (٪۰)	٪۴۱	٪۱۳	٪۴	٪۸	تابع هدف ۲

دوم فقط یک مجموعه پارامتر تعریف شده است. با مقایسه پارامترهای اوتریپول فروند در دو سناریو مشخص است که دو پارامتر f_{sx} و f_x تقریباً ثابت بوده و تغییری نکرده اند. هم چنین با مقایسه ضرایب COD مشخص است که در هر سناریو مجموعه پارامترهای متفاوتی تنظیم شده اند که نشان دهنده حساسیت

جدول ۶ اطلاعات مربوط به مقادیر پارامترهای کالیبراسیون را نشان می دهد، همان طور که در جدول مشخص است، برای پارامترهای اوتریپول فروند و ضرایب COD، در کالیبراسیون سناریوی اول دو مجموعه پارامتر برای 1 scenario (OF1) و 1 scenario (OF2) معرفی شده است، در حالی که برای سناریوی

روند با مقایسه OF2 در دو سناریو مشاهده می‌شود که پارامترهای f_p ، Y_H ، N_H ، K_S ثابت هستند و تغییری نکرده‌اند.

هم‌چنین با مقایسه تابع هدف‌های سناریوی اول به‌طور جداگانه مشخص است که تعداد بیشتری پارامتر (۷ پارامتر) از لحاظ مقداری مشابه هم می‌شوند و این به‌خاطر روندی است که در این مسیر طی می‌شود. در واقع با کالیبره کردن مرحله‌ای از آن‌جا که به سمت جواب خوب مدل هدایت می‌شود و میزان خطای آن در خروجی ته‌نشینی ثانویه در هر کدام کمتر است، بنابراین تعداد پارامتری بیشتری شبیه به هم هستند. همین روند را نیز در سناریوی دوم می‌توان مشاهده کرد، با این تفاوت که ۵ پارامتر ASM1 شبیه به هم هستند.

بالای مدل به این پارامترها است و تنظیم آن تاثیر بسیار زیادی در نتایج مدل دارد.

درحالی‌که دلتواز (۱۳۹۶) در تحقیق خود فقط پارامترهای Y ، k_d ، k_0 و K_S را در شرایط بهره‌برداری تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک اکباتان تهران در مدل ASM1 مورد ارزیابی قرار داده است، در این تحقیق به‌منظور مقایسه پارامترهای ASM1 در دو سناریو، از یک تابع هدف در هر دو سناریو استفاده کرده است. لذا از آن‌جا که متغیرهای تابع هدف یکسان است، بنابراین انتظار می‌رود که متغیرهای زیادی مقادیرشان مانند یکدیگر باشند که از جمله آن‌ها می‌توان به K_S ، N_H ، n_{y_g} ، k_a و Y_H اشاره کرد. همین

جدول ۶- مقدار پارامترهای کالیبره‌شده در هر مرحله از کالیبراسیون استاتیک

کالیبراسیون سناریوی دوم					کالیبراسیون سناریوی اول						
(OF) _{primary}	پارامترهای اوت‌ریپول فروند	OF2	OF1	پارامترهای ASM1	OF2	OF1	پارامترهای اوت‌ریپول فروند	OF2	OF1	پارامترهای ASM1	
۰/۸۶	f_{corr}	۵/۲۷	۷	μ_H	۰/۲۴	۰/۱	f_{corr}	۷	۵/۴	μ_H	
۰/۹۵	f_{PS}	۳	۲۲	K_S	۰/۵	۷۱/۷۳	f_{PS}	۳	۲۲	K_S	
۰/۰۰۱	f_{SX}	۰/۱	۰/۴	OH	۰/۰۱	۰/۰۱	f_{SX}	۰/۴	۰/۱	OH	
۰/۰۴	f_X	۰/۱۹	۰/۴	K_{NO}	۰/۰۴	۰/۰۴	f_X	۰/۱	۰/۱	K_{NO}	
(OF) _{primary}	ضرایب COD	۰/۶۹	۰/۲۸	b_H	OF2	OF1	ضرایب COD	۰/۴۲	۰/۲	b_H	
		۱/۵	۱/۵	μ_A				۰/۳	۰/۶۷	μ_A	
۰/۰۱	S_I	۱/۵	۱/۴۵	N_H	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	S_I	۱/۵	۱/۵	N_H	
۰/۲۶	S_S	۰/۱	۰/۵۶	K_{OA}	۰/۰۷	۰/۰۷	S_S	۰/۱۶	۰/۱۶	K_{OA}	
۰/۰۵	X_I	۰/۱۷	۰/۳	b_A	۰/۰۷	۰/۴۱	X_I	۰/۰۲	۰/۰۲	b_A	
۰/۲	X_S	۰/۵	۰/۵	n_{y_g}	۰/۲۷	۰/۳۱	X_S	۰/۷	۰/۵	n_{y_g}	
۰/۱۵	$X_{B,H}$	۰/۱	۰/۱	k_a	۰	۰/۲۰	$X_{B,H}$	۰/۰۲	۰/۱	k_a	
OF2	OF1	پارامترهای مدل تاکاس	۱/۹۸	۱/۵۶۸	k_h	OF2	OF1	پارامترهای مدل تاکاس	۱	۱/۰۰۲	k_h
			۰/۰۱	۰/۰۱	K_X				۰/۰۱	۰/۰۱	K_X
۱۰۰	۲۸۹/۶	$V_{S,max}$	۰/۹	۰/۳۴	n_{y_h}	۲۰۰	۱۰۰	$V_{S,max}$	۰/۲	۰/۲	n_{y_h}
۱۷۰	۱۰۰	V_0	۰/۷	۰/۵۱	Y_H	۵۳۶/۲	۱۰۰	V_0	۰/۷	۰/۵	Y_H
۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۱	r_h	۰/۳	۰/۲۸	Y_A	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	r_h	۰/۲۰	۰/۳	Y_A
۰/۰۰۹	۰/۰۸	r_p	۰/۲	۰/۲	f_p	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	r_p	۰/۲	۰/۱۲۶	f_p
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	f_{ns}	۰/۰۴	۰/۰۹	i_{XB}	۰/۰۱	۰/۰۰۱	f_{ns}	۰/۵	۰/۳۴	i_{XB}
			۰/۰۳	۰/۶۷۱	i_{XP}				۰/۸	۰/۸	i_{XP}

۴-۲- کالیبراسیون و صحت‌سنجی دینامیک

در جدول ۷، مقادیر پارامترهای کینتیک مدل لجن فعال، پارامترهای مدل ته‌نشینی ثانویه و ضرایب COD به‌دست‌آمده از کالیبراسیون دینامیک ارائه شده است.

در شکل ۵ نتایج اجرای دینامیک مدل با پارامترهای کالیبره‌شده نهایی ارائه شده است. در این شکل، ۸ روز اول به

با توجه به دو سناریوی معرفی‌شده در بالا، از آن‌جا که بهترین تابع هدف مربوط به تابع هدف اول از سناریوی دو است و میزان خطای تجمعی همه متغیرهای آن ۳۹٪ است، از مقادیر پارامترهای کالیبره‌شده به‌عنوان مقدار اولیه کالیبراسیون دینامیک استفاده شده‌اند.

تعیین شده است. در ادامه ۱۴ روز بعدی به‌عنوان داده‌های ورودی کالیبراسیون و ۸ روز به‌عنوان داده ورودی برای صحت‌سنجی در نظر گرفته شده است.

اصطلاح برای گرم‌شدن^{۱۴} مدل یا تطبیق شرایط اولیه مدل با شرایط واقعی در نظر گرفته شده است. تعداد روزهای موردنیاز برای گرم‌شدن یا آمادگی مدل بسته به مدل طراحی شده می‌تواند بسیار متفاوت باشد که مقدار ۸ روز براساس آزمایش اولیه مدل

جدول ۷- مقدار پارامترهای کالیبره‌شده در کالیبراسیون دینامیک

ضرایب COD			پارامترهای کینتیک ASM1		
			کالیبراسیون دینامیک	واحد	پارامتر
کالیبراسیون دینامیک	واحد	پارامتر	۸	day ⁻¹	$\hat{\mu}_H$
۰/۰۰۹	gCOD.m ⁻³	S _I	۰/۶۴		b_H
۰/۴۵		S _S	۰/۱		$\hat{\mu}_A$
۰/۰۴۵		X _I	۰/۳		b_A
۰/۳۶		X _S	۰/۸		K_{NO}
۰/۱۴		X _{B.H}	۱	K_S	
پارامترهای مدل تاکاس			۰/۵	g O ₂ m ⁻³	$K_{O.H}$
			۰/۱		$K_{O.A}$
کالیبراسیون دینامیک	واحد	پارامتر	۰/۲	g NH ₃ m ⁻³	K_{NH}
۱۰۰	m · d ⁻¹	V _{S.max}	۰/۲۹	-	η_g
۱۰۹	m · d ⁻¹	V ₀	۰/۰۲	m ³ (gCOD day) ⁻¹	k_a
۰/۰۰۰۱	m ³ · (g SS) ⁻¹	r _h	۰/۵	g slowly biodeg. COD (g cell COD day) ⁻¹	k_h
۰/۰۰۹	m ³ · (g SS) ⁻¹	r _p	۰/۳		K_X
۰/۰۰۲	-	f _{ns}	۰/۹	-	η_h

برخوردار نیستند، زیرا برخی از نقاط حداکثری COD خروجی در ورودی‌هایی رخ داده است که در شرایط عادی قرار دارند. تجربه نشان‌دهنده است که معمولاً علت وجود مقادیر حداکثر در COD به‌علت کمبود اکسیژن در تانک‌های هوادهی است که به‌علت عدم وجود داده‌های کافی نمی‌توان این شرایط بهره‌برداری را دقیقاً در مدل لحاظ کرد.

نتایج به‌دست‌آمده با نتایج سایر مطالعات مشابه است. (Sadri Moghaddam and Pirali (2021 در مطالعه خود پس از انجام کالیبراسیون میزان ARE را برای متغیرهای BOD، COD، TSS و TN به ترتیب ۰/۱۳/۲۵، ۰/۱۴/۰۲، ۰/۱۴/۶۳ و ۱۴/۱۸۸ به‌دست آوردند. میزان ARE برای متغیرهای COD و N-NH₄ در مطالعه Vitanza et al. (2016b) به ترتیب ۱۲/۱۸۸ و ۳۰/۷ به‌دست آمد. در مطالعه‌ای که Chen et al. (2020) انجام دادند، میزان ARE برای متغیرهای COD، N-NH₄، TN و TP به ترتیب ۰/۴/۷۲، ۱۸/۱۸۷، ۹/۴۵ و ۳۸/۱۱ به‌دست آمد.

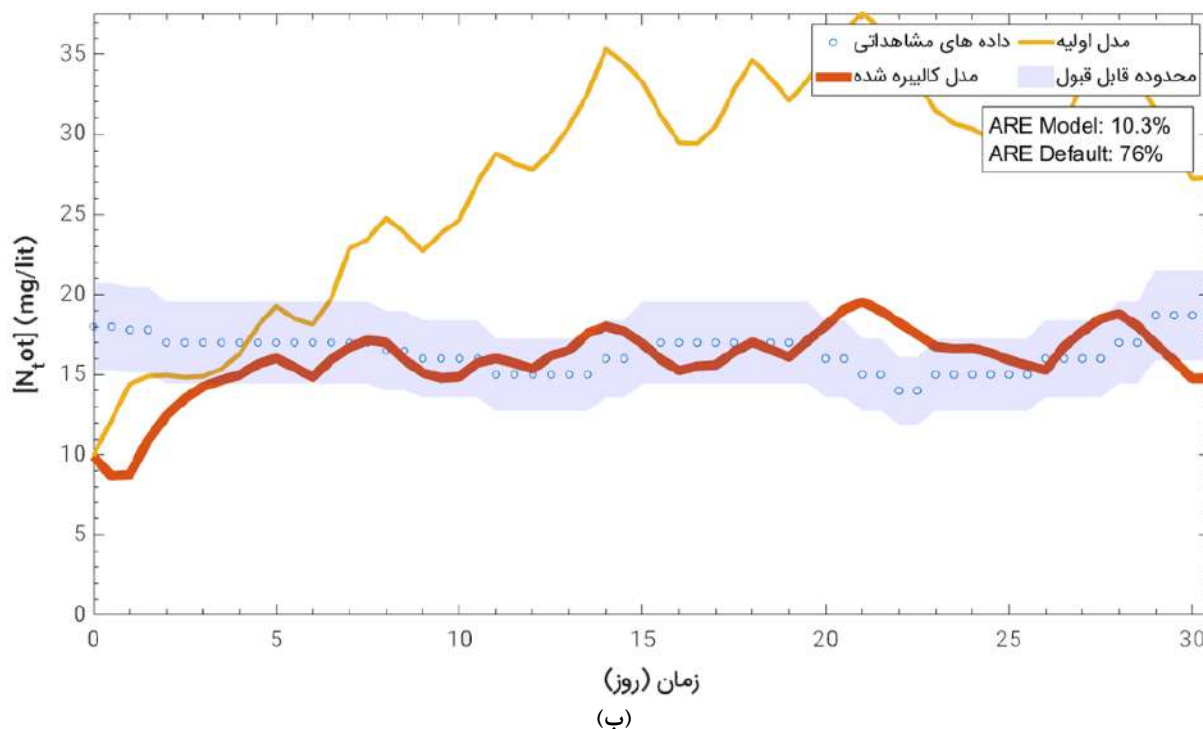
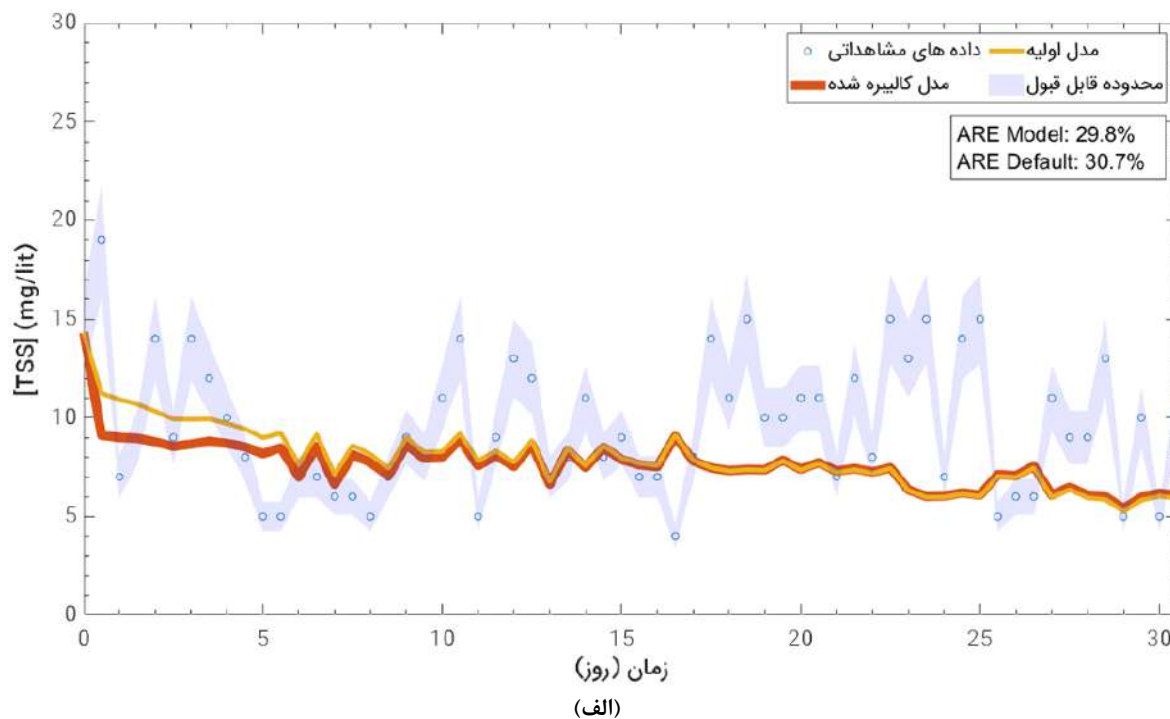
۵- جمع‌بندی

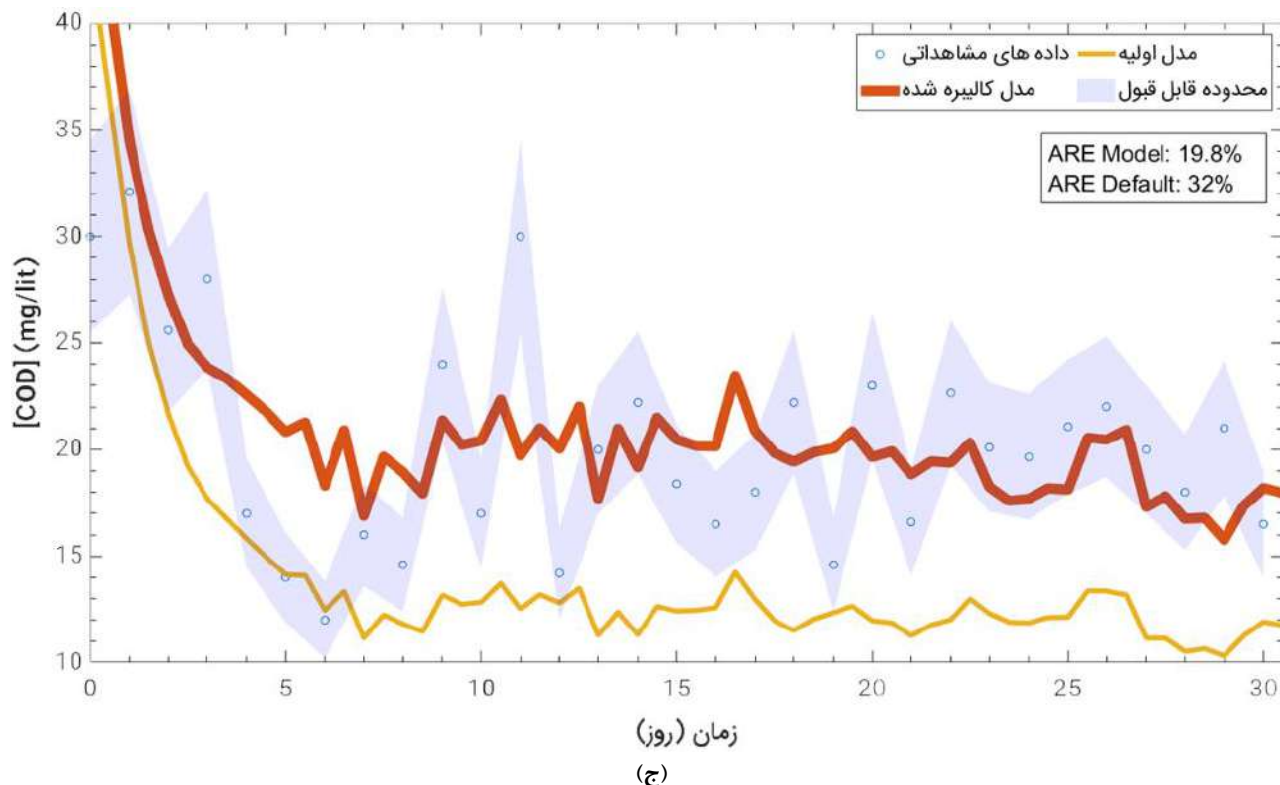
هدف از این تحقیق، بررسی سناریوهای مختلف برای رسیدن به

در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود که به‌علت ثابت در نظر گرفتن پارامترهای مرتبط با متغیر TSS شامل پارامترهای تانک ته‌نشینی اولیه و ضرایب COD در کالیبراسیون دینامیک، این متغیر به‌درستی از رفتار دینامیک تصفیه‌خانه پیروی نمی‌کند. گرچه به‌علت کالیبراسیون استاتیکی اولیه مدل با خطای متوسط ۳ میلی‌گرم در لیتر قادر به پیش‌بینی این متغیر است. با توجه به نمودارهای متغیرهای COD و TN ضرایب COD تعیین‌شده در مرحله کالیبراسیون استاتیک اولیه قابل‌قبول بوده‌اند که نشان‌دهنده کارآمدی کالیبراسیون اولیه است. اما برای بهبود پیش‌بینی TSS یا باید در بخش استاتیک معیار اعتبارسنجی از یک روز ثابت به داده‌های کالیبراسیون دینامیک تغییر باید و یا این پارامترها در بخش دینامیک نیز لحاظ شوند. در شکل ۵-ب کاهش خطای پیش‌بینی نیتروژن کل از ۷۶ درصد در مدل اولیه (با پارامترهای پیش‌فرض) به ۱۰/۳ درصد در مدل کالیبره‌شده مشاهده می‌شود. در شکل ۵-ج خطای پیش‌بینی COD مدل کالیبره‌شده تقریباً ۲۰ درصد است. کالیبره کردن COD چالش برانگیزترین بخش کالیبراسیون مدل بوده است، زیرا این متغیر از پارامترهای زیادی تاثیر می‌پذیرد. از سوی دیگر طبق بررسی‌های انجام‌شده، ظاهراً داده‌های COD مشاهداتی از دقت بالایی

TSS و COD و TN پساب خروجی، واحد ته‌نشینی اولیه، و متغیرهای فرعی شامل غلظت مواد معلق لجن برگشتی (X_r) و میزان مواد معلق فرار (X) در نظر گرفته شده است. ابتدا کالیبراسیون تحت سناریو و توابع هدف مختلف انجام و پس از انتخاب بهترین سناریو و تابع هدف، کالیبراسیون دینامیک انجام شد.

کالیبراسیون مناسب است. بدین منظور، مدل BSM1 در نرم‌افزار سیمولینک برای شبیه‌سازی سیستم تصفیه نهراکسیداسیون کاروسل بازتوسعه داده شده است. پس از ساخت مدل، فرآیند کالیبراسیون تحت دو سناریوی متفاوت به صورت در نظر گرفتن همه پارامترها و در نظر گرفتن گام‌به‌گام مرحله‌ای پارامترها، هر یک تحت دو تابع هدف که نسبت به تحقیقات پیشین متفاوت است، انجام شد. در توابع هدف متغیرهای اصلی شامل COD،





شکل ۵- مقایسه نتایج متغیرهای کیفی پساب خروجی مدل در دو حالت پارامترهای پیش فرض و پارامترهای کالیبره شده دینامیک برای شبیه سازی ۳۰ روزه؛ الف) متغیر TSS؛ ب) متغیر TN؛ و ج) متغیر COD

- 10- Total Suspended Solids
- 11- Chemical Oxygen Demand
- 12- Total Nitrogen
- 13- Otterpohl and Freund
- 14- Warm Up

۷- مراجع

اسدی آسیابدری، ف.، نصرتی، م.، و احمدی، م.، (۱۳۹۴)، "مدل سازی سیستم های تصفیه فاضلاب: مطالعه موردی مدل سازی تصفیه خانه پساب پالایشگاه تهران با نرم افزار Biowin"، *اولین کنفرانس ملی توسعه پایدار در سیستم های مهندسی انرژی، آب و محیط زیست، تهران*.

دلنواز، م.، (۱۳۹۶)، "استفاده از مدل های ریاضی تعیین ضرایب سینتیکی رشد میکروارگانیسم ها برای ارزیابی کارایی تصفیه خانه های فاضلاب"، *مجله مهندسی بهداشت محیط*، ۳(۳)، ۲۵۷-۲۶۸.

رجایی، م.، (۱۳۹۹)، "ارتقاء عملکرد تصفیه خانه فاضلاب با هدف کاهش هزینه های بهره برداری و افزایش قابلیت اطمینان سیستم"، *پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران*.

رجایی، م.، و نظیف، س.، (۱۳۹۶)، "بهبود تاب آوری تصفیه خانه فاضلاب با استفاده از سیستم کنترل هوادهی"، *سومین کنگره*

نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن تعداد بیشتری متغیر در تابع هدف کالیبراسیون، خطای تجمعی همه متغیرها کاهش می یابد. همچنین به یکباره کالیبره کردن پارامترهای مدل همراه با خطای بیشتری نسبت به تنظیم گام به گام پارامترها در کالیبراسیون است که میزان خطای مدل را به میزان قابل توجهی تا ۸٪ کاهش می دهد. به منظور انجام کالیبراسیون دینامیک از بهترین مدل کالیبره شده استاتیک استفاده شده است. نتیجه نهایی به ترتیب در پیش بینی مقدار TSS، TN و COD خطای متوسط ۳۰، ۱۰ و ۲۰ درصد دارد که این عملکرد با توجه به محدودیت داده ها، بسیار مناسب است.

۶- پی نوشت

- 1- Benchmark Simulation Model no.1
- 2- Good Modeling Practice
- 3- Mixed Liquor Suspended Solids
- 4- Dutch Foundation of Applied Water Research
- 5- Protocol of Biomath department in ghent university
- 6- Water Environment Research Foundation, North America
- 7- Protocol written by a group of university members from Germany, Austria and Switzerland
- 8- Activated Sludge Model no.1
- 9- Particle Swarm Optimization

- ASDM model", *Journal of Water Process Engineering*, 31, 100819, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100819>.
- Gernaey, K.V., Van Loosdrecht, M.C.M., Henze, M., Lind, M., and Jørgensen, S.B., (2004), "Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: State of the art" *Environmental Modelling and Software*, 19(9), 763-783, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.03.005>.
- Henze, M., van Loosdrecht, M.C.M., Ekama, G.A., and Brdjanovic, D., (2019), "Biological wastewater treatment: Principles, modeling and design", *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modeling and Design*, IWA Publishing, UK, <https://doi.org/10.2166/9781780408613>.
- Hulsbeek, J.J., Kruit, J., Roeleveld, P., and van Loosdrecht, M.C.M., (2002), "A practical protocol for dynamic modelling of activated sludge systems", *Water Science and Technology*, 45(6), 127-136.
- Hvala, N., Vrečko, D., Bordon, C., (2018), "Plant-wide modelling for assessment and optimization of upgraded full-scale wastewater treatment plant performance", *Water Practice and Technology*, 13(3), 566-582, <https://doi.org/10.2166/wpt.2018.070>.
- Kim, S., Lee, H., Kim, J., Kim, C., Ko, J., Woo, H., and Kim, S., (2002), "Genetic algorithms for the application of Activated Sludge Model No. 1", *Water Science and Technology*, 45(4-5), 405-411, <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0636>.
- Lindblom, E., Jeppsson, U., and Sin, G., (2020), "Identification of behavioural model input data sets for WWTP uncertainty analysis", *Water Science and Technology*, 81(8), 1558-1568, <https://doi.org/10.2166/wst.2019.427>.
- Noophan, P., Rodpho, R., Sonmee, P., Hahn, M., and Sirivitayaphakorn, S., (2018), "Nutrient removal performance on domestic wastewater treatment plants (full scale system) between tropical humid and cold climates", *Applied Environmental Research*, 40(2), 32-39, <https://doi.org/10.35762/aer.2018.40.2.3>.
- Otterpohl, R., and Freund, M., (1992), "Dynamic models for clarifiers of activated sludge plants with dry and wet weather flows", *Water Science and Technology*, 26(5-6), 1391-1400, <https://doi.org/10.2166/wst.1992.0582>.
- Petersen, B., Gernaey, K., Henze, M., and Vanrolleghem, P.A., (2002), "Evaluation of an ASM1 model calibration procedure on a municipal-industrial wastewater treatment plant", *Journal of Hydroinformatics*, 4(1), 15-38, <https://doi.org/10.2166/hydro.2002.0003>.
- Qasim, S.R., (1999), *Wastewater treatment plants: Planning, design, and operation*, Second Edition, Routledge, United States, <https://doi.org/10.1201/9780203734209>.
- Rieger, L., Gillot, S., Langergraber, G., Ohtsuki, T., Shaw, A., Takacs, I., and Winkler, S., (2012), *Guidelines for using Activated Sludge Models EWA Task Group on Good Modelling Practice*, (Vol. 9781843391), IWA Publishing, UK.
- Sadri Moghaddam, S., and Pirali, M., (2021), "Modeling علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
- رسولی، ر.، علافی اسکویی، ر.، غفارزاده، الف.، و سعادت پور، م.، (۱۴۰۱)، "بهینه‌سازی فرآیند هوادهی در تصفیه فاضلاب"، هجدهمین کنفرانس ملی پژوهش‌های نوین در علوم و مهندسی شیمی، بابل، ایران.
- رحیمی، ا.، و شکوهیان، م.، (۱۴۰۱)، "بهینه‌سازی چند هدفه فرآیند تصفیه فاضلاب توسط الگوریتم فرا ابتکاری GA-NIMBUS برپایه مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی (مطالعه موردی پایلوت A2O)"، چهارمین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت محیط‌زیست، مازندران.
- رهنمافر، ف.، و شکوهیان، م.، (۱۴۰۰)، "بهینه‌سازی عملکرد سیستم تصفیه فاضلاب به‌روش وتلند توسط مدل‌سازی عددی (مطالعه موردی سه تصفیه‌خانه فاضلاب وتلند خراسان رضوی)، بخش دوم: ارزیابی شبیه‌سازی، فاکتورهای اثرگذار و پیشنهادات اجرایی"، چهارمین همایش ملی فناوری‌های نوین در مهندسی معماری، عمران و شهرسازی ایران، تهران، ایران.
- کلیوند، ز.، و قاضی مرادی، ش.، (۱۳۹۹)، "بررسی عملکرد ارتقای فرآیندی تصفیه‌خانه فاضلاب شهر بندرعباس"، کنفرانس ملی مهندسی شیمی و نانوفناوری، خوزستان.
- Arnell, M., (2016), "Performance assessment of wastewater treatment plants, Multi-objective analysis using plant-wide models", Ph.D. Thesis, Lund University, Sweden.
- Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V., Pavlostathis, S.G., Rozzi, A., Sanders, W.T., Siegrist, H., and Vavilin, V.A., (2002), "The IWA Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)", *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 45(10), 65-73, <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0292>.
- Cao, J., Yang, E., Xu, C., Zhang, T., Xu, R., Fu, B., Feng, Q., Fang, F., and Luo, J., (2021), "Model-based strategy for nitrogen removal enhancement in full-scale wastewater treatment plants by GPS-X integrated with response surface methodology", *Science of the Total Environment*, 769, 144851, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144851>.
- Chen, W., Dai, H., Han, T., Wang, X., Lu, X., and Yao, C., (2020), "Mathematical modeling and modification of a cycle operating activated sludge process via the multi-objective optimization method", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), 104470, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104470>.
- Elawwad, A., Matta, M., Abo-Zaid, M., and Abdel-Halim, H., (2019), "Plant-wide modeling and optimization of a large-scale WWTP using BioWin's

- and calibration of a full-scale wastewater treatment plant using GPS-X model (A case study of Tehran)", *Numerical Methods in Civil Engineering*, 5(4), 67-76, <https://doi.org/10.52547/nmce.5.4.67>.
- Shahed Behrouz, M., Zhu, Z., Matott, L.S., and Rabideau, A.J., (2020), "A new tool for automatic calibration of the Storm Water Management Model (SWMM)", *Journal of Hydrology*, 581(2), 124436, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124436>.
- Takacs, I., Patry, G.G., and Nolasco, D., (1991), "A dynamic model of the clarification, Thickening process", *Water Research*, 25(10), 1263-1271.
- Tejaswini, E.S.S., Panjwani, S., Gara, U.B.B., and Ambati, S.R., (2021), "Multi-objective optimization based controller design for improved wastewater treatment plant operation", *Environmental Technology and Innovation*, 23, 101591, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101591>.
- Tomita, R.K., and Park, S.W., (2009), "Evolutionary multi-objective optimization of an activated sludge process", *Computer Aided Chemical Engineering*, 27(C), 747-752, [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(09\)70345-1](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(09)70345-1).
- Zeferino, J.A., Antunes, A.P., and Cunha, M.C., (2009), "An efficient simulated annealing algorithm for regional wastewater system planning", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 24(5), 359-370, <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2009.00594.x>.



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

Optimizing and Investigating the Removal of Deltamethrin Pesticide from Aqueous Environments by AC/Fe₃O₄ Magnetic Activated Carbon Composite using Response Surface RSM-BBD Method

بهینه‌سازی و بررسی حذف آفت‌کش دلتامترین از محیط‌های آبی توسط کامپوزیت کربن فعال مغناطیسی AC/Fe₃O₄ با استفاده از روش سطح پاسخ RSM-BBD

حسین رسولی^۱ و رضا محمدی^{۲*}

Hossein Rasouli¹ and Reza Mohammadi^{2*}

1- M.Sc., Faculty of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2- Associate Professor, Polymer Research Laboratory, Department of Organic Chemistry and Biochemistry, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

* Corresponding Author, Email: r.mohammadi@tabrizu.ac.ir

Received: 25/02/2023

Revised: 29/04/2023

Accepted: 10/05/2023

© IWVA

۱- کارشناس ارشد مهندسی پلیمر، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲- دانشیار آزمایشگاه پژوهشی پلیمر، گروه شیمی آلی و بیوشیمی، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

* نویسنده مسئول، ایمیل: r.mohammadi@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

The presence of various pollutants, especially pesticides in water sources is one of the important wastewater issues in the field of environment. The main purpose of this study is to remove and evaluate the optimal conditions and adsorption process of Deltamethrin pesticide by AC/Fe₃O₄ composite from aqueous solutions. For this purpose, adsorbents were first synthesized and then characterized and investigated using FT-IR, SEM, XRD, and VSM methods, which generally showed that the adsorbent was synthesized correctly. Then the optimal conditions (pH, contact time, initial concentration of Deltamethrin, and adsorbent dose) for removal of Deltamethrin by this adsorbent were evaluated according to the response surface methodology. The results showed that the maximum adsorption capacity of the adsorbent in the studied conditions for Deltamethrin is equal to 99.179 mg/g. The best models expressing the process of uptake of Deltamethrin by adsorbents are pseudo-second-order kinetic models, double exponential mechanism and sips isotherm. In addition, the adsorption process of Deltamethrin by AC/Fe₃O₄ composite is exothermic and with an enthalpy value equal to 54.79 KJ/mol. The results of this study showed that AC/Fe₃O₄ adsorbents have the ability to be used in the adsorption and desorption process of Deltamethrin with an adsorption percentage of more than 95%.

آلودگی آب‌های سطحی توسط آفت‌کش‌ها یکی از مهم‌ترین آلودگی‌های محیط‌زیست است. در این مطالعه کامپوزیت مغناطیسی کربن فعال/نانوذرات آهن (AC/Fe₃O₄) سنتز و در جذب سم دلتامترین از محلول آبی مورد استفاده قرار گرفت. آنالیزهای FT-IR، SEM، XRD و VSM مطالعه خصوصیات جاذب مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این آنالیزها نشان داد که جاذب مورد نظر با موفقیت سنتز شده است. با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)، طراحی آزمایش به روش باکس-بنکن (BBD) رفتار جاذب در جذب آفت‌کش دلتامترین و هم‌چنین به‌دست آوردن شرایط بهینه جذب مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشینه ظرفیت جذب جاذب مورد نظر در شرایط مورد بررسی برای آفت‌کش دلتامترین برابر با ۹۹/۱۷۰ میلی‌گرم بر گرم است. هم‌چنین بهترین مدل برای بیان فرآیند جذب سم دلتامترین توسط جاذب مورد بررسی مدل ایزترمی سیپ است، که از معادله سینتیک شبه درجه دوم پیروی می‌کند. بنابراین تعاملات بین جاذب و دارو به‌صورت واکنش‌های شیمیایی است. از سوی دیگر نتایج ترمودینامیکی نشان داد فرآیند به‌صورت گرمازا و با مقدار آنالپی برابر ۵۴/۷۹ KJ/mol است. نتایج این مطالعه نشان داد که کامپوزیت مغناطیسی AC/Fe₃O₄ توانایی استفاده شدن تا ۱۰ مرحله فرآیند جذب و واجذب سم دلتامترین با درصد جذب بیشتر از ۹۵٪ را دارا است.

کلمات کلیدی: آفت‌کش دلتامترین، AC/Fe₃O₄، جذب سطحی، روش سطح پاسخ.

Keywords: AC/Fe₃O₄, Adsorption, Deltamethrin, Response Surface Methodology.

قابل توجه، ساختار متخلخل و منفذی، ظرفیت جذب بالا، قابلیت فعال سازی مجدد سطح و همچنین قیمت پایین در مقایسه با جاذب‌های غیر آلی است (Karnib et al., 2014). اما مشکل اصلی در زمینه استفاده از کربن فعال پودری یا جاذب‌هایی با اندازه نانو و یا نانوذرات جداسازی آن‌ها از محلول به دلیل کوچک بودن اندازه ذرات دشوار است، بنابراین پراکندگی و تولید آلودگی ثانویه از مشکلات اساسی کربن فعال است. لذا مغناطیسی نمودن این جاذب‌ها می‌تواند راه کار مناسب در جهت رفع بسیاری از این مشکلات باشد. در این راستا استفاده از نانوذرات مغناطیسی برای تولید جاذب با سطح فعال بالا روش بسیار مؤثری است، زیرا نانوذرات به دلیل وجود آن‌ها ساختار متخلخل و سطح بالا می‌تواند کارایی فرآیند جذب را در حذف آلاینده‌ها بهبود ببخشند. همچنین مزیت استفاده از نانوذرات مغناطیسی به راحتی از محلول‌های آبی جدا می‌شود (Tian et al., 2021). نانوذرات مغناطیسی به دلیل سمیت کم و مقرون به صرفه بودن از نظر اقتصادی در فرآیند حذف آلاینده‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد (Soares et al., 2021). در مطالعه حاضر کامپوزیت AC/Fe_3O_4 سنتز و برای حذف آفت‌کش دلتامترین از محلول‌های آبی مورد استفاده قرار گرفت. در این میان دلتامترین به دلیل مصرف بسیار گسترده ۱۵ هزار کیلوگرم در کشاورزی موجب آلودگی گسترده پساب‌ها فاضلاب‌ها و محیط‌زیست و عامل بروز انواع بیماری‌ها و جهش ژنتیکی شده است (Lu et al., 2019).

در ادامه مطالعات قبلی درباره این آفت کش و کامپوزیت AC/Fe_3O_4 بررسی می‌شود. روش‌های مختلفی برای حذف آفت‌کش‌ها از جمله دلتامترین از منابع آبی مورد استفاده قرار گرفته است (Saleh et al., 2020b). میان روش‌های بیولوژیکی (Huang et al., 2018)، روش گیاه‌پالایی^۱، زیست‌پالایی^۲ و روش جلبک فعال برای حذف آفت‌کش‌ها از منابع آبی و در میان روش‌های فیزیکی و شیمیایی غالباً روش‌های جذب (Bajeer et al., 2022)، اکسیداسیون پیشرفته، واکنش‌های فنتون، تخریب فتوکاتالیستی و فیلتراسیون غشایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما روش جذب یک روش ارزان قیمت با کارایی بالا برای حذف آلاینده‌ها است. در میان پژوهش‌های صورت گرفته با استفاده از جذب سطحی مورد بررسی قرار گرفت. (P'yanova et al., 2019). در مطالعه‌ای جاذب‌های مختلف کربن پایه برای حذف آفت‌کش‌های دلتامترین و ایورمکتین را مورد مقایسه قرار دادند. جاذب‌های مورد بررسی عبارت بودند از کربن فعال و کربن فعال اصلاح شده با گلیکولیک و لاکتیک اسید. نتایج این مطالعه نشان داد که اصلاح کربن فعال با استفاده از این دو اسید موجب افزایش

امروزه استفاده از آفت‌کش مقاوم در برابر تجزیه و به دلیل ماندگاری بلندمدت در محلول‌های آبی به عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات محیط‌زیستی شناخته شده است (Raza et al., 2019). آفت‌کش‌ها اثرات مخربی بر انسان و محیط‌زیست دارند و به عنوان شایع‌ترین و خطرناک‌ترین آلودگی آب شناخته می‌شوند. آلودگی آب‌های سطحی توسط آفت‌کش‌های مختلف، موجب ایجاد خطراتی برای اکوسیستم و سلامتی انسان‌ها می‌شود. دلتامترین یکی از رایج‌ترین آفت‌کش‌های گروه پیرتروئیدها هستند. به دلیل داشتن گروه CN در ساختار دلتامترین به حشره‌کش مقاوم در برابر نور، رطوبت و هوا تبدیل شده‌اند (Cunha et al., 2018). کاربرد گسترده دلتامترین در بهداشت عمومی، پزشکی، دامپزشکی و به ویژه در کشاورزی آن را به یکی از پیرتروئیدهای پرکاربرد در سطح جهان تبدیل کرده است. این استفاده گسترده موجب نگرانی محیط‌زیستی است، زیرا ممکن است به طور جدی با توجه به سمیت شدید آن برای موجودات زنده به ویژه آبزیان از طریق منابع آبی آسیب برساند.

دلتامترین به طور گسترده‌ای برای کنترل و محافظت طیف وسیعی از محصولات، میوه‌ها، سبزیجات و آبزیان در برابر آفات و انگل‌ها استفاده می‌شوند. دلتامترین قدرت حشره‌کشی بالا و سمیت کمی برای پرندگان و پستانداران دارند (Lu et al., 2019). مطالعاتی که بر روی دلتامترین در دوزهای مختلف بر روی پستانداران انجام گرفته، در درازمدت باعث اختلال در کبد و مشکلات قلبی و کلیوی شده است (Ding et al., 2017). روش‌های زیادی به منظور جذب سموم از محیط‌های آبی وجود دارد که از این جمله می‌توان به روش‌های انعقاد، اکسیداسیون شیمیایی، فرآیند جداسازی با غشاء، رزین‌های تعویض یونی، روش‌های الکتروشیمیایی، روش‌های میکروبی هوازی و بی‌هوازی، تخریب و جذب سطحی اشاره کرد. به طور کلی این روش‌ها می‌توانند به سه دسته کلی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی تقسیم شوند. از میان این روش‌ها، جذب سطحی به دلیل سادگی و به صرفه بودن، سرعت بالا و استفاده از مواد زیست‌سازگار مورد استفاده قرار گرفت (Mojiri et al., 2020).

در میان جاذب‌های مورد استفاده در این فرآیند، کربن فعال با توجه به کارایی و کاربرد آسان، همچنین به دلیل ظرفیت جذب بالا و عملکرد آن‌ها یکی از پرمصرف‌ترین جاذب‌ها در فرآیند جذب آلاینده‌ها است. کربن فعال به گروهی از مواد کربنی متخلخل و دارای سطح داخلی بالا گفته می‌شود که به دلیل مساحت داخلی

ناخالصی‌های باقی‌مانده بر سطح آن جدا شدند. سپس به مدت ۲ ساعت درون آن با دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت، تا خشک شده و سپس کاملاً پودر شدند. برای فعال‌سازی پودر حاصل در محلول سدیم هیدروکسید قرار داده شد. سپس کربن فعال حاصل از محلول جدا شده و در کوره با دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت قرار گرفت. پس از زمان مذکور پودر حاصل در دمای محیط قرار گرفت تا کاملاً سرد شود و چندین مرحله با آب مقطر شسته شد تا pH آن به ۷-۶ برسد و خنثی شود. در مرحله بعد ابتدا ۰/۵ گرم کربن فعال تولید شده در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه به مدت ۱۵ دقیقه تحت امواج اولتراسونیک پخش شد. سپس ۲/۷ گرم $FeCl_3$ و ۰/۹۹ گرم $FeCl_2$ به نسبت مولی ۲ به ۱ تحت هم‌زدن شدید به مخلوط بالایی اضافه شد. سپس با NaOH به عنوان اکسید کننده به صورت قطره قطره به محلول فوق اضافه شد تا pH به ۱۱ برسد. بعد از ۶۰ دقیقه رسوب حاصل با استفاده از یک آهن‌ربای خارجی جمع‌آوری شده و چندین مرحله با آب دیونیزه و سرانجام، نانوکامپوزیت به دست آمده را در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد.

۲-۳- بررسی جاذب

برای بررسی خواص و ویژگی‌های سطحی عامل به دام اندازنده از آنالیزهای مختلفی استفاده شده است. در مطالعه حاضر آنالیز FT-IR (Broker victor 22) برای تعیین گروه‌های عاملی و برهم‌کنش بین آن‌ها با سم دلتامترین مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز SEM با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM- TESCAN MIRA3- FEG) برای بررسی سطح و تغییرات سطحی کامپوزیت مورد نظر استفاده شد. برای بررسی ساختار نانوذرات Fe_3O_4 ، از آنالیز XRD (Philips PW 1730) استفاده شد. برای بررسی و تعیین خواص مغناطیسی نانوذرات Fe_3O_4 و کامپوزیت مورد نظر از روش مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی (VSM) استفاده شد.

۲-۴- مطالعه پارامترهای مؤثر جذب دلتامترین

برای مطالعه فرآیند جذب سم دلتامترین به وسیله کامپوزیت AC/Fe_3O_4 تأثیر پارامترهای pH (۳ تا ۱۱)، زمان (۵ تا ۲۵ دقیقه)، غلظت اولیه سم (۲۰ تا ۸۰ میلی‌گرم در لیتر) و مقدار کامپوزیت (۰/۵ تا ۱/۵ گرم در لیتر) بر بازدهی جذب مورد بررسی قرار گرفت. در هر مرحله پس از فرآیند جذب سم دلتامترین، فاز جامد (کامپوزیت) با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی از

تخلخل سطح جاذب شده و توانایی جذب آن‌ها برای هر دو آفت‌کش مورد بررسی را افزایش داد.

(Xie et al., 2019) با استفاده از پلیمر قالب‌مولکولی بر پایه آکریل امید حذف آفت‌کش دلتامترین از محلول‌های آبی را مطالعه کردند. آنالیزهای SEM، FT-IR و BET به منظور بررسی ساختار و گروه‌های عاملی پلیمر مذکور مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان داد که ایزوترم فرآیند جذب از مدل فرندلیچ پیروی می‌کند، بنابراین فرآیند جذب به صورت چند لایه و ناهمگن است. مدل‌های سینتیکی برای بررسی سینتیک فرآیند جذب مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد مدل سینتیکی شبه درجه دوم توانایی بالاتری برای برازش داده‌های تجربی دارد. کربن فعال تهیه شده از پوست گردو به عنوان ضایعات کشاورزی از طریق فعال‌سازی شیمیایی با هیدروکسید پتاسیم (KOH) به دلیل داشتن گروه‌های اکسیژن مانند کربونیل، استرها، الکل‌ها و گروه‌های فنل در حذف آفت‌کش‌ها و به صورت کلی آلاینده‌ها بسیار مؤثر هستند (Oba and Pasaoglu, 2022). با این حال یکی از مهم‌ترین مشکلات در استفاده از کربن فعال به عنوان جاذب، حذف و جداسازی آن پس از فرآیند جزئی از محلول است که نیازمند روش‌های هزینه‌بر و زمان‌بری مانند فیلتراسیون و سانتریفیوژ است. در این روش در پژوهش‌های بسیاری از کربن فعال مغناطیسی برای حذف آلاینده‌ها استفاده شده است (D'Cruz et al., 2020).

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و محلول‌ها

برای سنتز نانوکامپوزیت AC/Fe_3O_4 ، از روش رسوبدهی شیمیایی استفاده شد و $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ ، $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ و سدیم هیدروکسید از شرکت مرک آلمان خریداری شد. سم دلتامترین از شرکت سادات مهان شهر تبریز خریداری شد و همه این مواد شیمیایی همان‌طور که خریداری شده بودند بدون خالص‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور تهیه محلول‌های آبی حاوی سم دلتامترین، محلول مادر با آب مقطر رقیق شد و برای تنظیم pH محلول‌های مورد نظر از محلول‌های سدیم هیدروکسید و اسیدکلریدریک با غلظت ۱ مولار استفاده شد. قابل ذکر است که در مطالعه حاضر، برای تهیه محلول‌ها در تمامی مراحل از آب مقطر استفاده شد.

۲-۲- سنتز جاذب

پوست‌های گردو دو مرحله با آب مقطر شسته شده و

دقت مناسب^۶ (AP) محاسبه شده توسط نرم‌افزار، مورد بررسی قرار گرفتند.

جدول ۱- متغیرهای مستقل و سطوح کدگذاری آن‌ها برای طراحی آزمایش

سطوح متغیرها			واحد	کدها	متغیرهای مستقل
۰	۱	۲			
۱۱	۷	۳	-----	X ₁	pH
۸۰	۵۰	۲۰	mg/L	X ₂	غلظت دلتامترین
۶۰	۴۵	۳۰	min	X ₃	زمان تماس
۱/۵	۱	۰/۰۵	g/L	X ₄	دوز جاذب

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خواص و ویژگی عامل به جذب دلتامترین

آنالیز FT-IR برای بررسی و تعیین گروه‌های عاملی موجود در ساختار هر سه نمودار AC/Fe₃O₄، AC و Fe₃O₄ نتایج حاصل از آن در ۱- الف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمودار اول و دوم یک حداکثر جذبی در نواحی ۳۶۷۶ cm⁻¹ مشاهده می‌شود که به ترتیب ناشی از پیوندهای H-O آزاد موجود در ساختار آن است. همچنین پیک‌های جذبی دیگری در نواحی ۱۵۲۳ cm⁻¹ و ۱۶۴۷ cm⁻¹ مشاهده می‌شود که ناشی از پیوندهای C=C آلکن و آروماتیک موجود در ساختار کربن فعال هستند (Shafiee et al., 2019). به‌علاوه یک حداکثر جذبی نیز در ناحیه ۱۷۴۳ cm⁻¹ مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده پیوند CO موجود در ساختار کربن فعال حاصل از پوست گردو است (Shafiee et al., 2019). پس از قرارگیری آهن اکسید در ساختار کربن فعال و تشکیل کامپوزیت AC/Fe₃O₄ علاوه بر حداکثرهای جذبی موجود در ساختار AC که با اندکی شیفت و تغییر در طیف آن مشاهده می‌شود، حداکثر ۹۶۷۵ cm⁻¹ مربوط به گروه OH آزاد و حداکثر ۹۰۲۹ cm⁻¹ مربوط به حداکثرهای C=C آلکن موجود در ساختار کربن فعال، همچنین حدکثر ظاهر شده در ناحیه ۵۶۹ cm⁻¹ مربوط به Fe-O مربوط به ساختار Fe₃O₄ هستند. همچنین حداکثر ظاهر شده ۹۴۵۵ cm⁻¹ مربوط به پیوندهای OH موجود است. برای بررسی و تعیین خواص مغناطیسی نانوذرات Fe₃O₄ و کامپوزیت مغناطیسی موردنظر از آنالیز مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی (VSM) استفاده شد (۱-ب). نتایج نشان می‌دهد که بازماندگی^۷ و وادارندگی^۸ نمونه‌ها صفر است، زیرا نمودارها کاملاً متقارن بوده و دقیقاً از مبداء مختصات عبور کرده‌اند. این نتایج حاکی از آن است که نانوذرات و کامپوزیت

محلول جدا شد و مقدار سم باقی‌مانده در محلول با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتری UV-1700 در طول موج ۲۶۴ نانومتر اندازه‌گیری شد. براساس نتایج به‌دست آمده، بازدهی و ظرفیت جذب سم توسط کامپوزیت مورد نظر به ترتیب با استفاده از معادله‌های (۱) و (۲) محاسبه شد.

$$R(\%) = \left(\frac{C_i - C_e}{C_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$q_e = (C_i - C_e) \times \frac{V}{m} \quad (2)$$

که R: درصد جذب، q_e: ظرفیت جذب برحسب میلی‌گرم بر گرم، C_i و C_e: به ترتیب غلظت اولیه و تعادلی برحسب گرم در لیتر، V: حجم محلول برحسب لیتر و m: مقدار جاذب استفاده شده برحسب گرم هستند.

۲-۵- طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش پاسخ سطح (RSM)

برای بررسی نحوه تأثیر فاکتورهای مورد بررسی بر بازدهی جذب سم دلتامترین به‌وسیله کامپوزیت کربن فعال/ Fe₃O₄ از روش پاسخ سطح و روش باکس-بنکن (BBD) استفاده شد. در این روش اثرات پارامترها به صورت تکی و اثرات متقابل آن‌ها بر میزان بازدهی بررسی شد (Sidik et al., 2016). برای انجام این بررسی از نرم‌افزار Design Expert 11 استفاده شد که تعداد آزمایش‌ها برای پارامترهای pH، زمان، غلظت اولیه سم و دوز جاذب (سه تکرار در نقطه مرکزی) برابر با ۲۷ آزمایش است. متغیرهای مستقل بررسی شده هر کدام در سه سطح (1, 0, -1) مطالعه شده و سطوح آن‌ها بر این اساس در جدول ۱ آورده شده است.

بر این اساس نرم‌افزار Design Expert مدلی که شامل عبارات پیش‌بینی متغیرها بوده و رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته را نشان می‌دهد پیشنهاد داد. سپس با استفاده از آنالیز واریانس و مقدار P-value معنی‌داری و غیرمعنی‌داری تأثیر متغیرهای مستقل مشخص و جملات غیرمعنی‌دار از مدل حذف شده و مدل اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفت. سپس نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل با نتایج تجربی مقایسه و ضریب همبستگی (R²) برای آن‌ها به‌دست آمد. همچنین سایر آماره‌های قابل استفاده برای ارزیابی کیفیت و کارایی مدل مانند انحراف معیار (SD)، ضریب تغییرات (CV%)، تابع مطلوبیت^۵ (DF) و

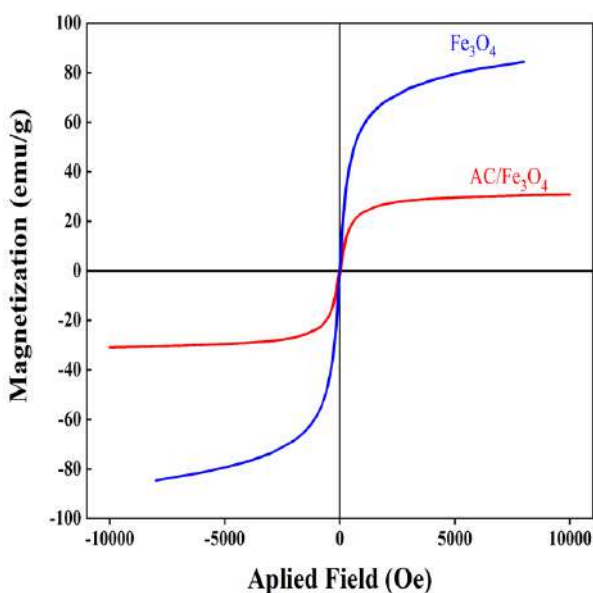
به‌علت وجود کربن فعال در این ساختار باشد (Bagheri et al., 2017). به‌علاوه در ساختار کامپوزیت مغناطیسی AC/Fe_3O_4 حداکثرهای دیگری در محدوده 2θ برابر با $30/40^\circ$ ، $35/85^\circ$ ، $43/50^\circ$ ، $53/95^\circ$ ، $57/45^\circ$ و $63/25^\circ$ وجود دارند که به‌ترتیب به فازهای کریستالی (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۴۰۰)، (۴۲۲)، (۵۱۱) و (۴۴۰) موجود در نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 نسبت داده می‌شوند و حاکی از آن است، که نانوذرات Fe_3O_4 تشکیل شده در کربن فعال از نوع اسپنل مکعبی معکوس هستند (Asfaram et al., 2017). علاوه‌بر این با استفاده از رابطه دمای شرر (معادله (۳)) و محیط نرم‌افزار HighScore Plus اندازه کریستال‌ها برای کامپوزیت AC/Fe_3O_4 به‌ترتیب برابر با ۱۷ نانومتر محاسبه شد.

$$L = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3)$$

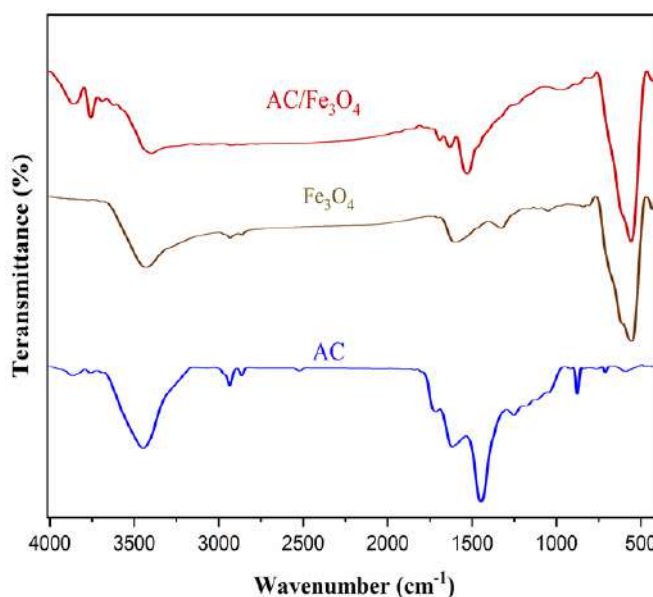
که θ (°): زاویه پراش، λ (Å): طول موج منبع آندی استفاده شده (در مطالعه حاضر آند مس و طول موج آن برابر با ۱/۵۴ انگستروم)، β : پهناهای واقعی حدکثر شاخص (پهناهای حدکثر در نصف ارتفاع)، k : ثابت شرر که مقدار آن بین ۰/۸۷ تا ۱ متغیر بوده اما معمولاً ۰/۹ لحاظ می‌شود و L : اندازه کریستال‌ها است که این پارامتر نیز برحسب انگستروم محاسبه و سپس به نانومتر تبدیل شد.

موردبررسی سوپر پارامغناطیس هستند. بنابراین جداسازی مغناطیسی و قابلیت استفاده مجدد آن‌ها امکان‌پذیر است (Sun et al., 2018). علاوه‌بر این نتایج نشان داد که نانوذرات Fe_3O_4 (۸۴/۳۶ emu/g) در مقایسه با کامپوزیت AC/Fe_3O_4 (۳۰/۹۳ emu/g) دارای مقدار اشباع مغناطیسی بیشتری است. کاهش در مقدار اشباع مغناطیس کامپوزیت مذکور می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند پوشش‌دهی بالای Fe_3O_4 با ماتریس غیرمغناطیسی (کربن فعال) باشد (Foroutan et al., 2018).

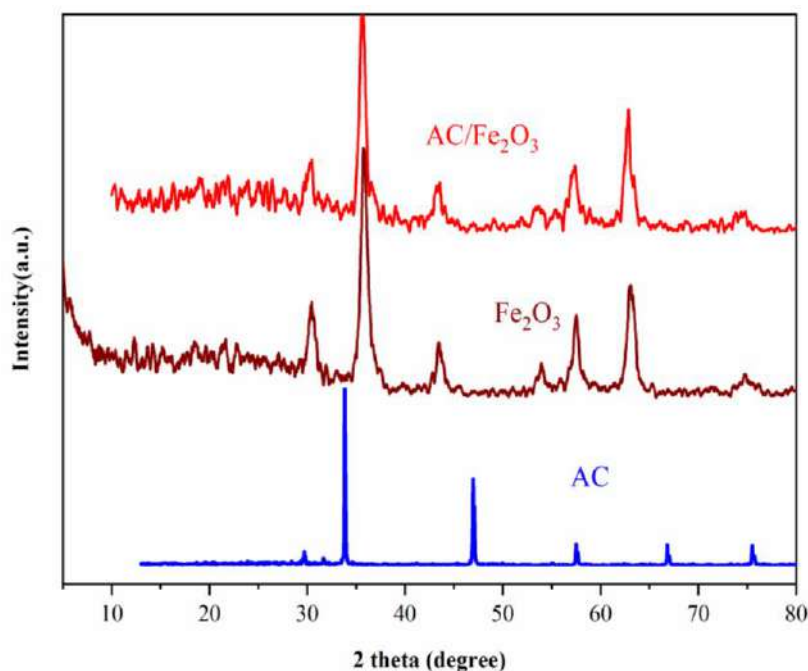
آنالیز XRD برای بررسی AC ، Fe_3O_4 و AC/Fe_3O_4 در محدوده ۵ تا ۸۰ درجه انجام شد و نتایج حاصل از آن در ۱-ج نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداکثرهایی با شدت‌های مختلف در ساختار کامپوزیت ظاهر شده که نشان دهنده فازهای کریستالی و نیمه کریستالی در ساختار کامپوزیت مذکور است و براساس آن می‌توان نتیجه گرفت که ساختار آن به‌صورت کریستالی است. در الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به AC/Fe_3O_4 در زاویه پراش 2θ برابر با $20/30^\circ$ و $43/60^\circ$ حداکثرهایی مشاهده می‌شود که به‌ترتیب می‌تواند نشان‌دهنده فازهای کریستالی (۰۰۲) و (۰۰۱) مربوط به ساختار گرافیت موجود در کربن فعال باشد که در مطالعات سایر محققان نیز تأیید شده است (Saleh et al., 2015). همچنین در این ساختار حداکثرهای دیگری در محدوده 2θ برابر با $29/65^\circ$ (۲۲۰)، $40/15^\circ$ (۲۲۲) و $64/90^\circ$ (۴۴۰) مشاهده می‌شود که می‌توانند



(ب)



(الف)

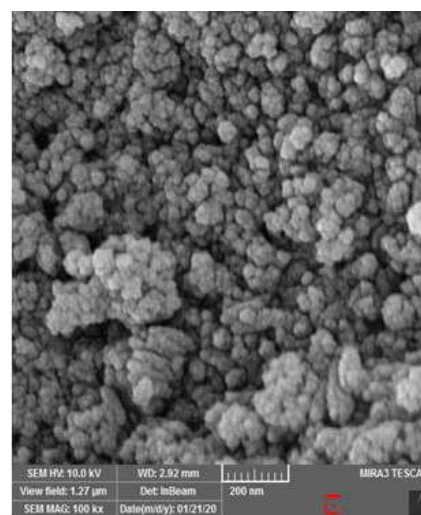
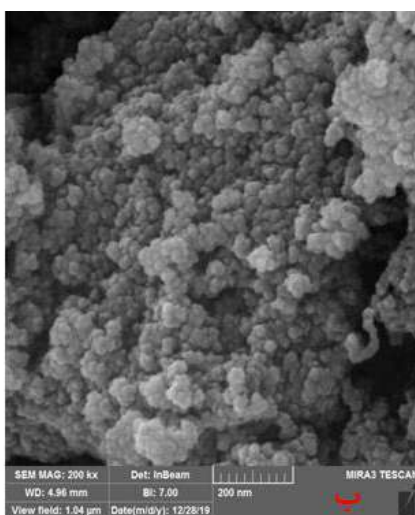
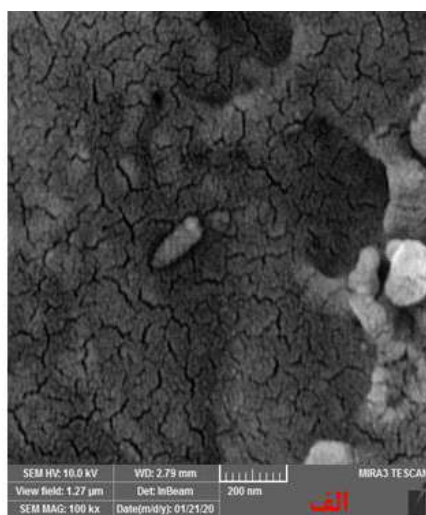


(ج)

شکل ۱- نتایج آنالیز: الف) FT-IR؛ ب) VSM؛ و ج) XRD نانوکامپوزیت AC/Fe_3O_4

مؤثری داشته باشد. در قسمت (ب) مورفولوژی نانوذرات Fe_3O_4 به صورت کروی است نشان می‌دهد. در قسمت (ج) پس از قرار گرفتن نانوذرات Fe_3O_4 بر سطح کربن فعال، ذراتی کروی روی سطح مشاهده می‌شود. این ذرات می‌توانند ناشی از تشکیل نانوذرات Fe_3O_4 بر سطح کربن فعال باشد که موجب ایجاد تغییرات سطحی و ناهمواری سطح شده است.

مورفولوژی و ویژگی‌های سطحی کربن فعال حاصل از پوست گردو و کامپوزیت AC/Fe_3O_4 با استفاده از آنالیز SEM مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در قسمت (الف) کربن فعال تولیدی از پوست گردو دارای سطحی کاملاً متخلخل و ناهمگن است که این امر می‌تواند در فرآیندهای جذب سطحی نقش



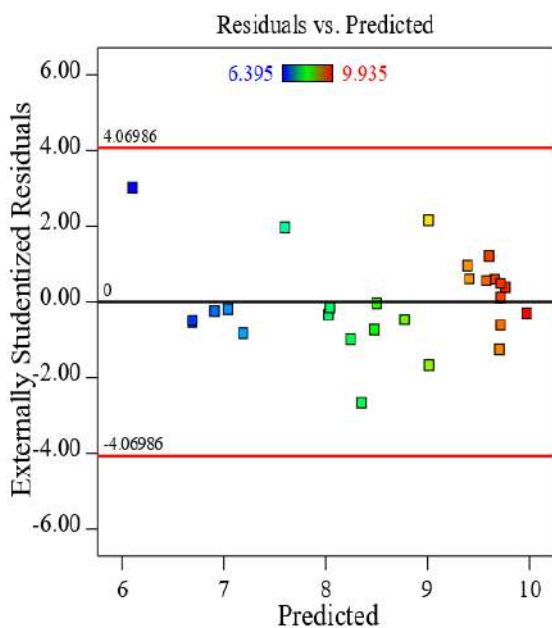
شکل ۲- نتایج آنالیز SEM: الف) کربن فعال؛ ب) نانوذرات Fe_3O_4 ؛ و ج) نانوکامپوزیت AC/Fe_3O_4

تحلیل شد. در اولین گام فرض نرمال بودن داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور نمودارهای توزیع نرمال، مقادیر استیودنتیده خارجی در مقابل مقدار پیش‌بینی شده، نمودار مقدار

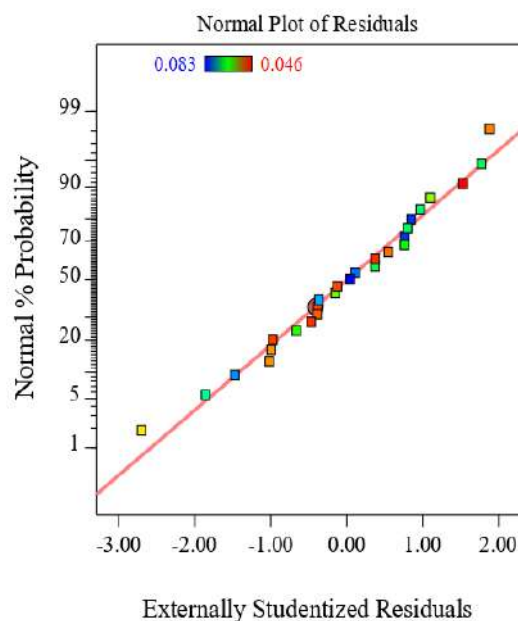
۲-۳- نتایج طرح سطح پاسخ و باکس-بنکن (RSM-BBD) براساس روش پاسخ سطح و طرح باکس-بنکن آزمایشات طراحی و انجام شدند. سپس نتایج حاصل توسط همان نرم‌افزار

تجربی و مدل در محدوده ± 4 است که این مقدار کم نشان‌دهنده توانایی بالای مدل در بیان داده‌ها است. هم‌چنین از نمودار باکس-کاکس (شکل ۳-د) مشاهده می‌شود که بهترین مقدار لاندا برابر با -0.67 در محدوده اطمینان 95% برابر با 0.19 تا -1.38 قرار دارد و مقدار فعلی آن -0.67 است که در محدوده اطمینان قرار می‌گیرد. بنابراین تابع حاصل، نیاز به انتقال ندارد.

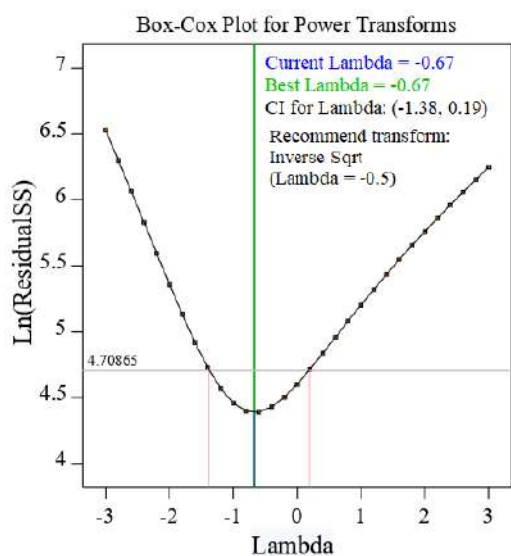
باقی‌مانده در مقابل تعداد آزمایش‌ها و باکس-کاکس استخراج شد (شکل ۳). براساس نمودار توزیع نرمال (شکل ۳-الف) پراکنده بودن اطراف خط و نداشتن الگوی "S" (شکل) و نمودار باقی‌مانده استیودنتیده (شکل ۳-ب) به دلیل نداشتن الگوی "<" داده‌ها نرمال هستند (Shi et al., 2019). به‌علاوه از نمودار شکل ۳-ج که مقادیر باقی‌مانده در برابر شماره آزمایش‌ها را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که مقدار بیشینه خطا بین داده‌های



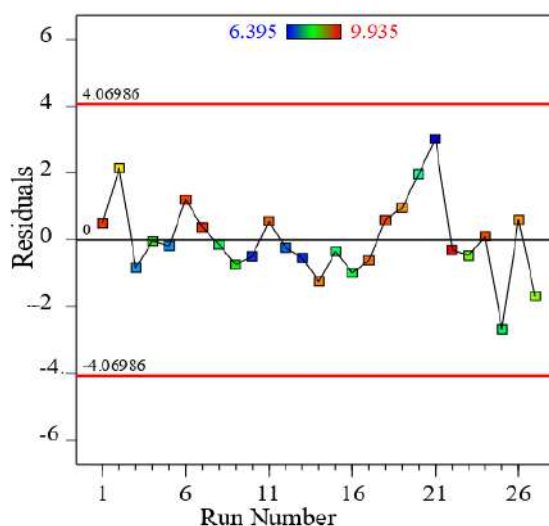
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳- بررسی نرمال بودن داده‌ها: (الف) نمودار توزیع نرمال؛ (ب) نمودار مقدار استیودنتیده خارجی در مقابل مقدار پیش‌بینی شده؛ (ج) نمودار مقدار باقی‌مانده در برابر شماره آزمایش‌ها؛ و (د) نمودار باکس-کاکس

$$\begin{aligned} \%R = & 0.16 + 0.019X_1 \\ & - 8 \\ & \times 10^{-4}X_2 \\ & + 2.7 \\ & \times 10^{-4}X_3 \\ & - 0.04X_4 \\ & + 5.2 \times 10^{-4}X_1X_4 \\ & - 3.43 \times 10^{-7}X_2X_3 \\ & + 2 \times 10^{-4}X_2X_4 \\ & - 1.6 \times 10^{-4}X_3X_4 \\ & + 12 \times 10^{-4}X_1^2 \\ & + 5.94 \times 10^{-6}X_2^2 \\ & + 0.013X_3^2 - 7.54X_4^2 \end{aligned} \quad (4)$$

نتایج حاصل از آنالیز واریانس برای جذب سم دلتامترین توسط کامپوزیت مغناطیسی AC/Fe_3O_4 پس از حذف جملات غیر معنی‌دار مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار درجات آزادی مدل برابر با ۱۴ است که مقدار F-test به‌دست آمده برای آن بیان‌گر معنی‌دار بودن مدل است. هم‌چنین مقدار p-value آن (< 0.0001) نشان‌دهنده معنی‌دار بودن مدل در سطح ۹۹٪ است. مقدار lack-of-fit غیرمعنی‌دار است که نشان می‌دهد مدل به‌دست آمده توانایی پیش‌بینی بازدهی فرآیند را دارد. به‌علاوه همان‌طور که مشاهده می‌شود تأثیر هرکدام از متغیرهای مستقل بر بازدهی جذب در سطح ۹۹٪ معنی‌دار و نحوه تأثیر آن‌ها در ادامه بحث شده‌اند.

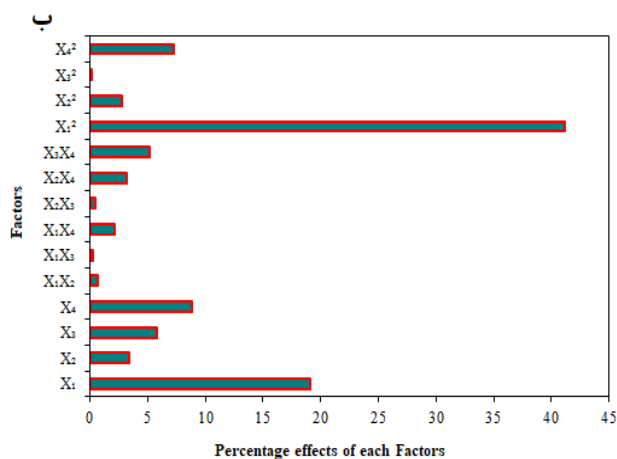
نتایج مدل‌سازی نشان‌داد که مدل پیش‌بینی مقدار بازدهی براساس پارامترهای مورد بررسی یک معادله درجه دو است سپس مدل اصلاح شد به‌گونه‌ای که جملات غیرمعنی‌دار از آن حذف شدند (معادله (۴)). در این رابطه X_1, X_2, X_3 و X_4 به‌ترتیب معادل pH، غلظت اولیه سم دلتامترین، زمان تماس و مقدار کامپوزیت واکنش هستند و ضریب تبیین آن برابر با ۰/۹۸۶۴ است. مقدار انحراف معیار، میانگین و ضریب تغییرات به‌ترتیب ۰/۹۶۴۵، ۰/۵۸۲ و ۰/۳۰۸٪ محاسبه شد که نشان‌دهنده پراکندگی کم داده‌ها و نزدیک بودن مقادیر آن‌ها به مقدار متوسط است. هم‌چنین از آن‌جایی که مقدار ضریب تغییرات کمتر از ۱۰٪ بوده مدل به‌دست آمده، reproducibility است. به‌علاوه ضریب تبیین مربوط به پیش‌بینی مدل ۰/۹۹۳۷ به‌دست آمد که نشان می‌دهد مدل توانایی بالایی در پیش‌بینی داده‌ها دارد و داده‌های حاصل از آزمایش‌ها با داده‌های تخمین‌زده شده توسط مدل بسیار نزدیک به‌هم هستند. مقدار آماره AP برابر با ۳۸/۳۸ محاسبه شد که این آماره نشان‌دهنده نرخ سیگنال نویز است، و اگر مقدار آن بیشتر از ۴ باشد نشان‌دهنده، مناسب بودن مدل است (Saini et al., 2019).

جدول ۲- آنالیز تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) مدل اصلاح شده برای جذب سم دلتامترین

Source	Df ^a	SS ^b	MS ^c	F-value	P-value	
Model	14	3×10^{-4}	3×10^{-4}	135.45	< 0.0001	
X_1	1	0.001	0.001	502.07	< 0.0001	
X_2	1	0.000	0.000	16.45	0.0016	
X_3	1	1×10^{-4}	1×10^{-4}	46.17	< 0.0001	
X_4	1	2×10^{-4}	2×10^{-4}	105.16	< 0.0001	
X_1X_2	1	2.69×10^{-7}	3.11	0.141	0.7140	
X_1X_3	1	2.07×10^{-8}	58.67	0.011	0.9187	
X_1X_4	1	4.35×10^{-6}	25.68	2.28	0.1568	
X_2X_3	1	9.513×10^{-8}	9.513×10^{-8}	0.05	0.827	
X_2X_4	1	9.23×10^{-6}	9.23×10^{-6}	4.84	0.0482	
X_3X_4	1	0.000	0.000	12.27	0.0044	
X_1^2	1	0.002	0.002	1035.71	< 0.0001	
X_2^2	1	9.534×10^{-6}	9.534×10^{-6}	5.00	0.0451	
X_3^2	1	2.493×10^{-9}	2.493×10^{-9}	0.013	0.9718	
X_4^2	1	0.0001	0.0001	32.05	0.0001	
Residual	12	0.000	1.908×10^{-6}	-	-	
Lack of Fit	10	0.000	2.214×10^{-6}	5.94	0.1526	
Pure Error	2	7.46×10^{-7}	3.729×10^{-7}	-	-	
Cor Total	26	3.6×10^{-3}	-	-	-	
Model Summary Statistics						
Response	Std. Dev.(SD)	Coefficient of Variance (C.V. %)	R ²	Adj-R ²	Pred-R ²	AP ^d
R%	0.0014	2.37	0.9937	0.9986	0.9645	38.381

افزایش تعداد سایت‌های فعال موجود در فرآیند دانست، که موجب افزایش بازدهی جذب می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان تماس بازدهی فرآیند جذب مولکول‌های سم دلتامترین توسط کامپوزیت AC/Fe_3O_4 افزایش یافته که دلیل آن را می‌توان داشتن زمان کافی برای قرارگیری مولکول‌های سم بر سطح کامپوزیت AC/Fe_3O_4 دانست (Jiang et al., 2019).

بررسی pH نشان می‌دهد که در محیط‌های خنثی کامپوزیت مدنظر توانایی جذب سم دلتامترین بالاتری نسبت به محیط‌های اسیدی و قلیایی دارد. با این‌که نمودار پخشیدگی توانایی بیان اطلاعات بالایی دارد اما در آن‌ها حساسیت پاسخ فقط به متغیرهای مستقل مشاهده می‌شود و این‌که تأثیرات متقابل تا چه حد تأثیرگذار هستند مشخص نیست. از این‌رو نمودار پارتو^۴ که در آن می‌توان این تأثیرات را هم مشاهده کرد، رسم شد (شکل ۴-ب). در نمودار پارتو محور افقی درصد تأثیر هر پارامتر را نشان می‌دهد. بیشترین درصد تأثیر مربوط به دوام pH است.

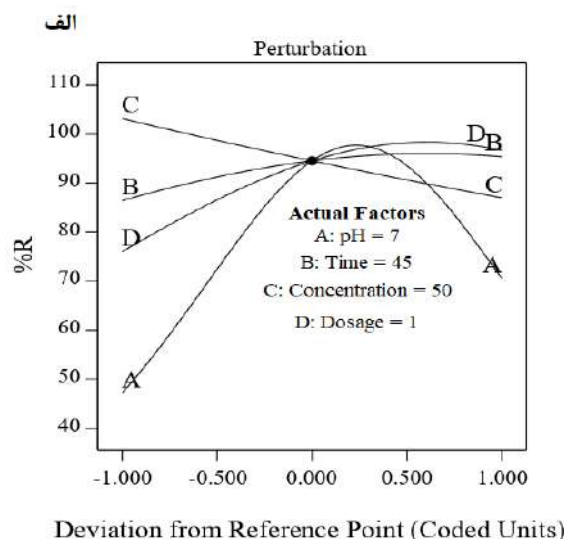


(ب)

شکل ۴-الف) نمودار پخشیدگی همه متغیرها در نقطه مرکزی؛ ب) نمودار پارتو درصد تأثیر تمامی جملات معنی‌دار موجود در مدل

نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود سطح مربوط به تأثیر هم‌زمان این دو متغیر دارای یک قله (بیشینه بازدهی) در محیط‌های خنثی است. شکل ۵-ب نمودار تأثیر متغیرهای pH و غلظت اولیه سم دلتامترین بر بازدهی جذب آن را نشان می‌دهد. بیشترین میزان بازدهی در محیط خنثی و غلظت‌های پایین است. شکل ۵-ج تأثیر متغیرهای pH و مقدار دوز جذب را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در محیط‌های اسیدی میزان جذب پایین بود و رفته رفته با افزایش pH تا محیط خنثی

معادله (۴) ضرایب مربوط به متغیرها را نشان می‌دهد که براساس این ضرایب تأثیر مثبت و منفی افزایش توان اول و دوم آن متغیرها بر بازدهی جذب مشخص می‌شود. برای بررسی شدت تأثیرگذاری هر متغیر و نحوه آن این معادله توانایی بیان اطلاعات کافی را ندارد. از این‌رو، نمودار پخشیدگی تأثیر متغیرهای مستقل مورد بررسی قرارگرفت (شکل ۴-الف). نمودار پخشیدگی نشان‌دهنده تأثیر همه متغیرها در نقطه مرکزی است، که در آن تأثیر متغیرهای pH، دوز جذب و زمان تماس به صورت منحنی است (Montgomery, 2017). همان‌طور که مشاهده می‌شود تأثیر افزایش متغیر غلظت اولیه سم بر بازدهی جذب سم کاهش یافته است، که این می‌تواند به دلیل افزایش غلظت اولیه سم بر روی سطح جذب و در نتیجه آن اشباع شدن سایت‌های فعال در سطح جذب باشد، که این امر موجب کاهش بازدهی جذب سم در غلظت بالا می‌شود. افزایش مقدار کامپوزیت نیز سبب افزایش بازدهی فرآیند جذب دلتامترین شده است. دلیل آن را می‌توان

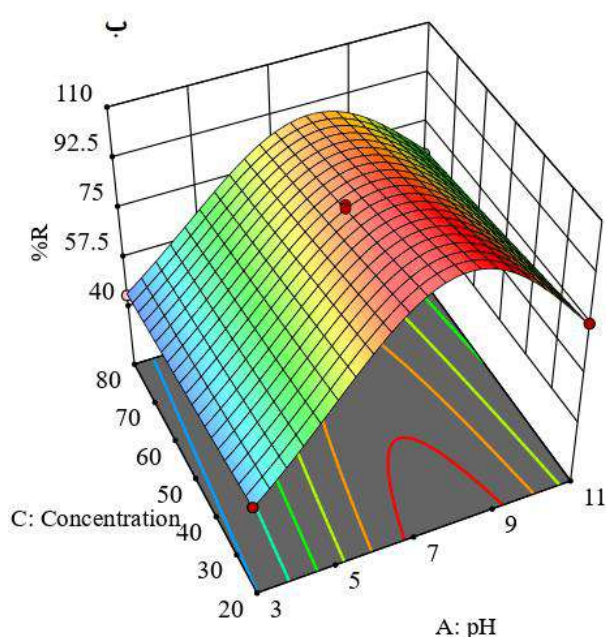


(الف)

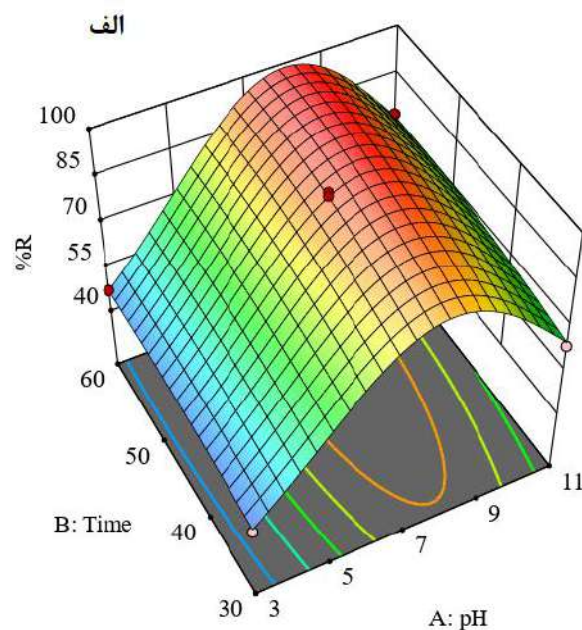
همان‌طور که از معادله (۴)، شکل ۴ و جدول ۲ مشاهده می‌شود تأثیر متقابل متغیرها معنی‌دار است. در این حالت برای بررسی آن‌ها از فضای سه‌بعدی برای بررسی تأثیر هم‌زمان دو متغیر در شرایطی که سایر متغیرها دارای مقداری مشخص و ثابت هستند استفاده می‌شود (Bezerra et al., 2008). از این‌رو برای بررسی تأثیر متغیرها نمودارهای سه‌بعدی که سطوح پاسخ در آن‌ها مشاهده می‌شود، مورد بررسی قرارگرفت (شکل ۵). شکل ۵-الف تأثیر متغیرهای pH و زمان تماس بر بازدهی جذب آن را

مولکول‌های سم فرصت لازم برای قرارگیری روی سایت‌های فعال را به دست می‌آورند و باعث افزایش میزان بازدهی می‌شوند هم‌چنین افزایش دوز جاذب شیب مثبت داشته است. شکل ۵-ش تأثیر متغیرهای مقدار کامپوزیت و غلظت اولیه سم دلتامترین را نشان می‌دهد. بیشترین میزان جذب در غلظت‌های پایین و در دوز جاذب بالا به دلیل افزایش سایت‌های فعال جاذب صورت می‌گیرد.

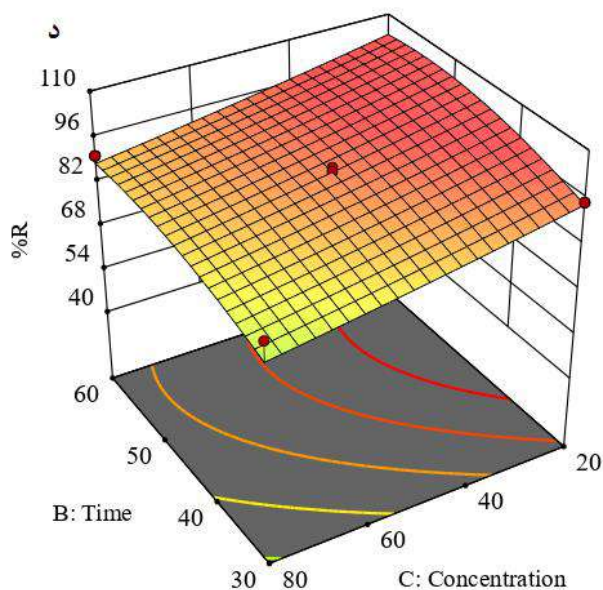
و افزایش دوز جاذب میزان بازدهی افزایش یافته است. شکل ۵-د تأثیر متقابل متغیرهای زمان تماس و غلظت اولیه آفت‌کش دلتامترین را نشان می‌دهد. با افزایش زمان تماس در تمامی غلظت‌های بررسی شده بازدهی افزایش یافته است. هم‌چنین در تمامی زمان‌های بررسی شده با افزایش غلظت اولیه سم بازدهی کاهش یافته است. در شکل ۵-س تأثیر متقابل متغیرهای زمان تماس و دوز جاذب قابل مشاهده است. با افزایش زمان



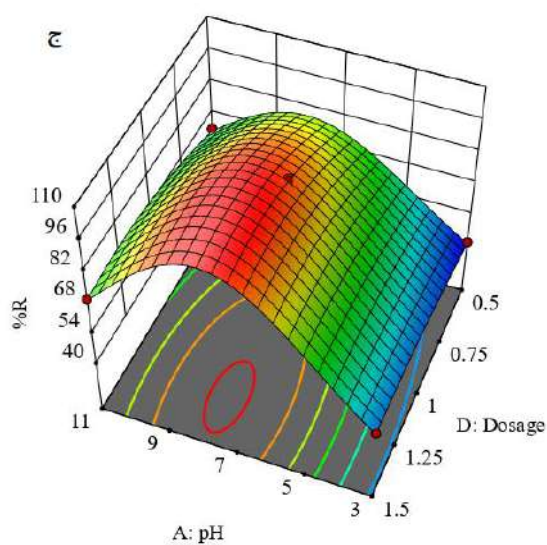
(ب)



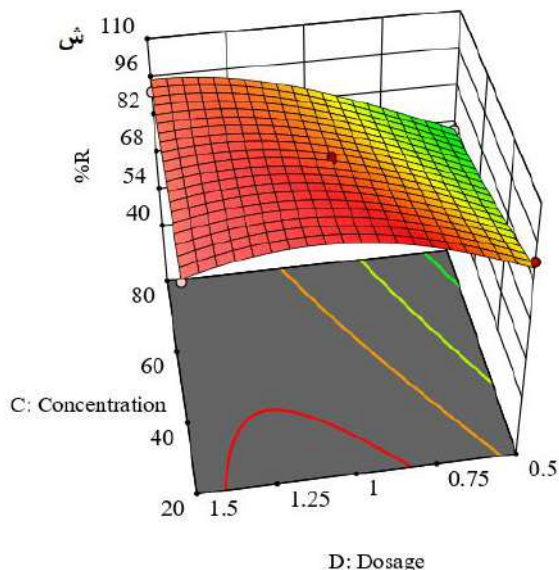
(الف)



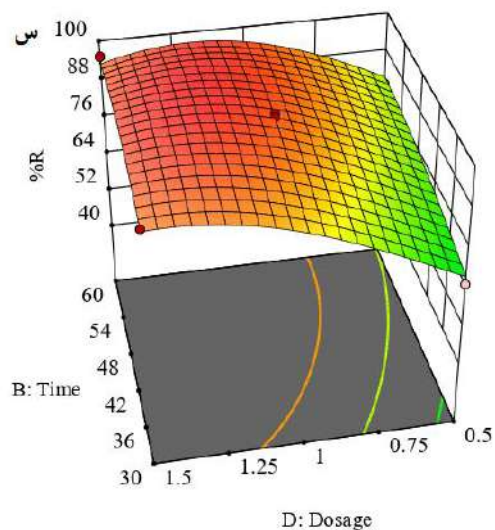
(د)



(ج)



(ش)

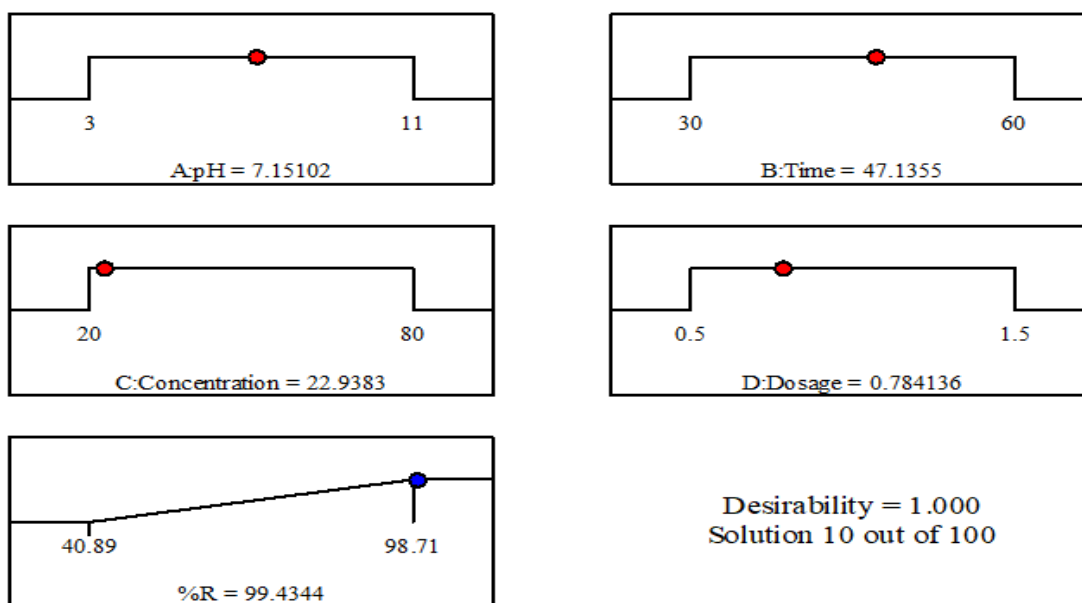


(س)

شکل ۵- نمودارهای مربوط به اثرات متقابل الف) pH و زمان تماس؛ ب) pH و غلظت اولیه سم دلتامترین؛ ج) pH و مقدار کامپوزیت؛ د) زمان تماس و غلظت اولیه سم دلتامترین؛ س) زمان تماس و مقدار کامپوزیت؛ و ش) غلظت اولیه سم دلتامترین و مقدار کامپوزیت

(شکل ۶). مشاهده می‌شود بیشترین مقدار بازدهی جذب سم دلتامترین به‌وسیله کامپوزیت AC/Fe_3O_4 برابر با 99.43% و در شرایط غلظت اولیه سم دلتامترین 22.93 mg/L ، زمان تماس برابر با 47.13 دقیقه، مقدار کامپوزیت 0.78 g/L و pH برابر با 7.15 است. این تفاوت کم نشان می‌دهد که طرح باکس بنکین به‌طور مؤثری می‌تواند شرایط فرآیند به جذب سم دلتامترین توسط کامپوزیت AC/Fe_3O_4 را بررسی و شرایط بهینه را مشخص کند.

در نمودارهای سه‌بعدی شرایط بهینه مربوط به متغیرهای مستقل به‌صورت دو به دو نشان داده شد اما برای تعیین شرایط بهینه کلی، این نمودارها کفایت لازم را ندارند. از این‌رو برای پیدا کردن شرایطی که در آن بازدهی بیشینه مقدار خود باشد و همچنین همه متغیرها به‌صورت مطلوب باشند، بهینه‌سازی پارامترها انجام شد. نمودارهای مربوط به پروفایل‌های واقعی هر متغیر مستقل که نقاط بهینه در آن‌ها مشخص شده به‌همراه نمودار مربوط به بیشینه و کمینه مقدار بازدهی را نشان می‌دهد



شکل ۶- پروفایل‌های واقعی با داشتن نقاط پیش‌بینی عملکرد مطلوب برای جذب سم دلتامترین از محلول‌های آبی

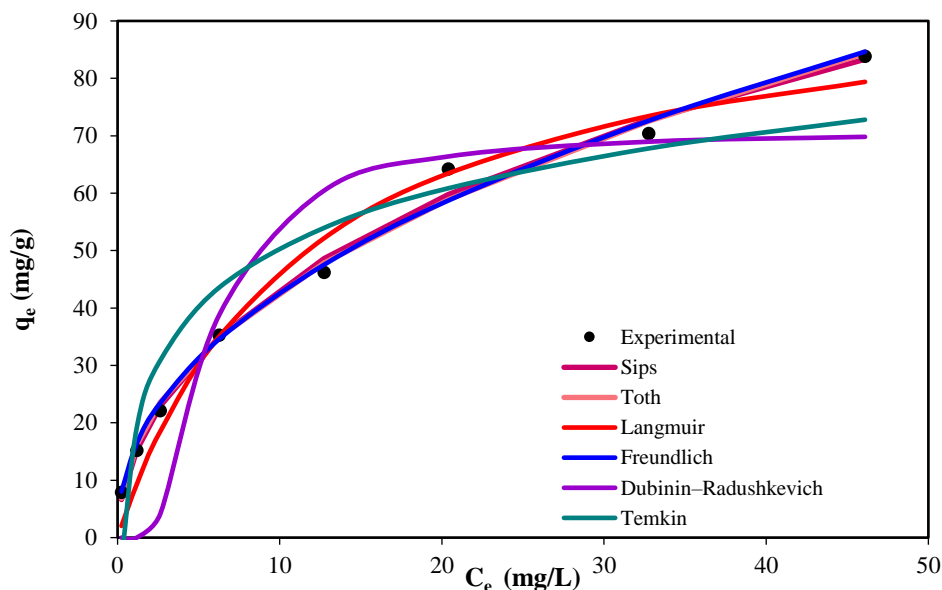
۳-۳- مطالعه ایزوترم

خصوصیات جذب و داده‌های تعادل (ایزوترم‌های جذب) نحوه تعامل آلاینده‌ها با مواد جاذب را توصیف می‌کنند (Akinyeye et al., 2020). مطالعه ایزوترم جذب برای حذف جذب آفت کش دلتامترین، توسط نانوکامپوزیت AC/Fe₃O₄ در شرایط بهینه pH برابر با ۷، زمان تماس ۳۰ دقیقه، دما برابر با ۲۵ درجه سانتی‌گراد و دوز جاذب ۱/۵ گرم بر لیتر در غلظت‌های مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۷). بدین منظور مدل‌های ایزوترمی دو پارامتری لانگمویر^۱، فروندلیچ^{۱۱}، دوبینین رادش کوویچ^{۱۲} و تمکین^{۱۳} و مدل‌های سه پارامتری از جمله ردلیچ-پیترسون^{۱۴}، سیپ^{۱۵} و توس^{۱۶} مورد مطالعه قرار گرفتند. براساس مطالعات انجام گرفته

مدلی که دارای بیشترین ضریب تبیین (R²) و کمترین خطای ریشه میانگین باشد به‌عنوان مدل مناسب خواهد بود. براساس نتایج به‌دست آمده که در جدول ۳ نشان داده شده‌اند برای مدل‌های ایزوترمی دو پارامتری مقادیر E، R_L و n به ترتیب برابر با ۰/۷۱۵۳۵-۰/۳۳۴، ۲/۲۲۹ و ۰/۳۳۴ شد، که نشان‌دهنده مطلوب و فیزیکی بودن فرآیند جذب است. نتایج نشان می‌دهد مدل سه پارامتری سیپ با دارا بودن ضریب تبیین برابر با ۰/۹۹۳۷ و خطای ریشه میانگین ۲/۶۰۹ به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای بیان فرآیند جذب سم دلتامترین توسط نانوکامپوزیت AC/Fe₃O₄ است. مدل سیپ ترکیبی از مدل‌های لانگمویر و فروندلیچ است که براساس فرضیات هر دو مدل استوار است. بنابراین فرآیند جذب هم به‌صورت تک لایه و هم به‌صورت چند لایه است.

جدول ۳- مدل‌های ایزوترمی و پارامترهای آن‌ها مربوط به جذب سم دلتامترین توسط نانوکامپوزیت AC/Fe₃O₄

خطای ریشه میانگین	ضریب تبیین	مقادیر	پارامترها	مدل‌ها
۴/۹۳۳	۰/۹۷۳	۹۹/۱۷۹	q _m (mg/g)	لانگمویر
		۰/۰۸۷	k _L (L/mg)	$q_e = \frac{q_m k_L C_e}{1 + k_L C_e}$
		۰/۰۷۱-۰/۵۳۵	R _L	$R_L = \frac{1}{1 + k_L C_e}$
۲/۶۳۶	۰/۹۹	۲/۲۲۹	n	فروندلیچ
		۱۵/۱۸	k _f ((mg/g).(L/mg) ^{1/n})	$q_e = k_f C_e^{1/n}$
۱۳/۱۱	۰/۸۰۸۴	۰/۳۳۴	E (KJ/mol)	دوبینین رادش کوویچ
		۷۰/۷	q _m (mg/g)	$q_e = q_m \exp\left(-\beta(RT \ln\left(1 + \left(\frac{1}{C_e}\right)\right))^2\right)$
		۴/۴۶۲	β×10 ⁻⁶ (mol ² /J ²)	$E = \frac{1}{\sqrt{2\beta}}$
۹/۱۸۸	۰/۹۰۵۸	۱۴/۶۵	B	تمکین (Temkin)
		۳/۱۲۲	A _T (L/g)	$q_e = B \ln(A_T C_e)$
۲/۷۷۵	۰/۹۹۲۸	۷۴/۹۷	k _{rp} (L/g)	ردلیچ-پیترسون
		۶۶/۴	α _{rp} (L/mg) ^{β_{rp}}	$q_e = \frac{k_{rp} C_e}{1 + \alpha_{rp} C_e^{\beta_{rp}}}$
		۰/۵۸۸۸	β _{rp}	
۲/۶۰۹	۰/۹۹۳۷	۱۴/۷	k _s (L/mg) ^{m_s}	سیپ (Sips)
		۰/۵۴۴	m _s	$q_e = \frac{k_s C_e^{m_s}}{1 + a_s C_e^{m_s}}$
		۰/۰۵۲۴	a _s (L/mg) ^{m_s}	
۲/۸۴۵	۰/۹۹۲۵	۱۵/۷۸	k _T (mg/g)	توس (Toth)
		۰/۱۱۳۲	a _T (mg/g)	$q_e = \frac{k_T C_e}{(a_T + C_e)^{1/t}}$
		۱/۷۷۹	T	



شکل ۷- نمودارهای ایزوترمی مربوط به جذب سم دلتامترین توسط نانوکامپوزیت AC/Fe₃O₄

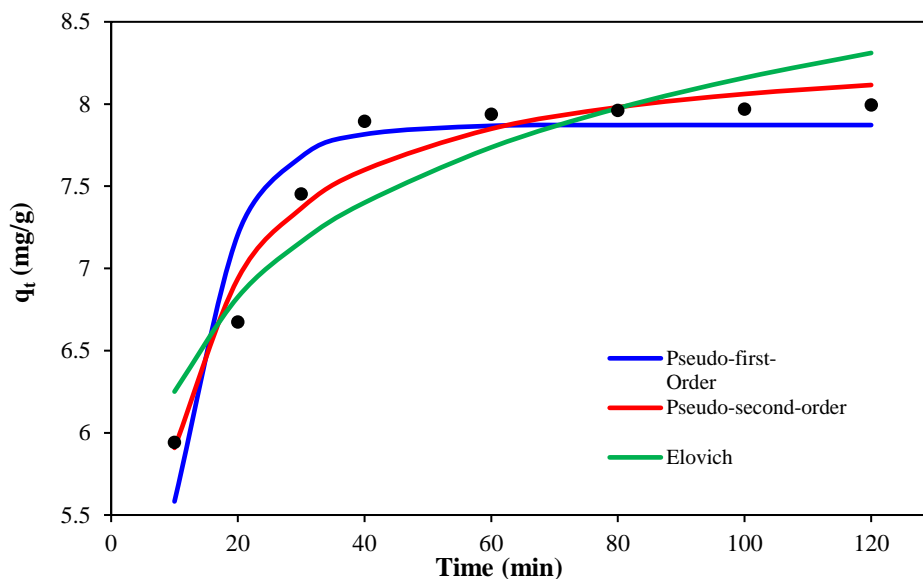
سینتیکی شبه درجه دوم پیروی می‌کند. بنابراین واکنش‌های رخ داده بین جاذب و آفت‌کش بر مبنای واکنش‌های شیمیایی است که شامل تبادل الکترون بین سطح جاذب و ماده جذب شونده است (Deb et al., 2019). معادله مدل سینتیکی شبه درجه دوم نشان‌دهنده مقدار ظرفیت جذبی تعادلی (q) برابر با ۸/۲۶۴ میلی‌گرم بر گرم و مقدار ثابت سرعت مرتبه دوم (k₂) در برابر با ۰/۲۹۴ گرم بر میلی‌گرم بر دقیقه است. هم‌چنین نرخ جذب اولیه آن (h) برابر با ۲۰/۱۱۳ mg.g⁻¹.min⁻¹ است که نشان‌دهنده بالا بودن سرعت جذب آفت‌کش دلتامترین توسط این جاذب است.

۴-۳- مطالعه سینتیکی

مطالعه سینتیکی فرآیند جذب آفت‌کش دلتامترین با استفاده از این مطالعه به منظور تعیین مکانیسم واکنش و کنترل فرآیندهای جذب سطحی انجام شد (شکل ۸). مدل‌های سینتیکی شبه درجه اول، شبه درجه دوم و الوویچ در pH و دوز جاذب بهینه، در زمان‌های تماس و غلظت‌های اولیه ذکر شده، میزان جذب مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۴). از روی مقادیر ضریب همبستگی (R²) و ریشه میانگین خطا می‌توان نتیجه گرفت که جذب آفت‌کش دلتامترین توسط نانوکامپوزیت مذکور از مدل

جدول ۴- مدل‌های سینتیکی و پارامترهای مربوط به آن‌ها

مقادیر	پارامترها	مدل‌های سینتیکی
۷/۸۷۲	q _{e, Cal} (mg/g)	شبه درجه اول $q_t = q_e(1 - e^{-k_1t})$
۰/۱۲۳	k ₁ (1/min)	
۰/۸۷۸	R ²	
۰/۲۹	RMSE	
۸/۲۶۴	q _{e, Cal} (mg/g)	شبه درجه دوم $q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t}$ $h = k_2 q_e^2$
۰/۲۹۴	k ₂ (g/mg.min)	
۰/۹۵۲	R ²	
۰/۱۸۱	RMSE	
۲۰/۱۱۳	h(mg/g.min)	Elovich $q_t = \beta \ln(\alpha \beta t)$
۲۲۷	α(mg/g.min)	
۰/۸۲۹	β(g/mg)	
۰/۸۴۹	R ²	
۰/۳۲۲۹	RMSE	
۷/۹۹۴	q _{e, exp} (mg/g)	

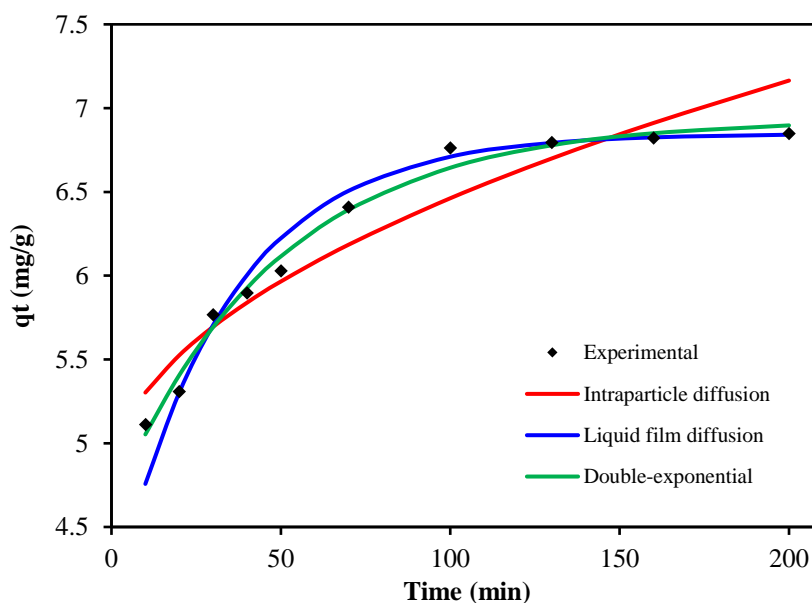


شکل ۸- نمودارهای سنتیکی درجه اول درجه دوم و الویچ مربوط به جذب سم دلتامترین توسط نانوکامپوزیت

۳-۶- مکانیسم جذب

به منظور مطالعه مکانیسم جذب سم دلتامترین توسط نانوکامپوزیت AC/Fe_3O_4 مدل‌های نفوذ درون ذره‌ای، نفوذ فیلم مایع و دونمایی مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۹). در مدل نفوذ درون ذره‌ای هرگاه مقدار عرض از مبدا مقدار قابل توجهی داشته باشد نشان دهنده تأثیر مکانیسم دیگری غیر از نفوذ درون ذره‌ای بر جذب است. بنابراین مدل نفوذ درون ذره‌ای برای بیان فرآیند جذب سم دلتامترین توسط نانوکامپوزیت AC/Fe_3O_4 مناسب نیست (Wadhera et al., 2019). یعنی علاوه بر مکانیسم نفوذ

درون ذره‌ای احتمالاً مکانیسم دیگری فرآیند جذب دارو کنترل می‌کند. مدل نفوذ فیلم مایع نیز مورد بررسی قرار گرفت که مقدار ضریب همبستگی آن نشان‌دهنده عدم مناسب بودن این مدل است. مدل دو نمایی به سبب داشتن بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقدار RMSE به عنوان مدل مناسب برای توصیف فرآیند جذب دارو با استفاده از کامپوزیت مغناطیسی مذکور شناخته شد (جدول ۴). این مدل شامل دو مرحله نفوذ سریع و آرام، به ترتیب مربوط به انتشار نفوذ برون ذره‌ای و درون ذره‌ای است. مقادیر سرعت مربوط به مرحله سریع و کند به ترتیب برابر با $2/486$ و $0/063$ بر دقیقه است.



شکل ۹- نمودارهای بررسی مکانیسم جذب مربوط به جذب سم دلتامترین توسط نانوکامپوزیت AC/Fe_3O_4

جدول ۵- مدل‌های مکانیسم جذب و پارامترهای آن‌ها مربوط به جذب سم دلتامترین توسط نانوکامپوزیت AC/Fe₃O₄

مقادیر	پارامترها	مکانیسم مدل‌ها
۰/۲۳۷	k _{id} (1/min)	نفوذ درون ذره‌ای $q_t = k_{id}t^{1/2} + C$
۵/۷۸۷	C (mg/g)	
۰/۷۱۵	R ²	
۰/۴۴۳	RMSE	
۰/۰۵۰۹	k _{fd} (1/min)	نفوذ فیلم مایع $\ln(1 - (q_t/q_e)) = -k_{fd}t$
۰/۸۷۵	R ²	
۰/۶۹۳	RMSE	
۲/۴۸۶	k ₁ (1/min)	دونمایی $q_t = q_e + \frac{D_1}{m_a} \exp(-k_1t) - \frac{D_2}{m_a} \exp(-k_2t)$
۰/۰۶۳	k ₂ (1/min)	
۰/۹۷۸	R ²	
۰/۲۱۳	RMSE	

کامپوزیت مغناطیسی AC/Fe₃O₄، مرحله واجذب و استفاده مجدد مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور فرآیندهای جذب سم دلتامترین توسط جاذب مورد بررسی در شرایط بهینه و واجذب آن تا ده مرحله انجام شد. در انتهای هر مرحله جذب واجذب، درصد واجذبی از طریق معادله (۵) محاسبه شد. هم‌چنین نتایج حاصل از جذب و واجذب در شکل ۱۰ نشان داده شده است. براساس نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مراحل جذب-واجذب توانایی جاذب در جذب سم کاهش می‌یابد. این تغییر می‌تواند به‌دلیل پر شدن سایت‌های فعال روی سطح جاذب باشد (Huang and Liu, 2013). اما هم‌چنان توانایی جذب جاذب پس از ۱۰ مرحله بالاتر از ۹۵٪ است که این امر نشان‌دهنده مناسب بودن جاذب برای استفاده در فرآیندهای صنعتی است. نتایج حاصل از آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مراحل جذب و واجذب درصد جذب سم دلتامترین با استفاده از این جاذب کاهش یافته است. این کاهش بازدهی می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند اشتباه شدن ساعت‌ها از سایت‌های فعال به‌وسیله مولکول‌های سم آسیب دیدن آن‌ها در سطح جاذب باشد.

$$\% \text{واجذب} = \left(\frac{\text{میزان واجذب دلتامترین}}{\text{میزان جذب دلتامترین}} \right) \times 100 \quad (5)$$

۳-۷- مطالعه ترمودینامیک

مطالعات ترمودینامیکی به منظور بررسی مطلوب بودن فرآیند جذب مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای ترمودینامیکی، شامل انرژی آزاد گیبس (ΔG°)، آنتالپی (ΔH°)، و آنتروپی (ΔS°) نقش مهمی در شناخت بهتر فرآیند جذب دارند. برای تعیین پارامترهای ترمودینامیکی، مطالعات جذب در دماهای مختلف ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد و در شرایط بهینه انجام گرفت (شکل ۱). بدین منظور معادلات وانت‌هوف برای مشخص نمودن خودبه‌خودی و غیر خودبه‌خودی بودن فرآیند مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۵).

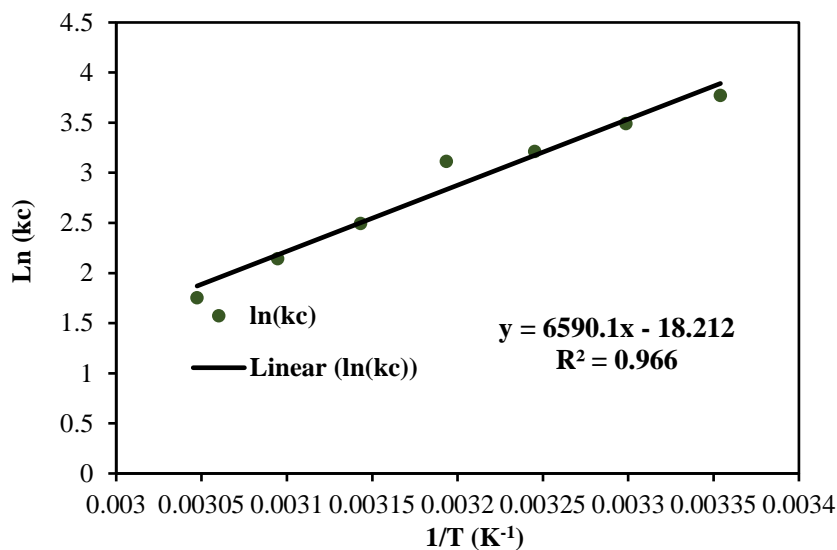
همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر هر سه پارامتر منفی به‌دست آمده است. مقدار منفی بودن ΔH° نشان دهنده گرماده بودن فرآیند است. هم‌چنین منفی بودن ΔS° به معنی افزایش بی‌نظمی و تأییدی بر خودبه‌خودی بودن فرآیند است (Mohseni-Bandpi et al., 2016). از منفی بودن مقدار ΔG° می‌توان خودبه‌خودی بودن فرآیند جذب را نتیجه گرفت. با افزایش دما، کاهش مقادیر ΔG° قابل مشاهده است که می‌تواند به سبب ماهیت گرمایزی و واکنش بین سایت‌های فعال جاذب و یون‌های دلتامترین باشد. هم‌چنین ودن فرآیند در دماهای بالا را نیز نشان می‌دهد. براساس مطالعات انجام شده و نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که جذب آفت‌کش دلتامترین از طریق نانو کامپوزیت AC/Fe₃O₄ نیازی به انرژی ندارد و به‌صورت خودبه‌خودی انجام می‌شود.

۳-۸- مطالعه واجذبی

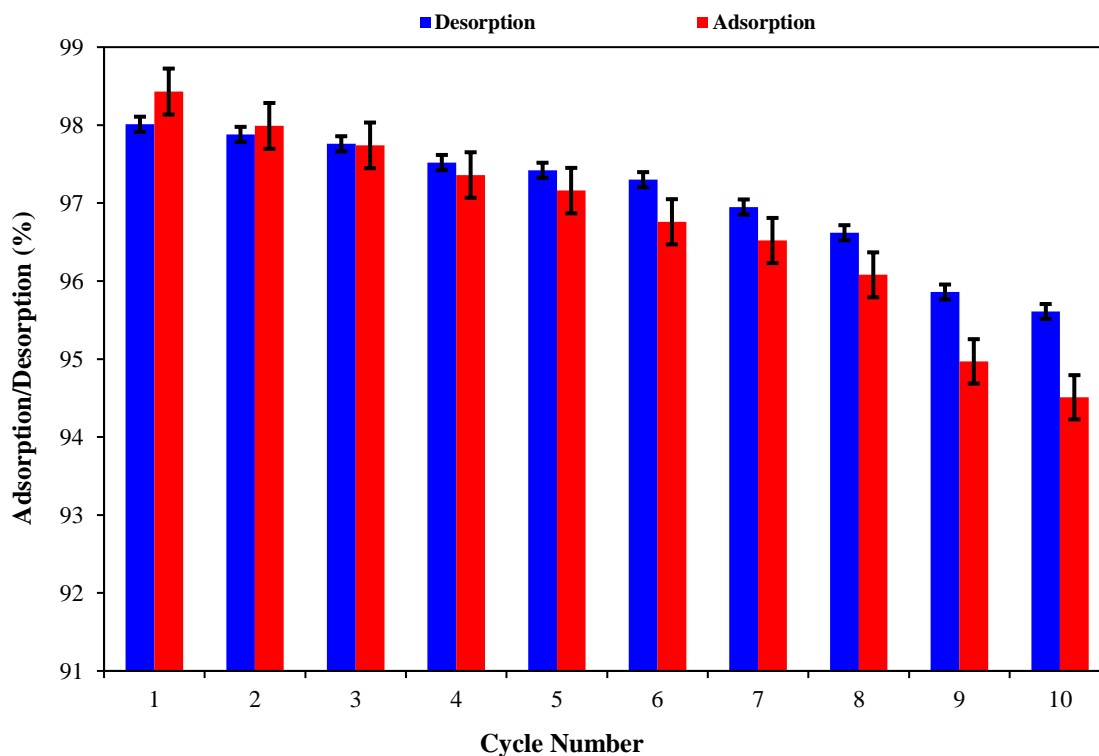
به‌منظور کاهش هزینه‌های فرآیند جذب سم دلتامترین توسط

جدول ۶- پارامترهای ترمودینامیکی مربوط به جذب سم دلتامترین توسط نانوکامپوزیت AC/Fe₃O₄

$\Delta S^\circ(\text{J/mol.K})$	$\Delta H^\circ(\text{KJ/mol})$	$\Delta G^\circ(\text{KJ/mol})$	T(°C)
-۱۵۱/۴۲	-۵۴/۷۹	-۹/۳۵۸	۲۵
		-۸/۷۹۶	۳۰
		-۸/۲۲۶	۳۵
		-۸/۱۰۸	۴۰
		-۶/۵۹۷	۴۵
		-۵/۷۵۶	۵۰
		-۴/۷۸۵	۵۵



شکل ۱۰- نمودارهای ترمودینامیک مربوط به جذب سم دلتامترین توسط کامپوزیت AC/Fe₃O₄



شکل ۱۰- نمودار جذب و واجذب آفت کش دلتامترین توسط کامپوزیت مغناطیسی AC/Fe₃O₄

- 1- Phytoremediation
- 2- Bioremediation
- 3- P'yanova
- 4- Xie
- 5- Desirability function
- 6- Adequate Precision
- 7- Remanence
- 8- Coercivity
- 9- Pareto
- 10- Langmuri
- 11- Freundlich
- 12- Dubinin-Radushkevich
- 13- Temkin
14. Redlich-Peterson
- 15- Sip
- 16- Toth

نتایج به دست آمده نشان داد که نانو ذرات سنتزی اصلاح شده می‌توانند به عنوان جاذبی کارآمد و ارزان برای حذف آفت کش دلتامترین در محلول‌های آبی به کار روند. در مطالعه حاضر به منظور جذب و حذف آفت کش دلتامترین، نانو کامپوزیت مغناطیسی AC/Fe_3O_4 سنتز شد. نانو کامپوزیت سنتز شده با استفاده از آنالیزهای FT-IR، XRD، VSM و SEM مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از روش پاسخ سطح (RSM)، طراحی آزمایش به روش باکس-بنکن (BBD) رفتار جاذب در جذب سم دلتامترین و به دست آوردن شرایط بهینه جذب مطالعه شد.

نتایج این مطالعه نشان داد شرایط بهینه برای حذف سم دلتامترین با استفاده از کامپوزیت مغناطیسی AC/Fe_3O_4 عبارت است از: غلظت اولیه سم دلتامترین $93/22$ میلی گرم بر لیتر، زمان تماس برابر با $47/13$ دقیقه، مقدار کامپوزیت 78 گرم بر لیتر و pH برابر با $7/15$ است. در این شرایط بازدهی جذب برابر با $99/43$ است. نتایج این مطالعه به طور کلی نشان داد که روش سطح پاسخ توانایی استفاده شدن برای بررسی شرایط بهینه در فرآیند جذب دلتامترین توسط جاذب مذکور را دارا است. نتایج مطالعه تعادلی نشان داد که بهترین مدل برای بیان فرآیند جذب سم دلتامترین توسط جاذب مورد بررسی مدل ایزترمی سیپ است. بنابراین فرآیند جذب از فرضیات حاکم بر هر دو مدل لانگمویر و فرنرندلیچ پیروی می‌کند. همچنین نتایج نشان داد که بیشینه ظرفیت جذب جاذب مورد نظر در شرایط مورد بررسی برای آفت کش دلتامترین برابر با $99/170$ میلی گرم بر گرم است. از طرفی نتایج مطالعه سینتیکی نشان داد که فرآیند جذب سم دلتامترین از معادله سینتیک شبه درجه دوم پیروی می‌کند. همچنین نتایج بررسی مکانیسم جذب سم دلتامترین توسط جاذب مذکور تابع نفوذ درون و برون ذره‌ای با دو مرحله سرعت مختلف است. بنابراین تعاملات بین جاذب و سم به صورت واکنش‌های شیمیایی است.

نتایج مطالعه ترمودینامیکی نشان داد که فرآیند جذب سم دلتامترین توسط AC/Fe_3O_4 گرمازا و خودبه خودی است. نتایج بررسی مکانیسم جذب سم دلتامترین توسط جاذب مذکور تابع نفوذ درون و برون ذره‌ای با دو مرحله سرعت مختلف است. نتایج مطالعه جذب-واجذب جذب سم دلتامترین توسط AC/Fe_3O_4 نشان داد که جاذب مذکور توانایی جذب سم دلتامترین را تا 10 مرحله را دارد.

۶- مراجع

- Akinyeye, O.J., Ibigbami, T.B., Odeja, O.O., and Sosanolu, O.M., (2020), "Evaluation of kinetics and equilibrium studies of biosorption potentials of bamboo stem biomass for removal of lead (ii) and cadmium (ii) ions from aqueous solution", *African Journal of Pure and Applied Chemistry*, 14(2), 24-41, <https://doi.org/10.5897/AJPAC2019.0812>.
- Asfaram, A., Ghaedi, M., Hajati, S., Goudarzi, A., and Dil, E.A., (2017), "Screening and optimization of highly effective ultrasound-assisted simultaneous adsorption of cationic dyes onto mn-doped Fe_3O_4 -nanoparticle-loaded activated carbon", *Ultrasonics sonochemistry*, 34, 1-12, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.05.011>.
- Bagheri, A.R., Ghaedi, M., Asfaram, A., Bazrafshan, A. A., and Jannesar, R., (2017), "Comparative study on ultrasonic assisted adsorption of dyes from single system onto Fe_3O_4 magnetite nanoparticles loaded on activated carbon: Experimental design methodology", *Ultrasonics sonochemistry*, 34, 294-304, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.05.047>.
- Bajeer, M.A., Shar, Z.H., Solangi, N., Solangi, S., Mallah, M., Channa, M.K., and Sherazi, S., (2022), "Adsorption and leaching of deltamethrin pesticide in alluvial soil under laboratory and field conditions", *Pakistan Journal of Medical and Health Sciences*, 16(05), 1161-1161, <https://doi.org/10.53350/pjmhs221651161>.
- Bezerra, M.A., Santelli, R.E., Oliveira, E.P., Villar, L.S., and Escalera, L.A., (2008), "Response surface methodology (rsm) as a tool for optimization in analytical chemistry", *Talanta*, 76(5), 965-977, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>.
- Cunha, F.D.S., Sousa, N.D.C., Santos, R.F.B., Meneses, J.O., do Couto, M.V.S., de Almeida, F.T.C., de Sena Filho, J.G., Carneiro, P.C.F., Maria, A.N. and Fujimoto, R.Y., (2018), "Deltamethrin-induced nuclear erythrocyte alteration and damage to the gills

- "Improvement of zeolite adsorption capacity for cephalixin by coating with magnetic Fe₃O₄ nanoparticles", *Journal of Molecular Liquids*, 218, 615-624, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.02.092>.
- Mojiri, A., Zhou, J.L., Robinson, B., Ohashi, A., Ozaki, N., Kindaichi, T., Farraji, H. and Vakili, M., (2020), "Pesticides in aquatic environments and their removal by adsorption methods", *Chemosphere*, 253, 126646, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126646>.
- Montgomery, D.C., (2017), *Design and analysis of experiments*, John Wiley & Sons, <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100032>.
- Oba, O.A., and Pasaoglu Aydinlik, N., (2022), "Preparation of mesoporous activated carbon from novel African Walnut Shells (AWS) for deltamethrin removal: Kinetics and equilibrium studies", *Applied Water Science*, 12(7), 149, <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01672-w>.
- P'yanova, L., Gerunova, L., Drozdetskaya, M., and Gerunov, T., (2019), "Comparative evaluation of the sorption activity of carbon sorbents with respect to deltamethrin and ivermectin pesticides", *Russian Journal of Applied Chemistry*, 92(8), 1122-1127, <https://doi.org/10.1134/S107042721908010X>.
- Raza, H.A., Amir, R., Idrees, M.A., Yasin, M., Yar, G., Farah, N., and Younus, M., (2019), "Residual impact of pesticides on environment and health of sugarcane farmers in punjab with special reference to integrated pest management", *Journal Global Innovation Agriculture Social Science*, 7(2), 79-84, <https://doi.org/10.22194/JGIASS/7.814>.
- Saini, S., Chawla, J., Kumar, R., and Kaur, I., (2019), "Response Surface Methodology (RSM) for optimization of cadmium ions adsorption using c 16-6-16 incorporated mesoporous mcm-41", *SN Applied Sciences*, 1(8), 894, <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0922-5>.
- Saleh, I.A., Zouari, N., and Al-Ghouti, M.A., (2020), "Removal of pesticides from water and wastewater: Chemical, physical and biological treatment approaches", *Environmental Technology & Innovation*, 19, 101026, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101026>.
- Saleh, T.A., Alhooshani, K.R., and Abdelbassit, M.S., (2015), "Evaluation of Ac/Zno composite for sorption of dichloromethane, trichloromethane and carbon tetrachloride: Kinetics and isotherms", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 55, 159-169, <https://doi.org/10.1016/j.tjce.2015.04.004>.
- Shafiee, M., Foroutan, R., Fouladi, K., Ahmadlouydarab, M., Ramavandi, B., and Sahebi, S., (2019), "Application of oak powder/Fe₃O₄ magnetic composite in toxic metals removal from aqueous solutions", *Advanced Powder Technology*, 30(3), 544-554, <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.12.006>.
- Shi, X., Karachi, A., Hosseini, M., Yazd, M.S., Kamyab, H., Ebrahimi, M., and Parsaee, Z., (2019), "Ultrasound wave assisted removal of Ceftriaxone and liver of colossoma macropomum", *Environmental Science and Pollution Research*, 25(15), 15102-15110, <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1622-1>.
- D'Crux, B., Madkour, M., Amin, M.O., and Al-Hetlani, E., (2020), "Efficient and recoverable magnetic AC-Fe₃O₄ nanocomposite for rapid removal of promazine from wastewater", *Materials Chemistry and Physics*, 240, 122109, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122109>.
- Deb, A., Kanmani, M., Debnath, A., Bhowmik, K.L., and Saha, B., (2019), "Ultrasonic assisted enhanced adsorption of methyl orange dye onto polyaniline impregnated zinc oxide nanoparticles: Kinetic, isotherm and optimization of process parameters" *Ultrasonics Sonochemistry*, 54, 290-301, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.01.028>.
- Ding, R., Cao, Z., Wang, Y., Gao, X., Luo, H., Zhang, C., Ma, S., Ma, X., Jin, H. and Lu, C., (2017), "The implication of p66shc in oxidative stress induced by deltamethrin", *Chemico-Biological Interactions*, 278, 162-169, <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2017.10.005>.
- Foroutan, R., Ahmadlouydarab, M., Ramavandi, B., and Mohammadi, R., (2018), "Studying the physicochemical characteristics and metals adsorptive behavior of cmc-g-hap/Fe₃O₄ nanobiocomposite", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(5), 6049-6058, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.09.030>.
- Huang, W., and Liu, Z.-M., (2013), "Biosorption of cd (ii)/pb (ii) from aqueous solution by biosurfactant-producing bacteria: Isotherm kinetic characteristic and mechanism studies", *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 105, 113-119, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.12.040>.
- Huang, Y., Xiao, L., Li, F., Xiao, M., Lin, D., Long, X., and Wu, Z., (2018), "Microbial degradation of pesticide residues and an emphasis on the degradation of cypermethrin and 3-phenoxy benzoic acid: A review", *Molecules*, 23(9), 2313, <https://doi.org/10.3390/molecules23092313>.
- Jiang, D., Yang, Y., Huang, C., Huang, M., Chen, J., Rao, T., and Ran, X., (2019), "Removal of the heavy metal ion nickel (ii) via an adsorption method using flower globular magnesium hydroxide", *Journal of Hazardous Materials*, 373, 131-140, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.01.096>.
- Karnib, M., Kabbani, A., Holail, H., and Olama, Z., (2014), "Heavy metals removal using activated carbon, silica and silica activated carbon composite", *Energy Procedia*, 50, 113-120, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.014>.
- Lu, Q., Sun, Y., Ares, I., Anadón, A., Martínez, M., Martínez-Larrañaga, M.R., Yuan, Z., Wang, X. and Martínez, M.A., (2019), "Deltamethrin toxicity: A review of oxidative stress and metabolism", *Environmental Research*, 170, 260-281, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.045>.
- Mohseni-Bandpi, A., Al-Musawi, T.J., Ghahramani, E., Zarrabi, M., Mohebi, S., and Vahed, S.A., (2016),

- sodium in aqueous media with novel nano composite g-C₃N₄/MWCNT/Bi₂WO₆ based on CCD-RSM model", *Ultrasonics Sonochemistry*, 68, 104460, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.01.018>.
- Sidik, S., Triwahyono, S., Jalil, A., Majid, Z., Salamun, N., Talib, N., and Abdullah, T., (2016), "CO₂ reforming of CH₄ over Ni-CO/MSN for syngas production: Role of CO as a binder and optimization using RSM", *Chemical Engineering Journal*, 295, 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.041>.
- Soares, S.F., Amorim, C.O., Amaral, J.S., Trindade, T., and Daniel-da-Silva, A.L., (2021), "On the efficient removal, regeneration and reuse of quaternary chitosan magnetite nanosorbents for glyphosate herbicide in water", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105189, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105189>.
- Sun, X.-Y., Ma, R.-T., Chen, J., and Shi, Y.-P., (2018), "Magnetic boronate modified molecularly imprinted polymers on magnetite microspheres modified with porous TiO₂ (Fe₃O₄@ pTiO₂@ MIP) with enhanced adsorption capacity for glycoproteins and with wide operational ph range", *Microchimica Acta*, 185(12), 565, <https://doi.org/10.1007/s00604-018-3092-z>.
- Tian, Y., Ma, H., and Xing, B., (2021), "Preparation of surfactant modified magnetic expanded graphite composites and its adsorption properties for ionic dyes", *Applied Surface Science*, 537, 147995, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147995>.
- Wadhera, P., Jindal, R., and Dogra, R., (2019), "Synthesis of semi interpenetrating network hydrogel [(GrA-Psy)-cl-Poly (AA)] and its application for efficient removal of malachite green from aqueous solution", *Polymer Engineering & Science*, 59(7), 1416-1427, <https://doi.org/10.1002/pen.25126>.
- Xie, L., Zhou, L., Li, L., Xie, X., and Li, Y., (2019), "Preparation and adsorption selectivity of deltamethrin molecularly imprinted polymers by two-step seed swelling method", *Journal of Applied Polymer Science*, 136(16), 47415, <https://doi.org/10.1002/app.47415>.
- Zainuddin, A.H., Wee, S.Y., and Aris, A.Z., (2020), "Occurrence and potential risk of organophosphorus pesticides in urbanised Linggi River, Negeri Sembilan, Malaysia" *Environmental Geochemistry and Health*, 1-13, <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00604-4>.



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

Evaluating Maintenance Strategies of Service Companies' Physical Assets with a Green Approach Using the Fuzzy Hierarchical Analysis Method (Case Study: Water and Waste Water Company of Tehran Province)

ارزیابی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات دارایی‌های فیزیکی شرکت‌های خدمات‌رسان با رویکرد سبز به روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: شرکت آب و فاضلاب استان تهران)

Reza Shahrjardi^{1*} and Mostafa Gurbanpour Delivand²

رضا شهرجردی^{۱*} و مصطفی قربانپور دلیوند^۲

1- Assistant Professor, Department of Industrial, Mechanical and Aerospace Engineering, Buin Zahra Technical and Engineering University, Buin Zahra, Qazvin, Iran.

۱- استادیار گروه مهندسی صنایع، مکانیک و هوافضا، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، بوئین زهرا، قزوین، ایران.

2- B.Sc. in Industrial Engineering, Buin Zahra Technical and Engineering University, Buin Zahra, Qazvin, Iran.

۲- کارشناس مهندسی صنایع، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، بوئین زهرا، قزوین، ایران.

* Corresponding Author, Email: r.shahrjardi@yahoo.com

* نویسنده مسئول، ایمیل: r.shahrjardi@yahoo.com

Received: 03/01/2023

Revised: 03/05/2023

Accepted: 16/05/2023

© IWWA

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۳

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۶

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

Population increment, industries growth and development in order to satisfy the increasing needs of human societies, on the one hand, and the risk of the destruction of non-renewable resources such as water, on the other hand, are irreparable results of disregarding the correlation between industry and the environment. In this research, the performance of the physical assets of water and sewage companies is monitored and the appropriate strategy for sustainable maintenance and repairs in these companies is selected. Also, maintenance and repairs and sustainable development data is gathered. Then by using Fuzzy Hierarchy method (Fuzzy AHP), among the strategies that have the most compatibility with sustainable maintenance and repair, the ranking is done. Finally, according to the results, the reactive strategy is determined as the most effective approach in sustainable maintenance and repairs of the physical assets of Tehran Province Water and Sewerage Company.

افزایش جمعیت، رشد و توسعه صنایع به منظور رفع نیازهای روزافزون جوامع بشری و تأمین منافع اقتصادی سازمان‌های مختلف برای احراز موجودیت در بازار رقابتی پیچیده امروزی پیامدهای ناگواری را به دنبال داشته است. این پیامدها با شتابی نگران‌کننده زوال حیات و سلامت انسان‌ها و حتی موجودات دیگر را ممکن می‌سازد و می‌تواند چرخه طبیعت را برهم زند و پتانسیل‌های طبیعی موجود در رفع نیاز نسل‌های آینده را به خطر اندازد. شرکت‌های آب و فاضلاب به‌عنوان مبنای حیات یک جامعه نقش بی‌بدیلی در تأمین و تقسیم این منشأ حیاتی به‌عهده دارند. بنابراین عدم مدیریت مناسب در نگهداری و تعمیرات تجهیزات و دارایی‌های فیزیکی در این صنعت منجر به هدررفت آب و انرژی و زیان‌های جبران‌ناپذیری در محیط‌زیست خواهد شد. بنابراین، با توجه به این‌که نگهداری و تعمیرات در کنترل و ارتباط مسالمت‌آمیز میان صنعت و محیط‌زیست نقشی انکارناپذیر ایفا می‌کند، این پژوهش پایش و بررسی عملکرد این تجهیزات را بررسی می‌کند. از این‌رو با پالایش و جمع‌آوری اطلاعات از پژوهش‌های صورت‌گرفته در حوزه‌های نگهداری و تعمیرات با توجه به رکن محیط‌زیستی آن، درخت تصمیمی طراحی و با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی که از روش‌های تحلیل مبتنی بر نظر کارشناسان است، استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات پایدار رتبه‌بندی شد. حاصل این قضاوت‌ها با بیشترین ضریب وزنی (۰/۲۷۱) بیانگر تأثیر نگهداری و تعمیرات کنش‌گرایانه بر دستیابی به هدف سبز در کنار انجام وظایف خدماتی شرکت آب و فاضلاب است.

Keywords: Fuzzy Hierarchical Analysis Technique, Physical Assets, Sustainable Maintenance Strategies, Utilities, Water and Wastewater Companies.

کلمات کلیدی: استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات پایدار، دارایی‌های فیزیکی، روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، شرکت‌های آب و فاضلاب، شرکت‌های خدمات‌رسان.

به‌صرفه باشد تا مدیران ارشد با وجود محدودیت‌های سازمان بتوانند این راهبردها را به‌کار بگیرند. لازمه این امر شناخت و کسب آگاهی کافی از راهبردهای نگهداری و تعمیرات و انتخاب شاخص‌های تصمیم‌گیری است.

بنابراین، تنوع گسترده فعالیت‌های انسانی و عدم توازن در برقراری اعتدال در مؤلفه‌های اقتصادی و محیط‌زیستی باعث شد تا بر روی نهادی زیربنایی و در سطح فعالیت خدماتی که زمینه‌ساز فعالیت دیگر سازمان‌ها است، مطالعاتی انجام شود. بدین منظور، با درنظر گرفتن اهمیت تأثیر سیستم نگهداری و تعمیرات پایدار و بررسی مغایرت‌های موضوعی و اتلاف‌های موجود به‌دلیل سوءمدیریت‌ها و نقش حیاتی شرکت‌های خدمات‌رسانی هم‌چون شرکت آب و فاضلاب در تأمین آب شرب شهری، مدیریت پسماندهای صنعتی در زمینه گندآب و هم‌چنین فراهم آوردن زمینه فعالیت و تداوم سایر ارکان یک جامعه، موجب شد تا از ادغام موضوع با فعالیت‌های خدماتی این نهاد مسیر توسعه‌ای با رویکرد جلوگیری از اتلاف و فعالیت بهینه فراهم شود. این رکن اساسی جامعه با در دست داشتن تأسیسات سنگین و حیاتی در سراسر کشور، نیازمند یک الگوریتم اصلاحی مناسب برای نیل به هدف بهینه‌گی است. زیرا این تأسیسات علاوه بر تأمین در تقسیم و انتقال آب و فاضلاب نقش کلیدی داشته و در صورت بروز هر رویداد روند خدمات‌رسانی کرده یا حتی قطع می‌شود و تأثیر منفی بر نهادهای وابسته به‌خود خواهد گذاشت. هدف از این پژوهش، دستیابی به راهبردی است که با افزایش قابلیت اطمینان و کارکرد بهینه این تجهیزات و تأسیسات، هدف محیط‌زیستی محقق شود.

۲- مرور ادبیات

۲-۱- استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات

استراتژی نگهداری و تعمیرات، شامل مجموعه‌ای از سیاست‌ها و اقداماتی است که برای نگهداری یا بازیابی تجهیزات و هم‌چنین سیستم پشتیبانی تصمیم که در آن فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات برنامه‌ریزی شده است، استفاده می‌شود (Shafiee and Sorensen, 2017). انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری مناسب، به اهداف استراتژیک شرکت بستگی دارد. در ادامه به برخی از استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات اشاره می‌شود (Gackowiec, 2019).

براساس Shin and Jun (2015)، استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات اساسی عبارت‌اند از: نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه

پیشرفت علم و صنعت و گسترش تمدن در کنار رفاه و آسایشی که برای انسان به ارمغان آورده است، پیامدهای ناخوشایندی نیز برای انسان به‌دنبال داشته است. از جمله این پیامدها می‌توان به تغییرات محیط‌زیستی نامطلوب هم‌چون گرمایش کره زمین، افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و آسیب به سلامت افراد جامعه اشاره کرد. به‌همین منظور، همگام با افزایش اهمیت مسائل محیط‌زیستی در توسعه پایدار، تلاش تمامی صنایع بر این است که با برنامه‌ریزی صحیح و به‌کارگیری روش‌های مناسب، علاوه بر دستیابی به اهداف اقتصادی خود و کسب مزیت رقابتی، آسیب‌های ناشی از فعالیت‌های صنعتی بر محیط‌زیست را به حداقل برسانند. اما تحقق این امر بدون اطلاع از مؤلفه‌های تأثیرگذار در توسعه پایدار و اقدامات اصلاحی در کاهش اثرات مخرب محیط‌زیستی میسر نخواهد شد.

یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌ها در این زمینه، پیامدهای ناشی از فرسایش تجهیزات و تأسیسات بنگاه‌های اقتصادی و خدماتی و فعالیت‌های نامناسب برای نگهداری و تعمیرات آن‌ها است. علت این امر این است که خرابی و فرسایش ماشین‌آلات و تأسیسات فیزیکی و ناتوانی در انجام اقدامات تعمیراتی و بازدارنده مناسب می‌تواند منجر به هدررفت و تلفات بیش از حد مطلوب و مصرف بیش از حد منابع تجدیدناپذیر شود که این موارد، علاوه بر کاهش شدید سودآوری و ورشکستگی سازمان، آسیب بزرگی به محیط‌زیست وارد می‌کنند. بنابراین، ایجاد یک سیستم نگهداری و تعمیرات مناسب و انتخاب استراتژی‌های صحیح و برنامه‌ریزی‌های دقیق نگهداری و تعمیرات در سطح مدیریتی و آموزش نحوه پیاده‌سازی برنامه‌های تعیین‌شده توسط تکنسین‌ها و اپراتورها در سازمان‌ها امری ضروری به‌نظر می‌رسد. این سیستم‌ها، می‌توانند منجر به کاهش تلفات تولید، کاهش انرژی مصرفی، کاهش تولید مواد مضر و در نهایت تولید سبز و پایدار شوند. هم‌چنین، علاوه بر کمک به کاهش اثرات محیط‌زیستی، نقش مهمی نیز در دستیابی به اهداف سازمانی و کسب مزیت رقابتی، بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان، کاهش زمان توقف تجهیزات، کیفیت تولیدات، افزایش بهره‌وری، ایمنی تجهیزات و ... ایفا می‌کنند.

نکته قابل‌تأمل در مبحث انتخاب استراتژی صحیح نگهداری و تعمیرات، درنظر گرفتن راهبردی بهینه است که علاوه بر داشتن بیشترین تأثیر بازدارندگی در آسیب‌های محیط‌زیستی، از لحاظ فاکتورهایی چون هزینه، انعطاف‌پذیری، ارزش افزوده تولید و ...

et al., 2017)

نگهداری و تعمیرات اضطراری (EM)^۷ نوعی از تعمیرات است که صرفاً بعد از وقوع خرابی و به صورت اضطراری انجام می‌گیرد. معمولاً هیچ‌گونه آمادگی قبلی در مورد نوع مشکلات و روش رویارویی با آن‌ها وجود ندارد. علت این است که در این سازمان‌ها اقدامات انجام شده و تجارب، ثبت، ضبط و تحلیل نمی‌شوند (عدم وجود مدیریت دانش). این روش کاملاً خنثی (غیرقابل برنامه‌ریزی) است و فقط در هنگام خرابی تجهیزات است که این نوع نت نقش ایفا می‌کند. این راهبرد دارای وظایف دائمی نگهداری و تعمیرات نیست. نگهداری و تعمیرات کنش‌گرایانه (PAM) مجموعه‌ای از فعالیت‌های طراحی شده برای شناسایی و تصحیح یک حادثه قبل از وقوع است تا از اثرات آن در شبکه و در داخل سرویس جلوگیری کند (Crespo Márquez et al., 2009).

۲-۲- شرکت‌های خدمات‌رسان

شرکت‌های خدمات‌رسان نهادهایی هستند که مدیریت کالاهای عمومی را به‌ویژه در مراحل پایانی زنجیره تأمین برعهده دارند و شامل خدماتی مانند تولید و توزیع برق، توزیع گاز، مدیریت پسماند، آب و مخابرات هستند. این شرکت‌ها معمولاً توسط سازمان‌های دولتی مدیریت یا کنترل می‌شوند. با این حال، آن‌ها باید ذی‌نفعان مختلف را راضی کنند و برای مدیریت بهتر خدمات خود تحت فشار هستند (Badia et al., 2020). در صورتی که تأسیسات و تجهیزات این سازمان‌ها متوقف شوند، خسارات و نابسامانی‌های متعددی به‌بار می‌آورند که منجر به مختل شدن زندگی شهروندان و فشارهای مضاعف ذی‌نفعان خواهد شد. به همین دلیل، توجه به سیستم‌های نگهداری و تعمیرات این سازمان‌ها و جلوگیری از اتفاقات مذکور، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۲-۳- نگهداری و تعمیرات در فعالیت‌های حوزه سازمان

آب و فاضلاب

مأموریت بخش آب و فاضلاب، مشارکت در توسعه اقتصادی و اجتماعی شهرها و روستاهای کشور از طریق ایجاد و بهره‌برداری از تأسیسات و شبکه‌های فراگیر آب و فاضلاب با روش‌های بهداشتی، کارآمد، مطمئن و منظم، به‌منظور کنترل چرخه آب بین محیط زندگی و محیط زیست، با تکیه بر مشارکت‌های مردمی تعریف شده است (نامجو و همکاران، ۱۳۸۹). عرضه خدمات آب و فاضلاب با شش ویژگی کمیت، کیفیت و قیمت مناسب،

نگهداری و تعمیرات اصلاحی (CM)^۲ و نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط (CBM)^۳. نگهداری و تعمیرات اصلاحی، ساده‌ترین و در عین حال پرهزینه‌ترین استراتژی نت به‌شمار می‌رود، زیرا به‌عنوان واکنشی در برابر خرابی‌ها و پیامدهای حوادث استفاده می‌شود. در این شاخه نگهداری و تعمیرات امکان برنامه‌ریزی برای تخصیص بهینه منابع و از بین بردن عیوب وجود دارد و می‌توان از انبار نمودن بیهوده ابزارآلات، تجهیزات، قطعات یدکی و مواد مصرفی جلوگیری نمود و با حداقل نیروی انسانی خدمات لازم را ارائه کرد. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه پاسخ به معایب اقدامات اصلاحی و نوعی از تعمیرات است که به‌شکل منظم بر روی قطعه‌ای از تجهیزات صورت می‌گیرد تا احتمال از کار افتادن آن‌را کاهش دهد. این نوع از تعمیرات زمانی که تجهیزات هنوز در حال فعالیت هستند صورت می‌گیرد تا مبادا به‌شکل غیرمنتظره‌ای از کار بیفتد. نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط، اغلب با عباراتی مانند نگهداری و تعمیرات پیش‌گویانه، مدیریت سلامت و نگهداری و تعمیرات در شرایط مرتبط است. در این استراتژی رعایت وضعیت سیستم و عناصر آن، ارزیابی وضعیت محصولات و همچنین پیش‌بینی خطر آسیب با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده اهمیت دارد (Horner et al., 1997).

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر ریسک (RBM)^۴ نوع دیگری از استراتژی نت است که هدف آن به‌حداقل رساندن احتمال خرابی تجهیزات، اثرات منفی تجهیزات پس از خرابی و هزینه کلی نگهداری و تعمیرات با به حداکثر رساندن قابلیت اطمینان تجهیزات است (Krishnasamy et al., 2005).

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM)^۵، یک استراتژی مبتنی بر یک روش بهبود سیستم است که ضمن شناسایی و ابداع سیاست‌ها و استراتژی‌های عملیاتی و نگهداری، دیدگاهی مقرون‌به‌صرفه را حفظ می‌کند. به‌طور خلاصه، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان، یک رویکرد سیستماتیک برای تعریف یک برنامه نگهداری و تعمیرات برنامه‌ریزی شده با وظایف مقرون‌به‌صرفه و در عین حال حفظ عملکردهای حیاتی کارخانه است (Siddiqui and Ben-Dava, 2009).

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر زمان (TBM)^۶ بر این دیدگاه استوار است که ماشین‌آلات پس از مدت کارکرد، دچار استهلاک شده و باید با انجام فعالیت تعمیراتی به وضعیت «مانند نو» برگردانده شوند. در این روش براساس دوره‌های زمانی از پیش تعریف شده، تجهیزات و ماشین‌آلات مورد بازرسی قرار می‌گیرند و در صورت نیاز تعویض یا اقدامات اصلاحی صورت می‌پذیرد (Ge

ارزیابی ریسک FMEA نسبت به تجزیه و تحلیل و ارزیابی ریسک و مشخص نمودن خطرات با ریسک‌های بالا اقدام کرد. در نهایت ۲۹ جنبه خطر معرفی شد که از این میان، ۱۵ جنبه در رده ریسک‌های بالا قرار گرفته است.

قدمی فیروزآبادی (۱۳۹۵) میزان مصرف آب و انرژی، تلفات و راندمان انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ برقی را بررسی کرد. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که تعمیر و نگهداری صحیح پمپ‌ها و موتورهای یکی از مهم‌ترین عوامل در بهبود راندمان انرژی است. (Le Gat and Eisenbeis (2000) سودمندی رویکرد تئوری بقا را با استفاده از مدل خطر تناسبی (Weibull (WPHM) نشان داد و اعتبار آن را در مواردی که فقط داده‌های سوابق نگهداری کوتاه در دسترس هستند مورد بحث قرار داد. این تحقیق نتایج حاصل از اعمال مدل را در سیستم‌های آبی با سوابق نگهداری کوتاه و طولانی ارائه داد. مقایسه بین خرابی‌های پیش‌بینی شده و مشاهده شده نشان می‌دهد که سوابق تعمیر و نگهداری کوتاه (۱۰±۵ سال) به اندازه سوابق تعمیر و نگهداری طولانی نتایج خوبی برای شناسایی لوله‌ها برای بازسازی و پیش‌بینی تعداد خرابی‌های سراسری آینده ارائه می‌دهد.

در نهایت، موضوعی که به‌طور ویژه‌ای این پژوهش را هدایت می‌کند این است که مراکز شهری به‌علت تراکم جمعیتی و به تناسب آن، تراکم تأسیسات آبرسانی و گستردگی شبکه جمع‌آوری و دفع فاضلاب، برای مقابله با اثرات فرسایش‌های متداول و رخدادهای ناگهانی نیازمند مراقبت‌ها، مقاوم‌سازی‌ها و تمهیدات خاص خود هستند (نوروزی و قهرودی تالی، ۱۳۹۸) و مدیریت چنین تأسیسات حیاتی‌ای نیازمند برنامه‌ریزی و اقداماتی از پیش تعیین شده مانند برنامه‌هایی برای تخصیص آب (کانونی و منعم، ۱۳۹۵) و اقدامات اصلاحی برای نگهداشت تأسیسات زیربنایی (حامد مزرعه و رضانی، ۱۴۰۱) است. به‌همین منظور، این پژوهش با هدف بهیمنی در خصوص تأسیسات زیربنایی شرکت‌های خدمات‌رسان با بهره‌گیری از روشی مبتنی بر نظر کارشناسان حوزه آب و فاضلاب و به‌طور ویژه‌ای در استان تهران صورت گرفته است.

۳- بیان مساله

فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات، به‌خصوص برای سازمان‌ها و صنایع بزرگ اهمیت زیادی دارد. شرکت‌های خدمات‌رسان به‌عنوان دسته‌ای از نهادها محسوب می‌شوند که نقش بسیار حائز اهمیتی در جامعه کنونی با تأمین زمینه فعالیت و بقای سایر ارکان

استمرار، پوشش و رضایت‌مندی مشترکان، مجموعه‌ای زنجیروار از حلقه‌های به‌هم‌پیوسته مدیریت حوضه آبریز، مدیریت زائده‌های انسانی، صنعتی و کشاورزی، فرآیندها و تأسیسات تصفیه و سالم‌سازی، تأسیسات نگهداشت و توزیع و کنترل عملکرد صحیح آن‌ها است. پرواضح است که هرگونه نقص در زیرساخت‌ها و عملکرد هر یک از حلقه‌های برشمرده، ضمن اعمال فشار مضاعف و ناخواسته بر سایر اجزا، نیل به هدف غایی تأمین مستمر آب آشامیدنی سالم و کافی را دشوار و گاه ناممکن می‌سازد (قنادی، ۱۳۹۷). به‌همین منظور، پژوهش‌های متعددی درخصوص پیاده‌سازی سیستم نگهداری و تعمیرات و جلوگیری از توقف تجهیزات و تأسیسات این بخش صورت گرفته است. در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره می‌شود:

بهزاد و همکاران (۱۳۸۵) روش نگهداری و تعمیرات پیشگویانه و کنترل شرایط در مورد ایستگاه‌های پمپاژ آب را بررسی کردند. روش کار در این پژوهش، اندازه‌گیری ارتعاشات در محل‌های مناسب و بررسی روند این ارتعاشات و طیف‌های فرکانسی آن‌ها است. چنین سیستمی در یکی از ایستگاه‌های پمپاژ آب تهران پیاده‌سازی شده است که نتایج آن حاکی از این است که عیوب موجود، قبل از رسیدن به حالت بحرانی تشخیص داده می‌شوند و تعمیرات لازم بر روی ماشین‌آلات انجام می‌گیرد. نتایج آماری به‌دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که این روش نگهداری و تعمیرات چه از لحاظ اقتصادی و چه از لحاظ قابلیت اطمینان ماشین‌آلات، بر سایر روش‌های نگهداری و تعمیرات ارجحیت دارد.

شهرچردی (۱۴۰۱) بهره‌وری سیستم‌های نگهداری و تعمیرات را ارزیابی کردند. در این پژوهش، پس از شناسایی عوامل مؤثر بر عملکرد سیستم نگهداری و تعمیرات شرکت آب و فاضلاب استان البرز، با استفاده از روش‌های فازی تصمیم‌گیری، این عوامل رتبه‌بندی شد.

حذار و همکاران (۱۳۹۴) کارایی نرم‌افزار ARC GIS در واحد نگهداری و تعمیرات شرکت آب و فاضلاب را بررسی کردند. این سیستم، علاوه بر آن که قابلیت سیستم‌های مکانیزه قبلی را دارا است، توانایی مدیریت مکانی اطلاعات را نیز به کاربر می‌دهد و از این حیث نگهداری و تعمیرات سیستم‌ها و تأسیساتی که دارای ماهیت مکانی هستند، با استفاده از این سیستم بسیار مناسب است.

ستوده (۱۳۹۸) جنبه‌های خطر ایمنی، بهداشت حرفه‌ای و محیط‌زیستی تصفیه‌خانه فاضلاب ارومیه در فرایندهای مختلف فاز یک تصفیه فاضلاب را شناسایی کرد و با استفاده از روش

هدررفت انرژی و غیره را کاهش دهد و محیط‌زیست متأثر از صنعت موردنظر را از معضلاتی که آنرا به سمت نابودی می‌کشاند رها سازد.

لذا در این پژوهش به‌منظور یافتن راهبرد بهینه نگهداری و تعمیرات (پایدار) در دارایی‌های فیزیکی شرکت‌های آب و فاضلاب برای کاهش هدررفت آب، کاهش هدررفت انرژی و ایمنی با توجه به معیارهای هزینه، متوسط زمان بین خرابی، در دسترس بودن لوازم تعمیرات و ریسک خطر، از میان استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات زمان‌بندی‌شده، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر ریسک، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان و نت اصلاحی پرسشنامه‌ای طراحی و در اختیار خبرگان قرار می‌گیرد تا بتوان با تحلیل سلسله مراتبی فازی به نتیجه مطلوب رسید.

جامعه ایفا می‌کند. از سوی دیگر، شرکت‌های خدمت‌رسانی که در حوزه انرژی پاسخگوی پیش‌نیاز فعالیت‌های دیگر هستند، نیاز به توجه دوجندانی برای پایداری و تداوم از یک‌سو و کاهش اتلاف و آسیب از سوی دیگر دارند. چنان‌چه ملاحظات محیط‌زیستی و اقتصادی به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شود، اهمیت مسئله از دیدگاه مدل‌سازان و مدیران بیشتر می‌شود. نگهداری و تعمیرات به‌عنوان یکی از ارکان اساسی هر فعالیت به یکی از بخش‌های ضروری در دستیابی به اهداف کمی و کیفی سازمان در بحث محیط‌زیست تبدیل شده است. بنابراین داشتن یک راهبرد مشخص برای این بخش در راستای سبز از اهمیت بیشتری برخوردار است. زیرا چنین راهبردی می‌تواند نتایج و عواقب ناشی از خرابی ماشین‌آلات نظیر تولید ضایعات، انتشار گازهای سمی ناشی از سوخت ناقص، پراکندگی مواد شیمیایی خطرناک و



شکل ۱ - الگوریتم اجرای مطالعه

۴- الگوریتم اجرای تحقیق

۴-۱- گام اول: شناسایی و تعیین معیارها، زیرمعیارها و راهبردها

مرحله اساسی در هر تصمیم‌گیری و گزینش از بین موارد قابل انتخاب پیش‌رو، تعیین فاکتورهای ارزیابی گزینه‌ها است، فاکتورهایی که اولویت راهبردها را نسبت به خود برای انتخاب نشان می‌دهند. به‌همین منظور در این گام، پژوهش‌های صورت‌گرفته در حوزه نگهداری و تعمیرات به‌عنوان فعالیت حمایتی تولید در صنایع مختلف و سازمان‌های خدماتی و نهادهای حفاظت محیط‌زیست به‌عنوان اقدام اصلی با رویکرد توسعه پایدار در راستای انتخاب و اجرای سیاست صحیح برای نیل به اهداف توسعه پایدار مورد بررسی قرار گرفت. پس از بررسی در مطالعات انجام شده و استفاده از نظر کارشناسان خبره، از میان ۱۲ معیار مرتبط با نگهداری و تعمیرات، ۱۲ زیرمعیار مطرح‌شده در خصوص توسعه پایدار و ۱۰ آلترناتیو از میان استراتژی‌های مختلف

نگهداری و تعمیرات، شاخص‌های مناسب برای تشکیل ساختار تصمیم‌گیری و اولویت‌بندی انتخاب شد تا بتوان در گام‌های بعدی با تحلیل ساختار به نتیجه مطلوب و کاربردی برای صنایع، مخصوصاً سازمان‌های خدمات‌رسان رسید. پس از بررسی و غربال مقاله‌های موجود در زمینه موضوعات مشترک تصمیم‌گیری چندمعیاره، توسعه پایدار و نگهداری و تعمیرات، جدولی از شاخص‌ها و راهبردهای مورد استفاده در این پژوهش‌ها به‌دست آمد که با مشاوره کارشناسان حوزه‌های مربوطه و استدلال پژوهشگر، تعدادی از این معیارها و راهبردها برای طراحی درخت سلسله‌مراتبی ادغام و انتخاب شدند. درخصوص انتخاب‌ها تلاش بر آن بوده است با دیدگاهی فراگیر گزینه‌ها و معیارهایی در مرحله مقایسه قرارگیرند تا تفاوت میان آن‌ها تعاملی را برای هم‌پوشانی ضعف‌های هریک در قضاوت‌ها نشان دهد. در واقع این تناقض معیارها است که قضاوت‌هایی صحیح را با علم به موضوع شکل می‌دهد. جدول ۱ برخی معیارها و راهبردهای یافته‌شده در پژوهش‌های علمی را نشان می‌دهد.

جدول ۱ - معیارها و راهبردهای یافته شده در پژوهش‌های علمی

معیارهای نگهداری و تعمیرات	زیرمعیارهای توسعه پایدار	استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات
ریسک خطر حوادث	سطح صدمات بالقوه برای کارگران	نگهداری و تعمیرات زمان‌بندی شده
پشتیبانی انبار لوازم یدکی	میزان تأثیر بالقوه بر آب‌وهوای محیط اطراف	نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط
متوسط زمان تعمیر	هزینه چرخه عمر تجهیز	نگهداری و تعمیرات اصلاحی
هزینه تعمیر	میزان برخورداری از تکنولوژی سبز	نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان
قابلیت تعمیرپذیری	میزان هدررفت سوخت و انرژی	نگهداری و تعمیرات مبتنی بر ریسک
در دسترس بودن تجهیز	سطح بالقوه آسیب به تأسیسات	نگهداری و تعمیرات زمان خاموشی
قابلیت اطمینان تجهیز	آلودگی قابل پیش‌بینی	نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه
ریسک شکست قطعات	درصد ضایعات تولیدی بر اثر خرابی	نگهداری و تعمیرات اضطراری
خروجی ضایعات ناشی از خرابی	میزان تأثیر در بازیافت	نگهداری و تعمیرات فرصت‌طلبانه
هزینه تضمین	روند زوال منابع تجدیدناپذیر	نگهداری و تعمیرات کنش‌گرایانه
هزینه پیاده‌سازی استراتژی	تولید زباله‌های جامد قابل دفن	
مدت زمان عیب‌یابی	پتانسیل گرم‌شدن زمین	

۴-۲- گام دوم: پیاده‌سازی روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی

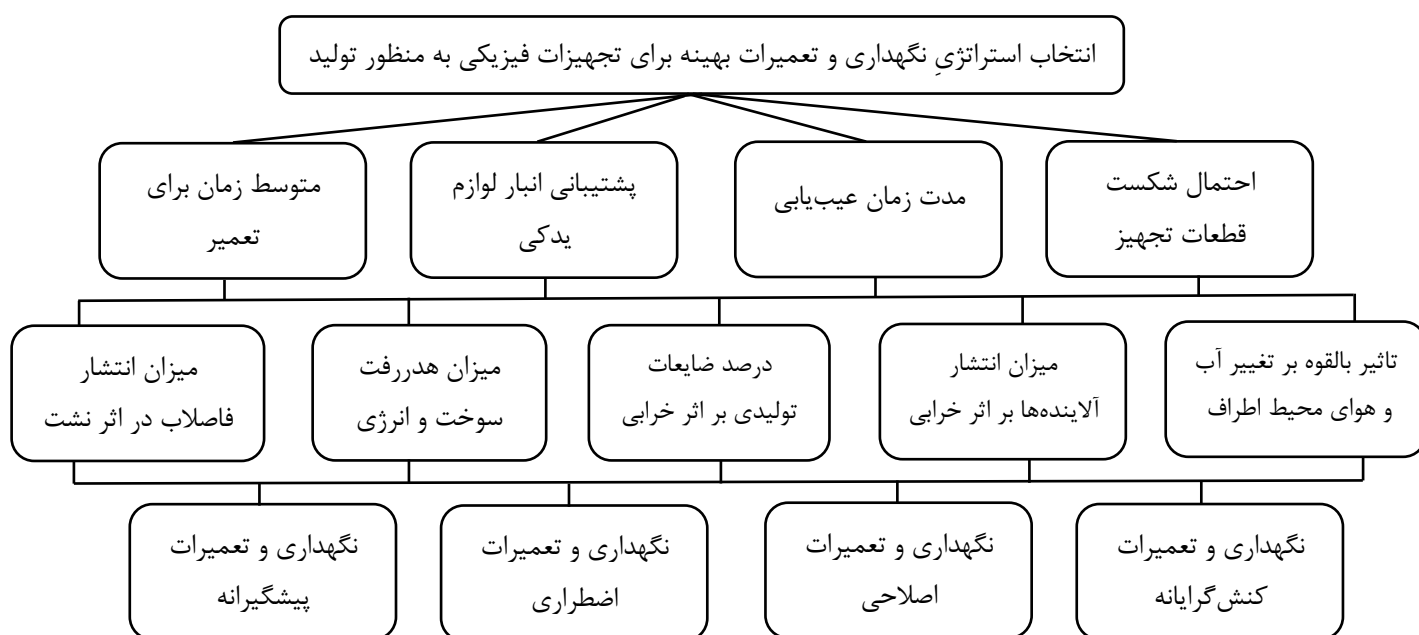
۴-۲-۱- تشکیل درخت سلسله‌مراتبی و طراحی پرسشنامه ماتریس مقایسات زوجی

گام نخست برای تصمیم‌گیری در خصوص یک موضوع با در نظر گرفتن گزینه‌های قابل انتخاب و معیارها و زیرمعیارهایی که انتخاب بر اساس آن‌ها صورت می‌گیرد، ترسیم نمایی از ارتباط میان این اجزای تعیین‌شده در گام قبل است. ساختار شبکه‌ای عناصر این امکان را در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهد تا با

نگاهی گسترده‌تر، در پرسشنامه تهیه‌شده بر اساس ارتباطات تعریف‌شده توسط پژوهشگر اقدام به تعیین اولویت عناصر هر سطح نسبت به عنصری در سطح بالاتر کنند. در این پژوهش از ساختار چهارسطحی تحلیل سلسله‌مراتبی (شکل ۲) استفاده می‌شود که در سطح نخست، هدف از انتخاب راهبرد بهینه، در سطح دوم، معیارهای متناسب با استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات، سطح سوم، متشکل از شاخص‌های محیط‌زیستی متأثر از عناصر نگهداری و تعمیرات سطح بالاتر و در سطح آخر، راهبردهای این فعالیت پشتیبان تولید قرارداد که باید براساس

درایه‌های بالای قطر اصلی است. به‌منظور رفع ابهام تصمیم‌گیری و دستیابی به پاسخی دقیق‌تر از اعداد فازی در بازه‌ای استفاده می‌شود که هر یک از این اعداد فازی بیانگر یک اولویت لسانی و نشانه یک فاصله فازی مثلثاتی است. خط‌کش‌های مقیاس متفاوتی برای پاسخگویی به صورت کیفی وجود دارد که معروف‌ترین آن‌ها خط‌کش مقیاس توماس ساعتی است. البته این مرجع امتیازدهی کیفی برای روش تحلیل سلسله مراتبی کلاسیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای روش فازی پژوهشگر می‌تواند خط‌کش مقیاس خود را با توجه به موضوع مورد مطالعه تعریف کند. در این پژوهش از خط‌کشی ۶ درجه‌ای با مقیاس فازی مثلثی به شرح جدول ۲ استفاده می‌شود.

امتیازدهی خبرگان در پرسشنامه اولویت‌بندی شوند. پرسشنامه مذکور از تعدادی سوال تشکیل شده است که پاسخ خبرگان و کارشناسان به این سوالات در ماتریسی تحت‌عنوان، ماتریس مقایسات زوجی ثبت می‌شود. در واقع ماتریس مقایسات زوجی، ماتریسی است که هر درایه آن نمایانگر درجه اهمیت معیارها نسبت به یکدیگر است. در این ماتریس قطر اصلی عدد یک قرار می‌گیرد که این موضوع بیانگر برابری اولویت هر یک از عناصر نسبت به خود است، هر یک از درایه‌های بالای قطر اصلی نشان‌دهنده درجه اهمیت عناصر سطر نسبت به عناصر ستون و هر یک از درایه‌های پایین قطر اصلی، نشان‌دهنده درجه اهمیت عناصر ستون به عناصر سطر است که مقدار آن‌ها معکوس مقادیر



شکل ۲- درخت سلسله مراتبی چهار سطحی

جدول ۲- خط‌کش مقیاس ۶ درجه‌ای فازی مثلثی

عدد فازی	اولویت زبانی	مقیاس فازی مثلثی	معکوس مقیاس فازی مثلثی	اولویت زبانی	عدد فازی
۱	ارجحیت برابر	(۱، ۱، ۱)	(۱، ۱، ۱)	ارجحیت برابر	۱
۲	ارجحیت کمی بیشتر	(۰/۵، ۱، ۱/۵)	(۱، ۱/۵، ۰/۵)	ارجحیت کمی بیشتر	۲
۳	ارجحیت نسبتاً بیشتر	(۰، ۱/۳، ۱)	(۱، ۲/۳، ۰)	ارجحیت نسبتاً بیشتر	۳
۴	ارجحیت بیشتر	(۰/۲، ۱، ۱/۲)	(۱/۲، ۰، ۱)	ارجحیت بیشتر	۴
۵	ارجحیت خیلی بیشتر	(۰/۱، ۱، ۱)	(۱، ۰، ۱)	ارجحیت خیلی بیشتر	۵
۶	ارجحیت مطلقاً بیشتر	(۰، ۱، ۱)	(۱، ۱، ۰)	ارجحیت مطلقاً بیشتر	۶

۲-۲-۴- محاسبه وزن نهایی عناصر مسئله

پس از تجمیع نظرات پرسشنامه تمامی خبرگان در ماتریسی واحد، محاسبه وزن نسبی و اولویت‌بندی انجام می‌شود. در ماتریس تجمیع نظرات، مؤلفه اول هر درایه مقدار کمینه مؤلفه

پس از جمع‌آوری نتایج پرسشنامه‌های تحلیل سلسله مراتبی فازی از خبرگان، نوبت به انجام محاسبات و دستیابی به نتایج موردنظر می‌رسد. به‌همین دلیل، مراحل گام سوم انجام می‌شود. این مراحل توسط نرم‌افزار MATLAB به صورت برنامه‌نویسی شده انجام می‌شود.

هم‌چنین، برای به‌دست آوردن $\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1}$ با اعمال عملگر جمع فازی، رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right)^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n u'_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m'_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l'_i} \right) \quad (3)$$

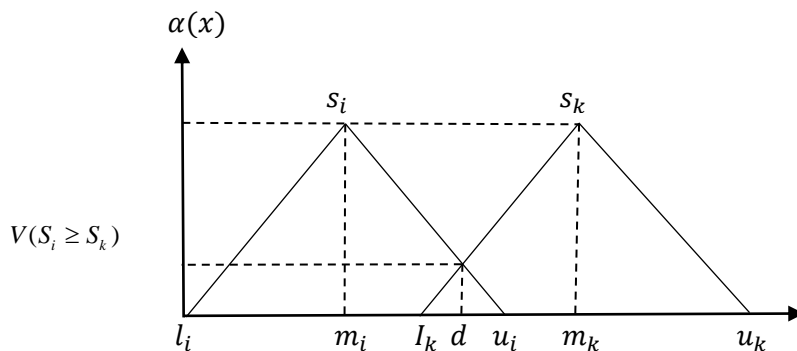
مرحله ۲: محاسبه درجه ارجحیت (درجه امکان‌پذیری) S_i بر S_k . چنان‌چه $S_i = (l_i, m_i, u_i)$ و $S_k = (l_k, m_k, u_k)$ باشد، آن‌گاه درجه ارجحیت S_i بر S_k که با $V(S_i \geq S_k)$ نمایش داده می‌شود، به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$V(S_i \geq S_k) = \mathop{\text{SUP}}_{x \geq y} (\min \{ \alpha_{S_i}(x), \alpha_{S_k}(y) \}) \quad (4)$$

که برای اعداد فازی مثلثی معادل با رابطه (۵) است.

$$V(S_i \geq S_k) = \alpha_S(d) = \begin{cases} 1 & \text{if } m_i \geq m_k \\ 0 & \text{if } l_k \geq u_i \\ \frac{l_k - u_i}{(m_i - u_i) - (m_k - l_k)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

که d : متناظر با بزرگ‌ترین نقطه تقاطع بین α_{S_i} و α_{S_k} است. شکل ۳ درجه بزرگی دو عدد فازی نسبت به هم را نشان می‌دهد.



شکل ۳- درجه بزرگی دو عدد فازی نسبت به هم

چنان‌چه رابطه (۷) فرض شود،

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k) \quad \text{for } (k = 1, 2, \dots, n, k \neq i) \quad (7)$$

آن‌گاه بردار وزن به‌صورت رابطه (۸) به‌دست می‌آید:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n)) \quad (8)$$

اول همه کارشناسان، مولفه دوم، میانگین مؤلفه‌های دوم ماتریس‌های متناظر همه کارشناسان و مؤلفه سوم، حداکثر مؤلفه‌های سوم درایه ماتریس مقایسات زوجی همه خبرگان است. سپس در این مرحله از روش آنالیز توسعه چانگ استفاده می‌شود (مومنی، ۱۳۸۵؛ Dağdeviren and Yüksel, 2008؛ گرامی، ۱۳۹۹). این روش به‌شرح زیر است:

مرحله ۱: به‌دست آوردن بسط مرکب فازی برای هر هدف. اگر $M_{gi}^1, M_{gi}^2, \dots, M_{gi}^m$ مقادیر آنالیز توسعه نامین هدف به‌ازای m آرمان باشد، آن‌گاه بسط مرکب فازی m آرمان برای نامین هدف به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \quad (1)$$

چنان‌چه $M_{gi}^j = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ باشد، آن‌گاه $\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ به‌وسیله عملکرد جمع فازی روی آنالیز توسعه m آرمان به‌صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^j M_{gi}^j &= (l_{i1}, m_{i1}, u_{i1}) \oplus \dots \oplus (l_{im}, m_{im}, u_{im}) \\ &= \left(\sum_{j=1}^m l_{ij}, \sum_{j=1}^m m_{ij}, \sum_{j=1}^m u_{ij} \right) \\ &= (l'_i, m'_i, u'_i) \end{aligned} \quad (2)$$

مرحله ۳: محاسبه درجه ارجحیت (درجه امکان‌پذیری) یک عدد فازی محذب S که بزرگ‌تر از k عدد فازی محذب $i = 1, 2, \dots, k$ باشد، به‌صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} V(S \geq S_1, S_2, \dots, S_k) &= (V((S \geq S_1), (S \geq S_2), \dots, (S \geq S_k))) \\ &= \min(V((S \geq S_1), (S \geq S_2), \dots, (S \geq S_k))) = \min V(S \geq S_i) \end{aligned} \quad (6)$$

$i = 1, 2, \dots, k$

گام اول: اگر $A_i = (l_i, m_i, u_i)$ یک عدد فازی مربوط به خط کش مقیاس باشد و هر ماتریس تصمیم‌گیری مجموعه‌ای از اعداد فازی این خط کش مقیاس باشد که خبره از آن‌ها برای امتیازدهی استفاده کرده است، آن‌گاه به صورت روابط (۱۰) و (۱۱) به دو قسمت تقسیم می‌شود.

$$A_{im} = (m_i) \quad (10)$$

$$A_{ig} = \sqrt{(l_i \otimes u_i)} \quad (11)$$

مقدار میانگین هندسی
حدود بالا و پایین مقیاس فازی مثلثی است

با توجه به تقسیم صورت‌گرفته بر مقیاس فازی مثلثی، هر یک از ماتریس‌های مقایسه زوجی نیز به دو قسمت تقسیم می‌شود که محاسبات رابطه (۱۲) بر روی هر یک از آن‌ها به تفکیک باید صورت بگیرد.

$$\begin{pmatrix} A_{i1}^1 & A_{i1}^2 & \dots & A_{i1}^m \\ A_{i2}^1 & A_{i2}^2 & \dots & A_{i2}^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{in}^1 & A_{in}^2 & \dots & A_{in}^m \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} A_{ig1}^1 & A_{ig1}^2 & \dots & A_{ig1}^m \\ A_{ig2}^1 & A_{ig2}^2 & \dots & A_{ig2}^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{ign}^1 & A_{ign}^2 & \dots & A_{ign}^m \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} A_{im1}^1 & A_{im1}^2 & \dots & A_{im1}^m \\ A_{im2}^1 & A_{im2}^2 & \dots & A_{im2}^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{imn}^1 & A_{imn}^2 & \dots & A_{imn}^m \end{pmatrix}$$

گام دوم (محاسبه بردار وزن هر ماتریس): ابتدا مجموع درایه‌های هر سطر از ماتریس مقایسه زوجی تفکیک‌شده را به دست آورده و هر یک از مقادیر مجموع به دست آمده بر مجموع درایه‌های ستون مربوط به جمع سطرهای ماتریس مقایسات زوجی تقسیم می‌شود تا وزن نسبی نرمال شده هر یک از معیارها بر اساس رابطه (۱۳) به دست آید (روش مجموع سطری).

$$W_{ig}^j = \frac{\sum_{j=1}^m A_{ig}^j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{gi}^j} \quad (13)$$

$$W_{im}^j = \frac{\sum_{j=1}^m A_{im}^j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{im}^j}$$

قابل ذکر است که وزن‌های به دست آمده، غیرفازی هستند.

مرحله ۴: نرمالیزه کردن بردار W' و به دست آوردن وزن نرمالیزه شده W بر اساس رابطه (۹).

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n)) \quad (9)$$

مرحله ۵: محاسبه وزن نهایی و اولویت هر یک از عناصر

پس از محاسبه وزن نسبی عناصر هر سطح در هر یک از ماتریس‌های مقایسات زوجی نسبت به عنصری در سطح بالاتر خود، وزن‌های به دست آمده در ماتریسی تحت‌عنوان ماتریس تصمیم‌گیری تجمیع می‌شود. سطرهای این ماتریس را عناصر هر سطح و ستون‌های آن‌ها را عناصر سطح بالاتر تشکیل می‌دهد که در واقع وزن آن‌ها را نسبت به یکدیگر نمایش می‌دهد. در این مرحله کافی است تا ضرب ماتریسی ماتریس‌های تصمیم‌گیری به ترتیب درخت سلسه مراتبی ترسیم‌شده، در یک دیگر انجام شوند تا اولویت نهایی گزینه‌ها به دست آید. یعنی در ابتدا ماتریس تصمیم معیارها در ماتریس تصمیم زیرمعیارها ضرب می‌شود تا وزن نهایی زیرمعیارها به دست آید. سپس ماتریس تصمیم‌گیری آلترناتیوها در ماتریس وزن نهایی زیرمعیارها ضرب می‌شود تا این نتایج سلسه‌وار به دست آید.

اگر موضوع مورد تصمیم‌گیری با پرسشنامه‌ای با در نظر گرفتن شرایط مشابه حقیقی مورد سنجش قرار گیرد، زمانی نتایج قابل اطمینانی به دست می‌آید که دو اصل در آن در نظر گرفته شود. اصل اول پایایی است که بیانگر حصول به یک نتیجه به صورت مکرر است. اصل دوم روایی است که به اندازه‌گیری دقیق موضوع و ویژگی‌های مورد بحث بیانجامد. تجربه انجام تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره به روش سلسله مراتبی این نکته را اثبات کرده که به شاخصی برای اعتبارسنجی قضاوت‌های صورت گرفته توسط خبرگان نیاز است تا بتوان این دو اصل را در این پژوهش رعایت کرد. به همین منظور، عبارتی تحت عنوان نرخ ناسازگاری مطرح می‌شود که بیانگر میزان اعتبار و صحت داده‌های گردآوری شده از دیدگاه هر کارشناس است. مفهوم این نرخ به زبان ساده‌تر آن است که اگر معیار A اولویت بالاتری نسبت به معیار B و هم‌چنین معیار B اولویت بالاتری نسبت به معیار C داشته باشد، آن‌گاه قضاوت کارشناس سازگار خواهد بود، اگر معیار A از معیار C اولویت بالاتری داشته باشد. به دلیل آن‌که در این پژوهش از روش تحلیل سلسه مراتبی با دیدگاه فازی استفاده شده است، برای محاسبه نرخ ناسازگاری از روش ارائه شده توسط Saaty and Vargas (1991) استفاده می‌شود. این روش از الگوریتم زیر پیروی می‌کند.

$$\rightarrow \lambda_{im}^j = \frac{WSV_{im}^j}{W_{im}^j} \rightarrow \lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{im}^j}{n} \quad (17)$$

گام چهارم (شاخص ناسازگاری): با استفاده از فرمول (۱۸) و مقدار ویژه به دست آمده در گام قبل این شاخص محاسبه می‌شود که در آن n تعداد معیارهای یک ماتریس است.

$$CI_g = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad CI_m = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (18)$$

گام پنجم (نرخ ناسازگاری): با توجه به جدول ۳ مقادیر شاخص ناسازگاری تصادفی به تفکیک مقادیر میانی و هندسی و با توجه به تعداد معیارهای ماتریس از رابطه (۱۹) استفاده می‌شود.

$$CR_g = \frac{CI_g}{RI_g} \quad CR_m = \frac{CI_m}{RI_m} \quad (19)$$

اگر نرخ ناسازگاری به دست آمده کمتر از ۰/۱ باشد ($CR \leq 0.1$)، قضاوت‌های کارشناس سازگار بوده و نتایج حاصل از ماتریس مذکور قابل استناد و اعتماد است.

گام سوم (بردار ویژه): در این گام ماتریس مقایسه زوجی تفکیک شده در ماتریس وزن نسبی به دست آمده معیارها ضرب می‌شود. از انجام این عملیات ماتریسی به دست می‌آید که با تقسیم نظیر به نظیر درایه‌های این ماتریس بر درایه‌های ماتریس وزن نسبی، مقدار ویژه برای هر یک از معیارها براساس روابط (۱۴) تا (۱۷) حاصل می‌شود که میانگین این مقادیر ویژه در گام بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$WSV_{ig}^j = \begin{pmatrix} A_{ig1}^1 & A_{ig1}^2 & \dots & A_{ig1}^m \\ A_{ig2}^1 & A_{ig2}^2 & \dots & A_{ig2}^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{ign}^1 & A_{ign}^2 & \dots & A_{ign}^m \end{pmatrix} \otimes (W_{ig}^j) \quad (14)$$

$$\rightarrow \lambda_{ig}^j = \frac{WSV_{ig}^j}{W_{ig}^j} \rightarrow \lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{ig}^j}{n} \quad (15)$$

$$WSV_{im}^j = \begin{pmatrix} A_{im1}^1 & A_{im1}^2 & \dots & A_{im1}^m \\ A_{im2}^1 & A_{im2}^2 & \dots & A_{im2}^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{imn}^1 & A_{imn}^2 & \dots & A_{imn}^m \end{pmatrix} \otimes (W_{im}^j) \quad (16)$$

جدول ۳ - مقادیر شاخص ناسازگاری تصادفی هندسی و میانی

n	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
RI_m	۰	۰	۰/۴۸۹	۰/۹۷۳۷	۰/۰۷۲	۰/۱۹۹۶	۰/۲۸۷۴	۰/۳۴۱	۰/۳۷۹۳
RI_g	۰	۰	۰/۱۷۹۶	۰/۲۶۲۷	۰/۳۵۹۷	۰/۳۸۱۸	۰/۴۰۹	۰/۴۱۶۴	۰/۴۳۴۸

می‌دهد. از برآیند این وزن‌ها با وزن نرمال شده گزینه‌ها در مقایسه با هریک از زیرمعیارهای محیط‌زیستی که نتایج آن در جدول‌های ۸ تا ۱۱ درج شده، باعث دست‌یابی به هدف پژوهش و اولویت‌بندی نهایی مسئله می‌شوند. نتایج نهایی در جدول‌های ۱۲ تا ۱۴ ذکر شده‌اند. همان‌طور که از جدول ۱۴ مشخص است نگهداری و تعمیرات کنش‌گرایانه به‌عنوان موثرترین رویکرد نگهداری و تعمیرات پایدار برای دارایی‌های فیزیکی و تجهیزات معرفی می‌شود. در پایان نیز به‌منظور اطمینان از قضاوت کارشناسان، نرخ ناسازگاری اولویت‌بندی آنان محاسبه و در جدول ۱۵ درج شده که بیانگر صحت قضاوت آنان است.

۴-۳- نتایج ماتریس‌های مقایسات زوجی

پس از جمع‌بندی نظر کارشناسان در ماتریس مقایسات زوجی واحد، محاسبات وزن هر یک از معیارها و اولویت‌بندی هر یک از استراتژی‌ها صورت می‌پذیرد. از سویی دیگر با انجام محاسبات در نرم‌افزار اکسل، نرخ ناسازگاری هر یک از ماتریس‌ها محاسبه شده و تمامی آن‌ها کمتر از ۰/۱ هستند. این موضوع نشان از سازگاری و اعتبار نظر خبرگان دارد. لذا با اطمینان از اعتبار پرسشنامه‌ها، اوزان نهایی عناصر مسئله محاسبه می‌شود. در این راستا از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. جدول‌های ۴ تا ۷ وزن نرمال هریک از زیرمعیارها نسبت به معیارهای سطح بالاتر خود را نشان

جدول ۴ - اولویت زیرمعیارها نسبت به معیار احتمال شکست قطعات

زیرمعیار	W'	نرمال شده
تأثیر بالقوه بر تغییر آب‌وهوای محیط اطراف	۰/۸۳۸	۰/۱۸۴
میزان انتشار آلاینده‌ها بر اثر خرابی	۰/۸۵۷	۰/۱۸۸
درصد ضایعات تولیدی بر اثر خرابی	۰/۹۶۲	۰/۲۱۲
میزان هدررفت سوخت و انرژی	۱/۰۰۰	۰/۲۲۰
میزان انتشار فاضلاب در اثر نشت تأسیسات	۰/۸۹۰	۰/۱۹۶

جدول ۵- اولویت زیرمعیارها نسبت به معیار مدت زمان عیب‌یابی

نرمال شده	W'	زیرمعیار
۰/۲۰۱	۰/۹۴۷	تأثیر بالقوه بر تغییر آب‌وهوای محیط اطراف
۰/۲۰۲	۰/۹۴۹	میزان انتشار آلاینده‌ها بر اثر خرابی
۰/۲۱۲	۱/۰۰۰	درصد ضایعات تولیدی بر اثر خرابی
۰/۱۹۶	۰/۹۲۳	میزان هدررفت سوخت و انرژی
۰/۱۸۹	۰/۸۸۹	میزان انتشار فاضلاب در اثر نشت تأسیسات

جدول ۶- اولویت زیرمعیارها نسبت به معیار پشتیبانی انبار لوازم یدکی

نرمال شده	W'	زیرمعیار
۰/۱۷۵	۰/۷۷۷	تأثیر بالقوه بر تغییر آب و هوای محیط اطراف
۰/۱۷۷	۰/۷۹۰	میزان انتشار آلاینده‌ها بر اثر خرابی
۰/۲۱۲	۰/۹۴۵	درصد ضایعات تولیدی بر اثر خرابی
۰/۲۱۱	۰/۹۳۸	میزان هدررفت سوخت و انرژی
۰/۲۲۵	۱/۰۰۰	میزان انتشار فاضلاب در اثر نشت تأسیسات

جدول ۷- اولویت زیرمعیارها نسبت به معیار متوسط زمان برای تعمیر

نرمال شده	W'	زیرمعیار
۰/۱۸۱	۰/۸۴۵	تأثیر بالقوه بر تغییر آب و هوای محیط اطراف
۰/۱۹۷	۰/۹۲۸	میزان انتشار آلاینده‌ها بر اثر خرابی
۰/۲۱۲	۱/۰۰۰	درصد ضایعات تولیدی بر اثر خرابی
۰/۲۰۱	۰/۹۴۹	میزان هدررفت سوخت و انرژی
۰/۲۰۹	۰/۹۸۳	میزان انتشار فاضلاب در اثر نشت تأسیسات

جدول ۸- اولویت زیرمعیارها نسبت به زیرمعیار تأثیر بالقوه بر تغییر آب و هوای محیط اطراف

نرمال شده	W'	گزینه
۰/۲۶۴	۱/۰۰۰	نگهداری و تعمیرات کنش‌گرایانه (PAM)
۰/۲۶۴	۰/۹۹۸	نگهداری و تعمیرات اصلاحی (CM)
۰/۲۱۶	۰/۸۱۹	نگهداری و تعمیرات اضطراری (EM)
۰/۲۵۵	۰/۹۶۵	نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM)

جدول ۹- اولویت زیرمعیارها نسبت به زیرمعیار میزان انتشار آلاینده‌ها بر اثر خرابی

نرمال شده	W'	گزینه
۰/۲۶۸	۱/۰۰۰	نگهداری و تعمیرات کنش‌گرایانه (PAM)
۰/۲۴۴	۰/۹۰۹	نگهداری و تعمیرات اصلاحی (CM)
۰/۲۳۲	۰/۸۶۶	نگهداری و تعمیرات اضطراری (EM)
۰/۲۵۵	۰/۹۵۱	نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM)

جدول ۱۰- اولویت زیرمعیارها نسبت به زیرمعیار درصد ضایعات تولیدی بر اثر خرابی

نرمال شده	W'	گزینه
۰/۲۶۷	۰/۹۰۶	نگهداری و تعمیرات کنش‌گرایانه (PAM)
۰/۲۶۰	۰/۸۸۴	نگهداری و تعمیرات اصلاحی (CM)
۰/۱۷۹	۰/۶۰۸	نگهداری و تعمیرات اضطراری (EM)
۰/۲۹۴	۱/۰۰۰	نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM)

جدول ۱۱- اولویت زیرمعیارها نسبت به زیرمعیار میزان هدررفت سوخت و انرژی

گزینه	W'	نرمال شده
نگهداری و تعمیرات کنش‌گرایانه (PAM)	۱/۰۰۰	۰/۲۷۷
نگهداری و تعمیرات اصلاحی (CM)	۰/۸۷۸	۰/۲۴۳
نگهداری و تعمیرات اضطراری (EM)	۰/۸۲۶	۰/۲۲۹
نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM)	۰/۹۰۸	۰/۲۵۱

جدول ۱۲- اولویت‌بندی نهایی معیارها نسبت به هدف مطالعه

انتخاب استراتژی نگهداری و تعمیرات برای دستیابی به تولید سبز	W'	نرمال شده
احتمال شکست قطعات تجهیز	۱/۰۰۰	۰/۲۸۹
مدت زمان عیب‌یابی	۰/۲۴۵	۰/۲۴۵
پشتیبانی انبار لوازم یدکی	۰/۲۱۷	۰/۲۱۷
متوسط زمان برای تعمیر	۰/۲۴۹	۰/۲۴۹

جدول ۱۳- اولویت‌بندی نهایی زیرمعیارها نسبت به هدف مطالعه

تأثیر بالقوه بر تغییر آب و هوای محیط اطراف	۰/۱۸۶
میزان انتشار آلاینده‌ها بر اثر خرابی	۰/۱۹۱
درصد ضایعات تولیدی بر اثر خرابی	۰/۲۱۲
میزان هدررفت سوخت و انرژی	۰/۲۰۷
میزان انتشار فاضلاب در اثر نشت تأسیسات	۰/۲۰۴

جدول ۱۴- اولویت‌بندی نهایی گزینه‌ها نسبت به هدف مطالعه

نگهداری و تعمیرات کنش‌گرایانه (PAM)	۰/۲۷۱
نگهداری و تعمیرات اصلاحی (CM)	۰/۲۵۱
نگهداری و تعمیرات اضطراری (EM)	۰/۲۱۷
نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM)	۰/۲۶۲

جدول ۱۵- نرخ ناسازگاری ماتریس مقایسات زوجی چهار کارشناس قضاوت‌کننده

زیرمعیار	کارشناس اول		کارشناس دوم		کارشناس سوم		کارشناس چهارم	
	ماتریس مینانی	ماتریس هندسی	ماتریس مینانی	ماتریس هندسی	ماتریس مینانی	ماتریس هندسی	ماتریس مینانی	ماتریس هندسی
احتمال شکست قطعات	۰/۰۰۹	۰/۰۵۰	۰/۰۱۷	۰/۰۸۸	۰/۰۰۳	۰/۰۲۷	۰/۰۳۹	۰/۰۹۹
مدت زمان عیب‌یابی	۰/۰۰۶	۰/۰۱۳	۰/۰۲۲	۰/۰۹۲	۰/۰۰۶	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۷۴
پشتیبانی انبار لوازم یدکی	۰/۰۱۱	۰/۰۴۶	۰/۰۰۳	۰/۰۱۵	۰/۰۸۳	۰/۰۴۷	۰/۰۱۳	۰/۰۶۵
متوسط زمان برای تغییرات	۰/۰۱۱	۰/۰۶۵	۰/۰۳۷	۰/۰۷۹	۰/۰۱۰	۰/۲۰۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱
تأثیر بالقوه بر تغییر آب و هوای محیط اطراف	۰/۰۱۱	۰/۰۲۶	۰/۰۰۸	۰/۰۶۱	۰/۰۱۰	۰/۰۲۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۳
میزان انتشار آلاینده‌ها بر اثر خرابی	۰/۰۰۷	۰/۰۳۵	۰/۰۱۳	۰/۰۷۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۰۲۷
درصد ضایعات تولیدی بر اثر خرابی	۰/۰۰۸	۰/۰۱۶	۰/۰۰۹	۰/۰۱۰	۰/۰۱۲	۰/۰۴۱	۰/۰۰۵	۰/۰۳۹
میزان هدررفت سوخت و انرژی	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۱۰	۰/۰۵۸	۰/۰۱۴	۰/۰۲۵	۰/۰۰۵	۰/۰۳۲
میزان انتشار فاضلاب در اثر نشت تأسیسات	۰/۰۲۶	۰/۰۸۰	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۲۱	۰/۰۵۳	۰/۰۲۶	۰/۰۷۹
انتخاب استراتژی نگهداری و تعمیرات برای دستیابی به تولید سبز	۰/۰۱۱	۰/۰۷۴	۰/۰۰۸	۰/۰۴۹	۰/۰۰۷	۰/۰۵۱	۰/۰۰۹	۰/۰۶۸

اعداد به دست آمده جدول ۱۵ بیانگر سازگاری قضاوت‌های هر چهار کارشناس در امتیازدهی خود است.

۵- تحلیل نتایج

محاسبات صورت گرفته برای حصول وزن نسبی در سطح معیارها نسبت به هدف تولید سبز، بیانگر این موضوع است که معیار احتمال شکست قطعات دارای بالاترین ارجحیت نسبت به دیگر معیارها است. علت این موضوع به زعم اکثریت خبرگان می‌تواند به منظور جلوگیری از توقفات برنامه‌ریزی نشده باشد که با اقداماتی نظیر پایش عملکرد تجهیز به صورت منظم می‌توان از خرابی دستگاه به صورت ناگهانی پیشگیری کرد و تبعات محیط‌زیستی ناشی از آن را به حداقل رساند. اما در صورت خرابی معیاری که بیشترین امتیاز را پس از احتمال شکست قطعات به خود اختصاص داده است، متوسط زمان برای تعمیر است. لذا هر قدر این مدت زمان بیشتر شود، پیامدهای عدم کارکرد تجهیز در سطح استاندارد بیشتر شده و تبعات بیشتری را به زیست‌بوم متحمل می‌شود. هم‌چنین مدت زمان عیب‌یابی با اختلاف وزنی ناچیز در رتبه بعدی قرار می‌گیرد که دلیل این اختلاف نیز نزدیکی معیارهای مذکور به یکدیگر و ارتباط مستقیم مشهود گذر زمان با میزان صدمات محیط‌زیستی است. اما آخرین معیار اولویت‌بندی این سطح، پشتیبانی انبار لوازم یدکی است که بسته به نوع راهبرد انتخابی نقطه سفارش و کنترل موجودی در آن متفاوت است. این معیار نیز همانند دو معیار دیگر زمان را مدنظر قرار می‌دهد. یعنی هر قدر پشتیبانی در سطح بالاتری صورت بگیرد، کمبود و صدمات پس از خرابی کاهش می‌یابد. باید توجه شود این معیار فقط از جنبه محیط‌زیستی مورد ارزیابی قرار گرفته و نقطه سفارش‌دهی و بررسی‌های اقتصادی انبارش لوازم یدکی در نظر گرفته نشده است.

سطح بعدی درخت سلسه مراتبی متشکل از زیرمعیارهای محیط‌زیستی است که با بیشترین وزن نهایی زیرمعیار درصد ضایعات تولیدی بر اثر خرابی در اولویت نخست قرار می‌گیرد. این پیامد ناشی از خرابی علاوه بر ضربه اقتصادی که بر سازمان وارد می‌شود، پیامدهای سوئی برای محیط‌زیست دارد. به خصوص زمانی این پیامدها برجسته‌تر به نظر می‌رسند که ضایعات قابل بازیافت نبوده و باید در محیط طبیعت منهدم شوند؛ ضایعاتی که حتی دفن آن‌ها نیز می‌تواند تأثیر خود را بر سلامت زیست‌بوم بگذارد. از سوی دیگر نیز اتلاف مواد اولیه‌ای را به همراه خواهد داشت که این هدررفت موجب نزدیکی به زیرمعیار میزان هدررفت

سوخت و انرژی در اثر خرابی در اولویت بعدی می‌شود که علت این اهمیت، افزایش سرعت زوال منابع است. زیرا اگر یک تجهیز در اثر خرابی دچار مصرف بیش از حد استاندارد طراحی خود شود، می‌تواند برنامه‌ریزی‌های اقتصادی و معیشتی سازمان و حتی دولت را در رفع نیازهای آینده به چالش بکشد. همان‌گونه که بیان شد، ضایعات ناشی از خرابی حتی در صورت دفن نیز می‌تواند خطرناک باشد اما اگر این مواد زائد بی‌هیچ پروتکل بهداشتی وارد طبیعت شوند، آسیب‌های جبران‌ناپذیری را به زیست‌بوم وارد می‌کنند. به همین منظور نیز زیرمعیار میزان انتشار فاضلاب در اثر نشت تأسیسات در اولویت سوم به چشم می‌خورد. اولویتی که علاوه بر فاضلاب می‌تواند مواد سمی دیگر را نیز شامل شود، به خصوص در صنایع خطرآفرینی هم‌چون پتروشیمی که اگر تمهیدات لازم برای انتقال این مواد و در صورت اتخاذ تمهیدات، راه‌کارهایی برای مقابله با نقص آن‌ها در نظر گرفته نشود، حتی به برهم‌زدن چرخه طبیعت نیز منجر می‌شود. علاوه بر تأسیسات که عدم توجه به آن منجر به آلوده‌شدن محیط می‌شود، خرابی تجهیزات تولیدی نیز آلودگی‌های مختلفی را به دنبال دارد، همانند آزادکردن گازهای سمی ناشی از سوخت ناقص، به دلیل ضعف عملکردی و یا آلودگی صوتی ناشی از شکست قطعات و تعلل در روغن‌کاری و بازرسی‌های مرتب. اما زیرمعیاری که در اولویت آخر قرار گرفته است می‌تواند به دلیل ماهیت زمان‌بر بودن قابل شهود شدن نتایج حاصل از آن باشد. زیرا تغییرات آب و هوا همانند گرم شدن تدریجی و افزایش سطح آلاینده‌های هوا با گذشت زمان رخ می‌دهد و قضاوت در خصوص پیامدهای آن، کار را برای هر کارشناسی سخت می‌کند، اما نباید از آسیب‌های آن چشم‌پوشی کرد.

اولویت‌بندی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات منتخبی که در پرسشنامه مورد بررسی خبرگان قرار گرفته‌اند و پیاده‌سازی هر یک از آن‌ها می‌تواند میزانی از سازش را بین صنعت و محیط‌زیست ایجاد کند، به شرح زیر است:

نگهداری و تعمیرات کنش‌گرایانه به سبب ماهیت عیب‌یابی که دارد، پیش از بروز توقفات برنامه‌ریزی نشده درصدد رفع عیب برمی‌آید و احتمال شکست قطعات را به طرز چشم‌گیری کاهش می‌دهد. این عیب‌یابی با تمرکز بر بررسی منظم تجهیز و ثبت اطلاعات کنترلی توسط تکنسین و یا نیروی اپراتور آموزش‌دیده انجام شده که این اقدام در نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه نیز به‌نوعی صورت می‌گیرد. اما عاملی که باعث برتری نگهداری و تعمیرات کنش‌گرایانه نسبت به نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه شده است، پیشگیری از فرسایش است. فرسایشی که احتمال

تعمیرات در شرکت آب و فاضلاب"، کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، تهران، <https://civilica.com/doc/461496> ستوده مرام، ک.، (۱۳۹۸)، "ارزیابی و مدیریت ریسک ایمنی، بهداشت و زیست‌محیطی تصفیه‌خانه فاضلاب ارومیه با استفاده از روش FMEA"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، (۱)۴، ۲۳-۳۳.

شهرجردی، ر.، (۱۴۰۱)، "ارائه چارچوب در بررسی عملکرد سیستم‌های نگهداری و تعمیرات شرکت‌های آب و فاضلاب؛ مطالعه موردی: شرکت آب و فاضلاب استان البرز"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، (۴)۷، ۴۷-۵۹.

قدیمی فیروزآبادی، ع.، (۱۳۹۵)، "بررسی بازده، میزان انرژی مصرفی و کارایی مصرف آب در ایستگاه‌های پمپاژ برقی"، مهندسی آبیاری و آب ایران، (۲۵)۶، ۱-۱۴.

قنادی، م.، (۱۳۹۷)، "مدیریت محلی خدمات آب و فاضلاب، انتظارات و رویکردها"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، (۱)۳، ۵۸-۶۹.

کانونی، ا.، و منعم، م.، (۱۳۹۵)، "بهبودسازی تخصیص و برنامه‌ریزی تحویل آب در شبکه‌های آبیاری"، مجله آبیاری و زهکشی ایران، (۱)۱۰، ۱۲-۲۳.

گرامی، ج.، (۱۳۹۹)، "رتبه‌بندی ابعاد سروکوال با استفاده از تکنیک تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) در صنعت بانک‌داری خصوصی (مطالعه موردی: بانک‌های خصوصی استان فارس)"، پژوهش‌های نوین در ریاضی (علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی)، (۲۵)۶، ۲۳-۳۹.

مومنی، م.، (۱۳۸۵)، "مباحث نوین تحقیق در عملیات، دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، چاپ اول.

نامجو، م.، بلور، ب.، و قنادی، م.، (۱۳۸۹)، "شرکت‌های آب و فاضلاب در گام چهارم توسعه"، شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، تهران، ایران.

نوروزی، ر.، و قهرودی تالی، م.، (۱۳۹۸)، "بهبودبندی آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب شهری در مقابل مخاطرات طبیعی (مطالعه موردی: منطقه یک آبفا شهر تهران)"، برنامه‌ریزی منطقه‌ای، (۳۴)۹، ۱۴۹-۱۶۲.

Badia, F., Bracci, E., and Tallaki, M., (2020), "Quality and diffusion of social and sustainability reporting in Italian public utility companies", *Sustainability*, 12(11), 4525.

Dağdeviren, M., and Yüksel, İ., (2008), "Developing a fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP) model for behavior-based safety management", *Information sciences*, 178(6), 1717-1733.

Crespo Márquez, A., Moreu de León, P., Gómez

شکست و در نتیجه توقفات برنامه‌ریزی نشده را افزایش می‌دهد و پیامدهای محیط‌زیستی را به دنبال خواهد داشت. در اولویت سوم، نگهداری و تعمیرات اصلاحی قرار دارد که با ماهیت تعدیل و تغییردهنده خود عملکرد و طول عمر تجهیز را بهبود می‌بخشد، اما نقش زیادی را در کاهش خرابی ایفا نمی‌کند. در واقع مدت‌زمان عملکرد تجهیز در سطح مطلوب را افزایش می‌دهد، اما به طور مشهود قابلیت پیشگیرانه را نمایان نمی‌کند. استراتژی نگهداری و تعمیرات اضطراری نیز نقشی در پیشگیری توقفات ندارد و فقط در زمان خرابی وظیفه‌ای را به عهده خواهد داشت که تأثیر چندانی بر بهبود ارتباط میان طبیعت و صنعت ندارد.

برای ادامه این تحقیقات پیشنهادات زیر را می‌توان مورد بررسی قرار داد:

- از سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌توان برای دستیابی به نتیجه استفاده کرد.

- انجام پژوهش در فاز دوم به منظور ارزیابی علت‌های خرابی و ارزیابی روش‌های کنترل این علل در صنایع مختلف به‌ویژه سازمان‌های خدمت‌رسان.

- محاسبه کمی پارامترهای محیط‌زیستی در صورت پیاده‌سازی هر یک از استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات و پایش بهینگی روش با توجه به پارامترهای هزینه و زمان.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Preventive Maintenance
- 2- Corrective Maintenance
- 3- Condition-Based Maintenance
- 4- Risk Based Maintenance
- 5- Reliability Centered Maintenance
- 6- Time-Based Maintenance
- 7- Emergency Maintenance

۷- مراجع

بهزاد، م.، قاسمی، ع.، ابراهیمی، ع.، و روحانی بسطامی، ع.، (۱۳۸۵)، "نگهداری و تعمیرات پیشگویانه در ایستگاه‌های پمپاژ آب"، آب و فاضلاب، (۲)۱۷، ۱۰-۱۸.

حامد مزرعه، ب.، و رضانی، س.، (۱۴۰۱)، "ضرورت ایجاد چارچوبی برای نگهداشت ساختمان، ابنیه و تأسیسات"، دومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در علوم فنی و مهندسی، تهران.

حذار، ب.، خودچینی، ر.، حامد، ف.، و فرحبخش پور، م.، (۱۳۹۴)، "ارتباط بین سامانه اطلاعات مکانی (GIS) و نگهداری و

- Fernández, J.F., Parra Márquez, C., and López Campos, M., (2009), "The maintenance management framework: A practical view to maintenance management", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 15(2), 167-178, <https://doi.org/10.1108/13552510910961110>.
- Gackowicz, P., (2019), "General overview of maintenance strategies–concepts and approaches", *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 2(1), 126-139.
- Ge, Y., Xiao, M., Yang, Z.h., Zhang, L., Hu, Z., and Feng, D.m (2017), "An integrated logarithmic fuzzy preference programming-based methodology for optimum maintenance strategies selection", *Soft Computing*, 60, 591-601, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.07.021>.
- Horner, R.M.W., El-Haram, M.A., and Munns, A.K., (1997), "Building maintenance strategy: A new management approach", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 3(4), 273-280.
- Krishnasamy, L., Khan, F., and Haddara, M., (2005), "Development of a Risk-Based Maintenance (RBM) strategy for a power-generating plant", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18(2), 69-81.
- Le Gat, Y., and Eisenbeis, P., (2000), "Using maintenance records to forecast failures in water networks", *Urban Water*, 2(3), 173-181.
- Saaty, T.L., and Vargas, L.G., (1991), *Prediction, projection and forecasting*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 251 p, <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-015-7952-0>.
- Shafiee, M., and Sørensen, J.D., (2017), "Maintenance optimization and inspection planning of wind energy assets: Models, methods and strategies", *Reliability Engineering and System Safety*, 192, 105993, 1-19, <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.10.025>.
- Shin, J.H., and Jun, H.B., (2015), "On condition-based maintenance policy", *Journal of Computational Design and Engineering*, 2(2), 119-127, <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2014.12.006>.
- Siddiqui, A.W., and Ben-Daya, M., (2009), *Reliability centered maintenance*, Handbook of Maintenance Management and Engineering, (pp. 397-415), Springer, London, https://doi.org/10.1007/978-1-84882-472-0_16.



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



جناب آقای مهندس عباس شفیعی

مدیرعامل اسبق شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور

* لطفاً به صورت مختصر خود را معرفی نمایید.

- متولد سال ۱۳۳۸ در شهر دلیجان استان مرکزی هستم. دوره دبیرستان را در تهران گذرانده‌ام و در سال ۱۳۵۶ در رشته راه و ساختمان وارد دانشگاه شدم. هم‌زمان با شروع فعالیت در جهاد سازندگی از سال ۱۳۵۸، متعاقب رخداد دوره انقلاب فرهنگی و نهایتاً با تغییر رشته کارشناسی در رشته مهندسی عمران - آب در سال ۱۳۶۸ فارغ التحصیل شدم. در ادامه، کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی عمران (آب و فاضلاب) در سال ۱۳۷۶ از دانشگاه امیرکبیر اخذ نمودم.

* مختصری از فعالیت‌های حرفه‌ای خود در حوزه مرتبط با صنعت آب و فاضلاب ارائه نمایید.

- سابقه فعالیت این‌جانب در حوزه تخصصی صنعت آب حدود ۴۳ سال است. شروع فعالیت کاری این‌جانب از ابتدای انقلاب اسلامی، در جهاد سازندگی با مسئولیت کمیته آبرسانی جهاد سازندگی دلیجان بود. سپس مدیریت جهاد سازندگی بخش شراه اراک (شهرستان خنداب فعلی) و بنیان‌گذاری و مدیریت کمیته امور آب جهاد سازندگی استان مرکزی تا پایان سال ۱۳۶۹ را برعهده داشتم.

در سال ۱۳۷۰ با تشکیل شرکت‌های آب و فاضلاب، به‌عنوان بنیانگذار و مدیریت عاملی آبفای استان مرکزی وارد وزارت نیرو شدم. در سال‌های ۱۳۷۳-۱۳۷۶ بنابر تکلیف وزیر نیرو و معاون محترم وقت امور آب و فاضلاب وزارت نیرو به‌عنوان معاون برنامه‌ریزی و عضو هیئت مدیره شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور همکاری داشتم و در ادامه در سال‌های ۱۳۷۶-۱۳۸۰ ریاست هیئت مدیره و مدیرعاملی سازمان آب منطقه‌ای اصفهان

و چهارم‌حال و بختیاری را عهده‌دار بودم.

در ادامه فعالیت‌ها، بنابر اصرار و صلاح‌دید مقامات ارشد وزارت نیرو، از سال ۱۳۸۰ لغایت ۱۳۸۵ به‌عنوان معاون وزیر نیرو در امور آب و فاضلاب، رئیس هیئت مدیره و مدیرعامل شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، راهبری مجموعه بیش از ۷۵ شرکت آب و فاضلاب شهری و روستایی را در سطح کشور برعهده داشتم. در ۳ سال پایانی دوره خدمت دولتی (از سال ۱۳۸۵ لغایت ۱۳۸۸) مشاور وزیر نیرو بودم و پس از آن در سال ۱۳۸۹ بازنشسته شدم. در حال حاضر حدود ۱۴ سال است که در بخش خصوصی در مهندسی مشاور به‌طور اختصاصی صرفاً در زمینه فعالیت‌های آب و آبفا فعالیت دارم و هم‌زمان به‌عنوان کارشناس خبره و مشاور به‌طور پاره‌وقت با ارگان‌ها، نهادها و مجامع مختلف از جمله مرکز ملی مطالعات راهبردی کشاورزی و آب اتاق ایران، مرکز پژوهش‌های مجلس، مرکز الگوی اسلامی ایرانی پیشرفت، مرکز تحول و پیشرفت ریاست جمهوری، ستاد فناوری آب معاونت علمی فناوری ریاست جمهوری، شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت مهندسی آبفای کشور، سازمان برنامه و بودجه، فدراسیون صنعت آب و کارگروه‌های مختلف دیگر، عموماً در جلسات راهبردی و برنامه‌ریزی استراتژیک همکاری دارم.

علاوه بر این حسب الزامات شغلی و حرفه‌ای در طول مدت ۴۳ سال گذشته عضو کارگروه‌های مختلف در زمینه صنعت آب و فاضلاب بوده‌ام که به برخی از آن‌ها اشاره می‌نمایم: شورای برنامه‌ریزی و توسعه استان‌های مرکزی و اصفهان، هیئت امنای دانشگاه شهید عباسپور، موسسه تحقیقات آب و گنجینه آب کشور، عضو کارگروه‌های تخصصی بهداشت آب و فاضلاب، جهاد آبرسانی، تهیه و تدوین برنامه چشم‌انداز صنعت آب و فاضلاب، تهیه و تدوین برنامه‌های دوم تا ششم توسعه کشور، تهیه و تدوین طرح جامع آب کشور، شورای خصوصی‌سازی، عضو هیئت مدیره شرکت‌های سرمایه‌گذاری نیرو، صنایع آب و برق، مهندسی مشاور ری آب، مهندسی مشاور تلاشگران ژرف اندیش و شرکت ژنرال مکانیک در زمینه فعالیت‌های تحقیقاتی، پژوهشی، برنامه‌ریزی، مطالعاتی و اجرایی مرتبط با صنعت آب و فاضلاب بوده‌ام.

* با توجه به سوابق فعالیت طولانی شما در ساختار مدیریتی آب و فاضلاب کشور در چه زمینه‌هایی به‌نظر شما تحولات توسعه شکل گرفته، قابل قبول بوده و در چه زمینه‌هایی نیاز به اصلاحات برای حصول دستاوردهای بیشتر در این حوزه مورد نیاز است؟

- برای پاسخگویی به این سوال به‌نظرم باید سیمایی از وضعیت

آب و فاضلاب کشور را در یک دوره ۴۵-۵۰ ساله مرور کرد: با پیدایش شهر و شهرنشینی و کانون‌های جمعیتی و آبادی‌ها و روستاها، مسئله تامین آب سالم و بهداشتی و جمع‌آوری، تصفیه و دفع بهداشتی فاضلاب همواره به‌عنوان مشخصه‌ای مهم برای پیشرفت یک کشور و جوامع انسانی مطرح بوده است. با توجه به پایین بودن شاخص‌های دسترسی به آب سالم در اواخر دهه ۱۳۵۰ (درصد برخورداری آب روستایی کمتر از ۳۰ درصد و شهری حدود ۶۰ درصد) از یک‌طرف، محدودیت دسترسی به منابع آب سالم ناشی از اقلیم کشور به‌عنوان یک کشور کم‌آب و نیز معضلات عدیده‌ای از غفلت و فراموشی در جمع‌آوری و دفع بهداشتی فاضلاب و افزایش روزافزون جمعیت بعد از دهه ۱۳۶۰، همه و همه لازم بود که برای این موضوع فکر اساسی شود.

در دهه ۱۳۶۰ به سبب افزایش روزافزون جمعیت و تعداد شهرها، هم‌چنین معضلات ناشی از جنگ تحمیلی، در اکثر روستاها و در تعداد قابل‌توجهی از شهرهای بزرگ (علی‌رغم اقدامات بسیار موثر نهادها از جمله جهاد سازندگی در روستاها و شهرداری و سازمان‌های آب منطقه‌ای در شهرها) مشکلات آب شرب از لحاظ کمی و کیفی به آستانه مرحله بحرانی رسیده بود و موضوع جمع‌آوری فاضلاب نیز به فراموشی سپرده شده بود، به‌طوری که نارسائی‌ها به‌شرح ذیل در اواخر سال ۱۳۶۹ مشهود بود:

- ✓ نارسائی در تاسیسات تامین و انتقال و ذخیره آب شرب حدود ۲۵ درصد در شهرها و بیش از ۵۰ درصد در روستاها
- ✓ نارسائی در شبکه توزیع حدود ۴۰ درصد در شهرها و بیش از ۶۰ درصد در روستاها

هم‌چنین به‌دلیل فقدان منابع پایدار تامین آب شرب، شاخص‌های کیفی آب در اکثر موارد زیر نرم‌ها و شاخص‌های استاندارد کیفی بوده‌اند و کل تاسیسات آبی اعم از منابع و شبکه‌ها به‌شدت در معرض آلودگی بودند.

از نظر فقدان جمع‌آوری فاضلاب‌ها نیز شهرها و روستاهای بسیاری یا خود با مسائل و مشکلات محیط‌زیستی مواجه بوده و یا فاضلاب‌های خروجی از این مراکز، منابع حیاتی پایین‌دست (اعم از آب‌های سطحی و زیرزمینی) را دچار آلودگی می‌نمود. از طرفی به‌دلیل عدم رشد توسعه بخش انسانی و تربیت و پرورش نیروهای حرفه‌ای و تخصصی، نبود تکنولوژی و وابستگی شدید به صنایع و تولیدات و تجهیزات خارجی و نیز معضلات ناشی از مسائل اجتماعی و اقتصادی و مهم‌تر از همه، نبود نظامات و ارگان‌های مسئول یکپارچه و ضعف سازمانی متولیان آبرسانی، وضعیت سازماندهی صنعت آب و فاضلاب را با ابهامات فراوان

مواجه ساخته بود. به‌طوری‌که در طول یک دوره ۳۵ ساله (۱۵ سال قبل از انقلاب اسلامی و ۲۰ سال بعد از انقلاب اسلامی) موضوع ساماندهی یکپارچه و منجسم مدیریت صنعت آب و فاضلاب کشور بین دولت و مجلس و نهادهای مختلف دست به‌دست می‌شد.

در گذشته‌های دور اهالی شهرها و روستاها آب مورد نیاز خود را از رودها و نه‌رها، چشمه‌ها، قنات‌ها و چاه‌ها تامین می‌کردند، به‌رغم تلاش و کوشش فراوان بسیار و انباشت تجربه و دانش و شیوه‌های کار و موثری که تمدن ایرانی برای تامین و توزیع و مصرف آب مورد نیاز خود ابداع کرده بود، سایه سنگین کم‌آبی و کابوس خشک‌سالی و در حال حاضر نیز تغییرات اقلیم تاریخ ما را هرگز رها نکرده و نخواهد کرد.

در عصر جدید به‌ویژه از دهه ۱۳۴۰ به بعد که شهرنشینی همراه با نرخ رو به‌تزايد و آهنگی پرشتاب جمعیت گسترش یافت، به‌تدریج مسئله تامین، انتقال، تصفیه و توزیع و مصرف آب آشامیدنی به یکی از مسائل مهم جامعه تبدیل شد. تامین آب مورد نیاز مردم و ضرورت توزیع درست و بهداشتی آن، علاوه‌بر این که حجم بالایی از سرمایه‌گذاری درازمدت و کوتاه‌مدت را می‌طلبد، سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی و اجرای برنامه‌های متنوع در قالب یک ساختار پیچیده از مدیریت را نیز ایجاب می‌کند. در کنار این موضوع، مسئله مدیریت فاضلاب و دفع مواد زاید به‌دلیل ظهور انواع آلاینده‌ها یک مسئله اساسی و محوری است.

اولین بار در سال ۱۳۰۱ طرح احداث شبکه‌های لوله‌کشی آب شرب در شهرهای آبادان، مشهد و بیرجند شروع و متعاقب آن به‌تدریج در تعداد اندکی از شهرها ادامه یافت. شبکه آبرسانی تهران در سال ۱۳۲۴ شروع و در شهرها (به‌غیر از مراکز استان‌ها و شهرهای بزرگ) شهرداری‌ها کار آبرسانی را شروع نمودند. مسئولیت آبرسانی روستاهای (عموماً بالای ۱۵۰ خانوار) در قبل از انقلاب اسلامی به‌عهده وزارت بهداشت و درمان (خانه بهداشت) و پس از آن نیز بعد از انقلاب اسلامی مأموریت آبرسانی به کل روستاها به‌عهده جهاد سازندگی گذاشته شد.

با توجه به شرایط پیش‌گفته برای انسجام و هماهنگی و جبران عقب‌ماندگی ایجاد تاسیسات تامین و توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب و در کل، برای افزایش سطح برخورداری آحاد جامعه از شاخص‌های کمی و کیفی مناسب، پس از کش و قوس‌های چندین ساله و پیشنهاد و یا گنجاندن مفاد قانونی برای تعیین متولی یکپارچه صنعت آب و فاضلاب، نهایتاً ۲ قانون جداگانه برای مدیریت و ساماندهی آب و فاضلاب شهرها و روستاها از تصویب مجلس گذشت:

✓ قانون تشکیل شرکت‌های آب و فاضلاب شهری در دی‌ماه ۱۳۶۹ به‌عنوان زیرمجموعه و با مدیریت وزارت نیرو و شرکت مادر تخصصی مهندسی آب و فاضلاب کشور برای ارائه خدمات به جوامع شهری

✓ قانون تشکیل شرکت‌های آب و فاضلاب روستایی در آذرماه ۱۳۷۴ به‌عنوان زیرمجموعه و با مدیریت وزارت جهاد سازندگی برای ارائه خدمات جوامع روستایی با توجه به تجارب حاصل از عملکرد ۲ مجموعه شرکت‌ها و نیز تنیدگی بسیار زیاد مسائل تامین، انتقال و ذخیره آب شهرها و روستاها در اکثر نقاط کشور از یک‌طرف و نیز ادغام وظایف و ماموریت‌های ۲ وزارتخانه جهادسازندگی و کشاورزی و تشکیل وزارت جهاد کشاورزی، وظایف و ماموریت آب شرب و فاضلاب روستاها هم با همان ساختار شرکت‌های آب و فاضلاب روستایی، در سال ۱۳۸۱ به وزارت نیرو منتقل شد و تحت مجموعه شرکت مادر تخصصی مهندسی آب و فاضلاب قرار گرفت.

ضرورت برنامه‌ریزی جامع آینده‌نگر و درازمدت، اهمیت نظارت حرفه‌ای و تخصصی و چگونگی اجرا و بهره‌برداری تاسیسات و خدمات‌دهی، ارتباط آب و فاضلاب با بهداشت عمومی و محیط‌زیست، ضرورت ملاحظه ابعاد سیاسی و اجتماعی مقوله آب و محیط‌زیست، ارتباط تنگاتنگ آن با برنامه‌های کلان توسعه اقتصادی، اجتماعی، حساسیت‌های اجتماعی در مورد کیفیت و بهای آب شرب، دشواری آبرسانی به مناطق مختلف شهری و روستایی، کمبود منابع پایدار آب و نیز افزایش میزان وقوع آلودگی‌های فاضلاب، ساختار سازمانی و مدیریت آب و فاضلاب هوشمند و توانمندی را نیاز دارد.

از این‌رو، با تاسیس شرکت‌های فوق‌الذکر تحولات بسیار گسترده‌ای در دستور کار قرار گرفت که به‌ویژه در دهه اول فعالیت آن‌ها به‌طور چشمگیری روند این تحولات رصد و پیگیری می‌شد و منجر به دستاوردهای نسبی خوبی شد. این تحولات عبارتند از:

- آسیب‌شناسی، ارزیابی و مستندسازی وضع موجود و تدوین برنامه‌های اجرایی و عملیاتی کوتاه، میان و بلندمدت برای برون‌رفت از وضع موجود.

- استقرار شرکت‌های آب و فاضلاب با ساختاری بهره‌ور با تدوین مراحل از جمله: زمینه‌سازی مقدماتی (با مشارکت مقامات و مسئولین استانی و محلی)، سازماندهی و نظارت و حمایت ملی، تعریف و توسعه مفاهیم و شاخص‌های راهبردی، جذب و آموزش افراد حرفه‌ای و تخصصی، تدوین، توسعه و بهبود سیستم‌ها و روش‌های مدیریتی، اجرایی و ...
- تدوین اهداف استراتژیک و سیاست‌های راهبردی در سطح

ستادی و استانی، پایبندی به موارد کلیدی توانمندسازی نیروها و ساختارها و نیز تفویض اختیار به سطوح مختلف استانی و محلی (ایجاد واحدهای مستقل شهری)

- تعامل با نهادها، ارگان‌ها و مراکز مرتبط و موثر در حوزه ساماندهی صنعت به‌ویژه بهره‌گیری از ظرفیت‌های مراکز علمی، پژوهشی و تحقیقاتی و تجارب ملی و بین‌المللی.

- تعامل و فراهم‌نمودن زمینه حضور بخش خصوصی در فعالیت‌ها (به‌ویژه در زمینه ساخت داخل و نیز صدور خدمات مهندسی، فنی و تجهیزات) با مشارکت و سرمایه‌گذاری مشترک داخلی و خارجی در رسیدن به شاخص قابل‌توجه به درصد خوداتکایی داخلی

- تلاش و برنامه‌ریزی برای پرداختن به اقتصاد و مقوله تامین منابع مالی و عملیاتی نمودن برنامه‌های اجرایی با مساعدت و کمک موثر مالی دولت

- ساماندهی نسبی وضعیت تاسیسات تامین، انتقال، ذخیره و توزیع آب شرب و شروع زودهنگام فعالیت‌های جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب شهرهای مسئله‌دار محیط‌زیستی

- تعیین و تعریف شاخص‌ها و نرم‌های استاندارد برای سطح کمی و کیفی خدمات و تلاش برای سختگیرانه‌کردن استاندارد کیفی خدمات آب شرب و خروجی فاضلاب‌ها و پساب‌ها به‌همراه استقرار ساختارهای موردنیاز (مثلاً آزمایشگاه‌ها و استانداردهای معتبر)

- افزایش سطح شاخص بهره‌مندی آحاد جامعه از آب شرب به‌ویژه در شهرها (بالای ۹۹ درصد) و تلاش برای رساندن سطح شاخص بالای ۸۰ درصد آحاد جامعه روستایی به سطح شاخص شهروندان

- ظرفیت‌سازی، تقویت صنایع و تهیه و تدارک تجهیزات مورد نیاز، ایجاد واحدهای تحقیقاتی، تدوین استانداردهای ملی برخی از معضلات اساسی صنعت آب و فاضلاب به معضلات کشوری مربوط می‌شود:

- ✓ فقدان جایگاه بخش آب و فاضلاب در شکل‌گیری آمایش سرزمین و برنامه‌ریزی منطقه‌ای (در ایجاد و استقرار هر نوع مراکز جمعیتی، صنعتی و اقتصادی و موضوع نحوه تامین و انتقال آب و جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب بسیار حائز اهمیت است)

- ✓ حاشیه‌نشینی و تراکم جمعیت در کلان شهرها و نرخ روزافزون مهاجرت (برنامه‌ریزی برای مدیریت و ارائه خدمات را پیچیده‌تر کرده است)

- ✓ افزایش حجم پساب‌ها، پسماندها و آلودگی و تغییر نوع و

- شدت آلودگی‌ها که منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی را تحت‌الشعاع قرار داده است.
- ✓ اگرچه در موضوع اقتصاد، سرمایه‌گذاری و تامین مالی اقدامات خوبی صورت گرفته است، لیکن به دلیل حجم بالای سرمایه‌گذاری انجام شده و ضرورت بازسازی و نوسازی تاسیسات فرسوده و نیز روند افزایش جمعیت، لیکن هنوز جایگاه اقتصادی آب و توجه به بازگشت سرمایه، توسعه سرمایه‌گذاری عمومی، خصوصی، تبیین و تدوین شاخص‌های هزینه‌های خدمات آب و فاضلاب در سبد هزینه خانوار و محصولات تولیدی و خدماتی از جمله حلقه مفقوده‌ای در مدیریت این صنعت به‌شمار می‌آید.
 - ✓ کاهش پتانسیل منابع آب (سطحی و به‌ویژه زیرزمینی) ناشی از اضافه برداشت‌ها و تغییرات اقلیم برخی عدم توفیقات حداکثری که نیاز به تحول اساسی دارد عبارتند از:
 - ✓ مقوله مدیریت مصرف، اصلاح تدریجی الگوی مصرف، مدیریت تقاضا (با محوریت تاثیرگذاری در آمایش منطقه‌ای)، سوق دادن جمعیت و مراکز اقتصادی، صنعتی به سواحل جنوب کشور، پرداختی به مقوله بازتخصیص و بازچرخانی و استفاده چندباره از منابع آب و پساب
 - ✓ ایجاد یک سیاست متوازن بین دو دیدگاه سیاست موجود مبنی بر مدیریت عرضه هرچه بیشتر آب از یک‌طرف و تغییرجهت سریع و تکیه بر مدیریت تقاضا و مهار مصرف آب از طرف دیگر. در این رابطه به‌نظر می‌رسد ما نیاز به یک دوره انتقالی از مدیریت عرضه (برای جبران عقب‌افتادگی‌ها و استفاده از پتانسیل‌های در دسترس) به سمت مدیریت مصرف و بلافاصله پرداختی به مدیریت بازتخصیص با اولویت بخشی به تامین آب شرب نسبت به سایر مصارف داریم.
 - ✓ تاخیر در اجرای با اهمیت محیط‌زیستی فاضلاب شهرها به‌ویژه در روستاها و پایین‌بودن شاخص سطح برخورداری از این خدمات
 - ✓ تلاش بیشتر و منسجم‌تر برای افزایش شاخص کمی و کیفی بهره‌مندی آحاد روستایی و رساندن آن به شاخص شهری
 - ✓ تلاش بیشتر برای حفظ و تداوم کیفیت آب و جلوگیری از هر نوع آلودگی
 - ✓ تلاش برای بهره‌گیری هرچه بیشتر از تکنولوژی و فناوری‌های نوین (اصلاح و بازسازی و توسعه تاسیسات قدیم بر مبنای تکنولوژی‌های جدید) برای افزایش سطح کیفی خدمات
 - ✓ اصلاح نظامات و مقررات برای برخورد و جلوگیری از کلیه

- منابع آلوده‌کننده آب
- ✓ تحقق اصل خودکفایی و اداره اقتصادی و غیردولتی شرکت‌ها و واحدهای خدماتی آب و فاضلاب
 - ✓ اعمال بیشتر سیاست‌های خصوصی‌سازی‌ها و فراهم‌نمودن زمینه مشارکت هرچه بیشتر سرمایه‌گذاران، نظام و سازماندهی برون‌سپاری‌ها
 - ✓ جلوگیری از سنگین‌شدن و متراکم‌شدن نیروی انسانی در واحدهای خدماتی و توانمندسازی و ظرفیت‌سازی در سطح نیروی انسانی از طریق آموزش‌های مختلف
 - ✓ همکاری تنگاتنگ حداکثری با مراکز دانشگاهی و انجمن‌های پژوهشی، تحقیقاتی و تخصصی (مشاورین و پیمانکاران) در سطح داخلی و مجامع منطقه‌ای و بین‌المللی و همکاری با کشورهای دارای فناوری پیشرفته

*** به نظر شما آیا ساختار فعلی نهاد مدیریت آب و فاضلاب در کشور پاسخگوی نیازهای آتی و فردای این صنعت است؟ چه بخش‌هایی به نظر شما نیاز به اصلاح و بازنگری دارد؟**

- مبانی طرح تشکیل شرکت‌های آب و فاضلاب مصوب مجلس شورای اسلامی در دی‌ماه ۱۳۶۹ نتیجه ترکیب دو نظریه بود. به این معنی که شرکت‌های آب و فاضلاب از حمایت ستادی و نظارت دولت برخوردار شوند، اما هزینه مالی نامعقول ناشی از عدم کارایی خود را بر بودجه دولت تحمیل نکنند. ضرورت حمایت ستادی در مسئله‌ای که با حیات و رفاه عمومی جامعه، بهداشت و محیط‌زیست ارتباط مستقیم داشته و نیازمند برنامه‌ریزی کلان و تخصص بالا است و با مسائل حساس اجتماعی و سیاسی برخورد دارد و انکارناپذیر است، لیکن این امر نباید باعث کارایی و بهره‌وری این شرکت‌ها شود که باید به صورت غیردولتی و غیرمتمرکز اداره شوند.

در طرح تشکیل شرکت‌های آب و فاضلاب ستادی برای پشتیبانی فنی، تحقیقاتی، تدارکاتی و آموزش شرکت‌های زیرمجموعه در سطح ملی به نام شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور پیش‌بینی شده است. هم‌چنین در این طرح کلیه اشخاص حقیقی و حقوقی، بانک‌ها، شهرداری‌ها و موسسات عمومی غیردولتی می‌توانند در طرح‌ها، مشارکت و سرمایه‌گذاری نمایند و شرکت‌ها باید به‌عنوان یک بنگاه مستقل تجاری فعالیت نمایند. در سال ۱۳۷۴ شرکت‌های آب و فاضلاب روستایی تشکیل شدند و در تیرماه ۱۳۸۱ با مصوبه هیئت وزیران به شرکت‌های زیرمجموعه ستاد آب‌فای کشور ملحق شدند. در این سال به دلیل

در این ارتباط چندین بار اهداف استراتژیک، سیاست‌های راهبردی و برنامه‌های عملیاتی برای مدیریت صنعت در دهه اخیر تهیه شده است که به علت ضعف ساختاری، نتوانسته است این موارد به مرحله اجرا درآید.

عمده موارد کلیدی که باید برای توانمندی و پاسخگویی مدیریت آب و فاضلاب کشور مورد توجه قرار گیرد عبارتند از:

- ✓ ضرورت کوچک‌سازی ساختار تشکیلاتی صف و ستاد
- ✓ فراهم‌نمودن زمینه مشارکت حداکثری فعالین و کارآفرینان (محققین، پژوهشگران، مهندسين مشاور، سازندگان، سرمایه‌گذاران و نیز نمایندگان شوراهای) در برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌های آتی
- ✓ بهره‌گیری از ظرفیت‌های عمومی، خصوصی با ایجاد نظامات ساختاری موردنیاز مانند نظام تنظیم مقررات برای تسهیل‌گری و شفاف‌سازی فعالیت‌ها و کارآمدی واحدها با حضور حداکثری بخش غیردولتی
- ✓ تهیه و تدوین برنامه عمل چگونگی برون‌سپاری کلیه فعالیت‌ها و نیز بازنگری نقش نظارتی و تسهیل‌گری در این زمینه
- ✓ ضرورت تدوین ساختار فرایندی چگونگی تنظیم برنامه‌های عملیاتی و روابط اداری میان‌بخشی با سایر نهادها و ارگان‌ها از جمله ستاد وزارت نیرو، شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع آب، شهرداری‌ها، محیط‌زیست و حسب نوع وظایف و مأموریت‌ها
- ✓ ضرورت اصلاح ساختاری به‌منظور واگذاری امور اجرایی و تصدی‌گری به سایر فعالین غیردولتی و سوق‌دادن شرکت‌ها به سمت برنامه‌ریزی، تسهیل‌گری، تنظیم‌گری و نظارت بر استانداردهای کیفی و کمی خدمات

*** برای فعال‌تر برخورد کردن با چالش‌های امروز صنعت آب و فاضلاب کشور و اثرگذار بودن در این حوزه چه پیشنهادهای دارید؟**

- برای برون‌رفت از شرایط فعلی و حل معضلات بزرگ امروز صنعت آب و فاضلاب نیاز به ۳ گروه اعمال اصلاحات است:

الف- اصلاحات سیاستی و راهبردی

ب- اصلاحات ساختاری و نهادی

ج- اصلاحات مقرراتی و تنظیم‌گری

رئوس کلی و پیشنهادات ذیل می‌تواند به روند انجام اصلاحات فوق کمک نماید:

✓ تقویت مقوله اقتصاد آب از طریق نرم و شاخص‌های سهم

ضرورت، هیئت وزیران، با اصلاح و تصویب اساسنامه شرکت مادر تخصصی مهندسی آب و فاضلاب وظایف مهمی هم‌چون: ساماندهی و مدیریت آب و فاضلاب، نظارت و ارزیابی عملکرد و هدایت و راهبری و کارگزاری وزارت نیرو در صنعت آب و فاضلاب را به‌عهده شرکت مادر قرار دارد.

نقطه کلیدی دیگر در امر مدیریت شرکت‌ها، توجه به اداره‌کردن آن‌ها براساس نظام گردش منظومه‌ای مبنی بر استقلال حداکثری و خوداتکایی واحدهای شهری در انجام وظایف و مأموریت‌ها با مشارکت نهادها و ارگان‌های محلی از جمله شورای اسلامی شهرها و روستاها بود.

در کنار این موضوع، بهره‌گیری از ظرفیت‌های دیگر شرکت‌های زیرمجموعه وزارت نیرو یعنی شرکت‌های آب منطقه‌ای به‌عنوان تامین‌کننده و تخصیص‌دهنده اصلی منابع آب با اجرای خطوط انتقال و تصفیه‌خانه‌های بزرگ آب و نیز تعریف مجتمع‌های آبرسانی و روستایی، مجموعه صنعت توانست با ساماندهی و هدایت و بهره‌گیری از ظرفیت ساخت داخل بزرگترین طرح‌های آبرسانی و همچنین فاضلاب شهرها و روستاها را به اجرا در آورد که منجر به افزایش شاخص‌های برخورداری آحاد جامعه گشت.

با توجه به شرایط جدید در نظام اداری کشور و نیز مسائل مترتب بر مدیریت آب کشور و تنگناهای ایجاد شده ناشی از آسیب‌پذیری و افت کمی و کیفی منابع آب، تمرکز جمعیت در شهرهای بزرگ و خالی شدن سکنه قابل‌توجهی از روستاها (به‌دلیل شرایط معیشتی و اقتصادی)، لزوم اجرای طرح‌های بزرگ در زمینه‌های نوسازی، بازسازی و توسعه تاسیسات و نیز ضرورت مشارکت و سرمایه‌گذاری بخش‌های خصوصی و غیردولتی، ضرورت حضور نهادهای مردمی در اداره و راهبری شرکت‌ها و نیز الزامات قوانین بالادستی و تغییرات ایجاد شده در نظام ساختاری مدیریتی آب کشور (براساس حوضه‌ای) به‌نظر این‌جانب باید با گذشت ۳۰ سال تجربه و عبور از فراز و نشیب‌ها و با ارزیابی موفقیت‌ها و ناکامی‌ها یک‌بار دیگر به برخی معضلات ناشی از عدم توجه به اصول اولیه ساماندهی مدیریت آب و فاضلاب از جمله: سنگین شدن حجم بدنه و نیروهای غیرماهر شرکت‌ها، بروز برخی ناکارآمدی‌ها، وجود طرح‌های انباشته نیمه‌تمام، تداخل برخی وظایف به‌ویژه در سطح ستادی و دخالت در نظام بروکراسی در مجموعه صنعت، به‌سرعت باید با ارزیابی و تحلیل اساسی و آسیب‌شناسی، مدیریت صنعت آب و فاضلاب را در مسیر استراتژی‌ها و سیاست‌های تدوین شده (در اسناد بالادستی) قرارداد.

- ✓ هزینه آب در سبد هزینه خانوار و محصولات تولیدی و خدماتی و تامین منابع مالی با بهره‌گیری از بازارهای سرمایه و مالی
- ✓ اولویت بخشی به طرح‌های نیمه‌تمام و کوتاه‌کردن طول دوره اجرای طرح‌ها با بهره‌گیری از ظرفیت سرمایه‌گذاری و مشارکت عمومی، خصوصی (P.P.P)
- ✓ توجه به توسعه کیفی و ارتقای بهره‌برداری از تاسیسات آبی و جلوگیری از فرسودگی و زود مستهلک شدن آن‌ها با مشارکت بخش خصوصی با تاکید بر کاهش هدررفت
- ✓ توسعه صادرات خدمات فنی، مهندسی و ظرفیت‌سازی برای توسعه بازارهای صادراتی تجهیزات آب و فاضلاب
- ✓ توجه بیشتر به موضوع تصفیه فاضلاب‌ها و بازچرخانی و استفاده مجدد پساب‌های شهری و صنعتی و آزادسازی منابع متعارف تجدیدشونده برای تامین آب جدید جمعیت رو به افزایش در مناطق
- ✓ فراهم‌نمودن استفاده از ظرفیت و حضور حداکثری ذی‌نفعان و متخصصین حرفه‌ای (محققین، پژوهشگران، دانشگاهیان، فناوران و انجمن‌های حرفه‌ای، صنعتی و مدنی) در تصمیم‌سازی‌ها و برنامه‌ریزی‌های کلان صنعت آب
- ✓ ارتقای شاخص‌های کمی و کیفی خدمات (به‌ویژه شاخص‌های کیفی آب شرب و پساب خروجی)، افزایش شاخص‌های بهره‌مندی آحاد جامعه (به‌ویژه در زمینه آب شرب و جمع‌آوری فاضلاب روستایی)
- ✓ فراهم‌نمودن زمینه استقرار مراکز جمعیتی، صنعتی، تولیدی و خدماتی در سواحل جنوب و افزایش ظرفیت استحصال آب دریا و نمک‌زدایی (آمایش) و جلوگیری از بارگذاری بیشتر جمعیتی و صنعتی در کلان‌شهرها و مراکز استان‌ها
- ✓ بهبود فضای کسب و کار، تامین و جذب سرمایه، بهره‌وری و مدیریت بهتر دارایی‌ها، درآمد و هزینه‌ها، اصلاح ساختار نیروی انسانی، بالابردن درجه حرفه‌ای کارکنان و دست‌اندرکاران از طریق بازتعریف ساختار سازمانی و آموزش و تربیت مدیران میانی
- ✓ شفافیت، پاسخگویی، چابک‌سازی و بهبود روش‌ها و فرایندها، افزایش رضایت‌مندی و رشد و ارتقای شاخص‌های عملکردی در شرکت‌های زیرمجموعه
- ✓ تلاش بیشتر برای اعمال مدیریت مصرف، تقاضا و بازتخصیص و بازچرخانی منابع آب
- ✓ توجه اساسی به حل مسائل کلی حفظ اکوسیستم‌ها، مسائل محیط‌زیستی و جلوگیری از آلودگی منابع آبی

- ✓ برنامه‌ریزی اساسی همراه با تدوین و اجرای برنامه‌های عملیاتی دارای ضمانت اجرایی و اقتدار لازم برای کاهش تنش آبی در شهرهای بزرگ و نیز تعیین تکلیف چگونگی تامین آب شرب روستاهای پراکنده و کم‌خانوار و بدون آب
- ✓ فراهم‌نمودن زمینه مشارکت و همراهی بهره‌برداران و آب‌بران در صیانت از منابع آب در دشت‌ها و حوضه‌های آبریز برای حفظ و پایداری مستمر تامین آب شرب آحاد جامعه شهری و روستایی (این مسئله پیچیده دارای ابعاد مختلف فنی، اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و امنیتی است و با تصمیم‌گیری مقطعی و محلی مرتفع نمی‌شود و نیاز به یک تحول و تغییر اساسی در نگرش‌ها در بخش آب دارد که در راس آن‌ها کمک به طراحی مدل استقرار نظام حکمرانی خوب در بخش مدیریت آب کشور با محوریت مدیریت مشارکتی است که پرداختن به آن خارج از این مصاحبه است.
- ✓ تدوین مدل‌ها و بسته‌های حمایتی، تسهیلاتی، مشوق‌ها و صندوق‌ها و نظامات تخصیص یارانه به طرح‌ها و پروژه‌هایی با قیمت تمام‌شده بالا که پرداخت آن از طرف مصرف‌کننده امکان‌پذیر نیست.
- ✓ تلاش برای کسب فناوری و دانش فنی در زمینه‌های مختلف راهبری صنعت آب و فاضلاب با مشارکت و بهره‌گیری حداکثری از ظرفیت‌های موجود در کشور
- ✓ تنوع بخشی به سامانه‌های استحصال، تامین و توزیع آب شرب و بهداشتی

* از دیدگاه خودتان مهم‌ترین دستاورد جنابعالی در طول

سال‌های فعالیت در این حوزه چه بوده است؟

- همان‌گونه که عرض شد اینجانب افتخار حدود ۴۳ سال فعالیت مستمر و تخصصی صرفاً در حوزه‌های مختلف مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب، تاسیسات آب و جمع‌آوری فاضلاب را داشته‌ام (۱۲ سال در جهادسازندگی به‌عنوان بنیان‌گذار کمیته آب استان، ۱۹ سال در وزارت نیرو به‌عنوان یکی از بنیانگذاران مدیریت و ساختار آب و فاضلاب شهری و روستایی و ۱۲ سال هم فعالیت در بخش خصوصی و کارگروه‌های مختلف اتاق فکر و برنامه‌ریزی، سیاست‌گذاری و مشاوره و اجرایی)، بنابراین با توجه به مسئولیت‌های کوچک و بزرگی که از سطح کارشناسی تا سطوح مدیریت ارشد را دارا بوده‌ام به‌طور خلاصه می‌توانم به اهم آن‌ها اشاره کنم:

- ✓ طراحی، تدوین و استقرار ساختارهای چابک سازمانی در دوره‌های مختلف کاری در جهادسازندگی و وزارت نیرو و

بخش خصوصی (مشاورین، پیمانکاران، بنگاه‌های اقتصادی، مجامع، انجمن‌ها و تشکل‌های حرفه‌ای و تخصصی)

✓ توجه اصولی در جذب، آموزش، ایجاد انگیزش در کارکنان و مدیران با محوریت مشارکت در هم‌اندیشی‌ها برای تدوین راهبردها و برنامه‌ها

✓ ظرفیت‌سازی در نیروی انسانی در همه مقاطع کاری از طریق بسط و توسعه یادگیری سازمانی، شناسایی نیروهای کارآمد و با انگیزه و سرآمد و سپردن کار به آن‌ها (ایجاد دوره‌های آموزشی بیش از ۵۰ دوره، تورهای آموزشی تخصصی داخلی و خارجی و فرستادن نیروها برای طی دوره‌های مختلف)

✓ توجه و علاقمندی کلیدی به حضور کلیه ذی‌نفعان و ذی‌مدخلان در برنامه‌ریزی‌ها، تصمیم‌سازی‌ها و تدوین برنامه‌ها (با تأکید بر مشارکت متخصصین حرفه‌ای دانشگاهی، پژوهشی و ...)

✓ کمک به توسعه فناوری‌ها، ساخت داخل و ارتقای سطح خدمات فنی و مهندسی و بهره‌گیری از فناوری‌های روز دنیا از طریق ایجاد ارتباط مستمر و برنامه‌ریزی برای برگزاری دوره‌ها، سمینارها، همایش‌ها و نمایشگاه‌های ملی و بین‌المللی

✓ برنامه‌ریزی و مشارکت و پیگیری مستمر برای راهبری و اجرای هزاران طرح و پروژه آبرسانی روستایی و شهری و جمع‌آوری فاضلاب شهری و روستایی، تاسیسات سدسازی، تونل خطوط انتقال آب، شبکه‌های آبیاری و تصفیه‌خانه‌های کوچک و بزرگ آب و فاضلاب در نقاط مختلف کشور

✓ توجه کلیدی و علاقمندی خاص برای ارتقای سطحی کیفی خدمات (به‌ویژه آب شرب) و کمک به نظام‌مند نمودن فرایند پایش و رصد آلودگی منابع آب و تأکید بر استقرار آزمایشگاه‌های مرجع و معتبر در اقصی نقاط کشور و جذب و آموزش متخصصان در این زمینه، پایش، ارزیابی و تحلیل کیفیت خدمات مذکور

✓ عضویت و حضور در ستادها، کمیسیون‌ها، کارگروه‌های تخصصی و کمک به تدوین نظامات، فرایندها و برنامه عمل برای بهبود مستمر روش‌ها و استانداردهای فعالیت‌های آبی و همچنین تهیه نظامات و نقشه راه برای اکثر فعالیت‌های فنی، بهره‌برداری، مالی، مشترکین، مدیریت داده‌ها و اطلاعات و نیز تهیه و تدوین برنامه‌های استراتژیک صنعت آب و فاضلاب در زمینه‌های مختلف

✓ ظرفیت‌سازی در بخش خصوصی برای ورود به حوزه فعالیت‌های آبی از طریق پیگیری‌های مستمر در مطالعه، ارزیابی و تدوین نقشه راه مربوطه و پیگیری آن از طریق

ذی‌مدخلان مربوطه از جمله اتاق ایران، جامعه مهندسی مشاور، فدراسیون صنعت آب، انجمن‌های حرفه‌ای و صنفی، شرکت‌های مهندسی مشاور و علاقمندان به سرمایه‌گذاری و مشارکت P.P.P بخش خصوصی

✓ مدل و الگوسازی انواع روش‌های مشارکت و سرمایه‌گذاری بخش خصوصی در حوزه فعالیت‌های آبی به روش غیراستقراضی و بیع متقابل (مانند طرح انتقال پساب تصفیه‌خانه جنوب تهران، فاضلاب کرمان، بندرعباس، اراک و ...)

✓ مطالعه و تدوین مدل اجرایی بازار آب، بورس آب، نهادهای تنظیم مقررات و مشوق‌های سرمایه‌گذاری

✓ حضور در مجامع و انجمن‌های مختلف و ارائه مقالات، پیشنهادات، الگوها و مدل‌ها برای حل چالش‌های اساسی مدیریت آب کشور

* به نظر شما چرا مبحث تحقیقات و ارتباط با دانشگاه‌ها و مراکز علمی در مسائل اصلی و کلیدی صنعت آب و فاضلاب کشور آن‌طور که باید مورد توجه قرار نمی‌گیرد. آیا پیشنهادی برای اعتمادسازی بین این دو بخش دارید؟

- در جهان امروز اصولاً تحولات و پیشرفت‌های صنعتی و حتی خدماتی از مراکز علمی و تحقیقاتی آغاز و در نهایت به‌صورت محصول و یا خدمت جدید و رقابت‌پذیر و پویا نمود پیدا می‌کند. موضوع چگونگی ارتباط صنعت با دانشگاه مدت‌ها است که در کشورهای مختلف از جمله کشور ما مطرح است. در کشور ما هم در برخی صنایع بنا به نیاز و ساختار خود این ارتباط را فراهم نموده‌اند، اما در برخی نهادها به‌ویژه نهادهای خدماتی همانند آب و فاضلاب این ارتباط دارای فراز و فرودهایی بوده است. پیشرفت و تحول و توسعه صنعت آب و فاضلاب بدون توجه به پژوهش، تحقیقات و به‌ویژه آموزش‌های کاربردی عملاً امکان‌پذیر نیست و در حقیقت وابستگی همیشگی آموزش و تکنولوژی و صنعت یک امر قطعی و الزام‌آور تلقی می‌شود.

چنانچه مشکلاتی در روابط بین مراکز علمی و صنعت وجود دارد، علت آن وجود نارسایی‌هایی در این دو نهاد است. در نهاد آب و فاضلاب کشور:

✓ جایگاه ساختار تحقیقات مرتب دچار مشکلاتی بوده است و حسب نظرات مدیران ارشد این جایگاه مرتب بالا و پایین می‌شود.

✓ یک جوان دانشجو و یا حتی یک استاد محقق و یا مخترع گاهی برای بدیهی‌ترین امور مورد نیاز تحقیقات خود مدت‌ها

برای ملاقات و یا اخذ اطلاعات سردرگم و منتظر می‌ماند.

✓ ارتباط با مراکز علمی پیوسته نیست و عموماً در حد برگزاری کنفرانس‌ها و برخی جلسات محدود و غیرکارآمد است.

✓ عدم شناخت ظرفیت‌ها و توانمندی‌های علمی، تحقیقاتی و پژوهشی مراکز و فقدان برنامه تعریف شده، شناسایی و استفاده از این ظرفیت‌ها در سطح شرکت‌ها

✓ حاکم‌بودن نظام بروکراسی پیچیده در ساختار مدیریت صنعت آب و فاضلاب، روزمرگی شدید حاکم بر مدیران ارشد در نهاد دانشگاه و مراکز علمی و تحقیقاتی:

- عدم شناخت کافی مراکز دانشگاهی و علمی از نیازهای روز و آینده صنعت
- دوری دانشگاه از صنعت برای مهارت‌اندوزی و تجربه کاری
- حین آموزش در طول دوران تحصیل دانشجویان تربیت صرف فارغ‌التحصیلان مدرک‌گرا (کمتر به مسائل آموزشی تربیت متخصص کاربردی و تحول‌گرا پرداخته می‌شود)
- ضعف در بنیة علمی موردنیاز حل مسائل پیچیده صنعت آب و فاضلاب در مراکز علمی
- آموزش‌های صرفاً مقاله‌محور و تئوریک و نه کاربردی در بین عموم دانشگاه‌ها
- نبود ارتباط منسجم و تعریف‌شده با صنایع بزرگ ساخت تجهیزات و کالاهای مورد نیاز صنعت آب و فاضلاب کشور (در اکثر کشورهای توسعه یافته دانشگاه‌ها ارتباط تنگاتنگی با صنایع بزرگ تولیدی دارند)

پیشنهاد:

- تهیه و تدوین تفاهم‌نامه‌های مختلف بین صنعت آب و فاضلاب (اعم از بخش عمومی، دولتی و خصوصی) با دانشگاه با کمک انجمن و آbfای کشور برای انجام اموری مانند:
- ✓ تغییر جهت دانشگاه از آموزش صرف تئوریک به مهارت‌افزایی و اشتغال‌پذیری دانشجویان (برگزاری دوره‌های کارآموزی و کارورزی در مقابل با صنعت و سازمان فنی و حرفه‌ای، افزایش ظرفیت کارآموزی و نظارت بر روند کارآموزی توسط صنعت)
- ✓ الزام دانشگاه‌ها به جهت‌دهی مسیر آموزشی و پژوهشی دانشگاه به سمت کاربردی‌شدن
- ✓ تبیین و تدوین طرح مهارت‌آموزی برای دانشجویان مرتبط با صنعت (به‌ویژه دانشجویان سال‌های اول دانشگاه) (برای طول ۴ سال تحصیل)
- ✓ تشکیل کارگروه مشترک آموزش و فناوری‌های نوین بین انجمن و شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور جبرای

هم‌افزایی و تسهیل‌گری برای ارتباط صنعت با دانشگاه‌ها و مراکز علمی و تحقیقاتی حسب نیازهای کوتاه و میان‌مدت

✓ تدوین یک برنامه عملیاتی برای حضور مستمر و دوره‌ای اساتید در سطح کشور برای حضور در شرکت‌های آب و فاضلاب و طرح‌ها و پروژه‌های مهم به‌ویژه در امر بهره‌برداری و نگهداری تاسیسات تصفیه‌خانه‌های بزرگ آب و فاضلاب

✓ ارزیابی و ممیزی توانمندی‌ها و ظرفیت‌های مراکز علمی، تحقیقاتی و پژوهشی و سپردن برخی نیازهای آموزشی، تحقیقاتی و پژوهشی (در سطح کاربردی)

✓ سوق دادن عموم پایان‌نامه‌ها و رساله‌ها به مسائل کاربردی موردنیاز صنعت (در امور فنی، بهره‌برداری، تامین مالی، ارتقای نیروی انسانی، حل و فصل مسائل اجتماعی و ...)

✓ شناسایی بخش خصوصی هم‌چون استارت‌آپ‌ها، شرکت‌های دانش‌بنیان و فراهم‌نمودن زمینه مشارکت آن‌ها در صنعت آب و فاضلاب

✓ تبیین و تدوین و اجرای برخی دوره‌های کارآموزی و کارورزی برای مهارت‌افزایی و اشتغال دانشجویان به‌ویژه در سال‌های اول دانشجویی

✓ برگزاری تورهای علمی، استفاده از کمک‌های فنی و اعتباری صنایع بزرگ، تشکیل صندوق ضمانت سرمایه‌گذاری برای مخترعین، دانش‌بنیان‌ها و فن‌بازار و تجاری‌سازی محصولات آن‌ها

✓ تبیین نیازهای آتی صنعت آب و فاضلاب در زمینه بهینه‌سازی نیروی انسانی از طریق اصلاح و تدوین رشته‌ها و سرفصل‌های جدید آموزشی و ارائه آن به دانشگاه‌ها و مراکز علمی (مانند رشته اقتصاد آب، حقوق آب، مهندسی اجتماعی آب، مدیریت و راهبری صنعت آب و فاضلاب و ...) براساس نیازها و بهره‌گیری از تجارب جهانی

✓ تدوین مدل بومی چگونگی تعامل بیشتر و بهتر صنعت آب و فاضلاب با دانشگاه و مراکز علمی، تحقیقاتی و نیز شرکت‌های مهندسی مشاور، پارک‌های علم و فناوری و پژوهش، شرکت‌های دانش‌بنیان، استارت‌آپ‌ها

✓ تدوین برنامه چگونگی ارتقای بهره‌وری نیروی متخصص در صنعت آب و فاضلاب از طریق:

- الف- نیازسنجی، آسیب‌شناسی و بازنگری و هدفمندسازی رشته‌های مورد نیاز
- ب- بهره‌گیری از تجارب بین‌المللی در اشتغال‌پذیری و مهارت‌آموزی دانش‌آموختگان

* ارزیابی شما از فعالیت‌های انجمن آب و فاضلاب ایران و

تأثیر آن در حوزه آب و فاضلاب کشور چیست؟

- انجمن‌های علمی می‌توانند به‌عنوان نهادهایی تاثیرگذار در عرصه علمی و پژوهشی به ارتباط هرچه بیشتر صنعت و دانشگاه کمک کنند. وجود فضای علمی و تجربه اساتید و نیروی جوان و مستعد در انجمن‌های تخصصی می‌تواند بسیاری از طرح‌های پژوهشی و کاربردی را عهده‌دار و راهبری نمایند. از نتایج حاصل از فعالیت‌های انجمن‌های تخصصی، کمک به ترویج فرهنگ کسب و کار، کارآفرینی و ارتقای توانایی علمی-فناوری و مهارتی افراد با تاکید بر نیازهای جامعه و ایجاد آمادگی برای پذیرش مسئولیت‌های شغلی است. از دیگر جایگاه انجمن تخصصی، می‌توان به ایفای نقش مرجعیت علمی و ارتقای مشارکت در تصمیم‌سازی‌ها برای توسعه، ترویج و انتشار علم و فناوری اشاره نمود.

با توجه به اقدامات و فعالیت نسبتاً گسترده انجمن در طول عمر نه‌چندان بلند حدود ۱۰ ساله، قطعاً ارزیابی فعالیت‌های انجمن مثبت و اثرگذار و کمک‌کننده به مباحث کلیدی صنعت آب و فاضلاب است. برگزاری کارگاه‌ها، سمینارها، کنفرانس‌ها و جلسات دوره‌ای و نشر مطالب بسیار مفید در نشریه و همچنین هم‌دلی و هماهنگی و ارتباط با صنعت، دستاوردهای مناسبی را در پی داشته است.

نظر به گستردگی و تنوع مسائل حوزه فعالیت آب و فاضلاب قطعاً حضور پررنگ‌تر و وسیع‌تر در ابعاد و اجزای (فنی، اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی) بخش آب و فاضلاب توسط انجمن می‌تواند اثرات شایانی در افزایش مهارت‌ها، انتقال دانش و فناوری، بهبود سیستم‌ها و روش‌ها داشته باشد.

* به نظر شما نهادهای مستقل مانند انجمن‌های علمی چه‌طور می‌توانند در حل مسائل این صنعت مشارکت داشته باشند؟

- به برخی کارآمدی‌ها و اثربخشی‌های انجمن‌های علمی در مباحث قبلی از جمله کمک به ترویج فرهنگ کسب و کار، کارآفرینی و ارتقای توانمندی‌های علمی، فناوری، مهارتی و پژوهشی، همچنین ایفای نقش مرجعیت و مشارکت در تصمیم‌گیری‌ها اشاره شد. همچنین در مبحث مربوط به ارتباط دانشگاه و مراکز علمی در مسائل کلیدی صنعت پیشنهادات مشروحی ارائه نمودم که در راس آن‌ها پیشنهاد تهیه و تنظیم تفاهم‌نامه و توافق‌نامه فعالیت مستمر با بخش‌های مختلف عمومی، خصوصی و دولتی همراه با بهره‌گیری از ظرفیت‌های

دانشگاه و صنعت برای حل مسائل اساسی صنعت بود.

در ذیل این پیشنهاد با توجه به مأموریت، شرح وظایف و پتانسیل انجمن حداقل ۱۰ راه‌کار عملیاتی مشارکت انجمن با صنعت احصا و ارائه شد. استعدا دارم انجمن به‌طور گسترده و مشروح با ذی‌مدخلان و نقش‌آفرینان موضوعات پیشنهادی وارد گفتگو و مذاکره شود. بی‌شک عملیاتی‌شدن حتی تعدادی از این پیشنهادات می‌تواند در روند رو به رشد صنعت و اصلاح امور، اثرات و بازخورد مثبت بسیار خوبی داشته باشد.

و اما اهم پیشنهادات در این زمینه:

✓ ایجاد بانک اطلاعاتی (محققین، اساتید، خبرگان، مخترعین، فناوران، کتب، مقالات، دستورالعمل‌های فنی و اقتصادی، رساله‌ها، پایان‌نامه‌ها، تکنیک‌های جدید علمی و فنی و ... در ارتباط با علوم مهندسی و صنعت آب و فاضلاب، به‌روز رسانی و حسب نیاز انتشار برخی از آن‌ها)

✓ کمک به شرکت مهندسی آبفا برای برنامه‌ریزی برای تامین نیازهای تخصصی، آموزشی، ارتقای مهارت‌ها و تامین نیروی انسانی متخصص و ارائه مشورت به دست‌اندرکاران صنعت در زمینه‌های مختلف

✓ ایجاد ارتباط با دیگر تشکلهای، کانون‌ها و سازمان‌های مرتبط با وظایف صنعت آب و فاضلاب در داخل و خارج از کشور برای انتقال دانش به مجموعه صنعت

✓ اعلام نظرات مشورتی در مورد طرح‌ها، قوانین، آیین‌نامه‌ها، استانداردها، فرایندها و دستورالعمل‌های مرتبط با آب و فاضلاب
✓ برگزاری دوره‌های تخصصی و آموزشی مستمر و کارگروه‌های آموزشی به‌منظور بالابردن سطح آگاهی و دانش عوامل دست‌اندرکار صنعت و اعضای انجمن

✓ کمک به شرکت‌های آبفای کشور و زیرمجموعه و نیز صنایع بزرگ وابسته برای راه‌اندازی، تشکیل و حمایت از فعالیت‌های واحدهای تحقیق و توسعه در حوزه آب و فاضلاب

✓ همکاری مشترک بین ستاد آبفای کشور و آموزش عالی در خصوص تبیین و تدوین طرح دروس و رشته‌های جدید و کاربردی دانشگاهی و نیز مهارت‌آموزی دانشجویان و دانش‌آموختگان و نیز ارتقای سطح دانش آکادمیک منابع انسانی شاغل و فعال در عرصه صنعت آب و فاضلاب (اعم از عمومی و خصوصی)

* برای تقویت نقش و اثربخشی انجمن آب و فاضلاب و گسترش فعالیت‌های آن به‌ویژه در صنعت و ساختار مدیریتی این حوزه چه پیشنهاداتی دارید؟

- همان گونه که اشاره شد پیشنهاد روشن و قابل اتکایی در پاسخ به سوال های قبلی ارائه شد. علاوه بر موارد پیش گفته در این جا لازم می دانم به این نکته تاکید کنم که همکاری انجمن با صنعت نباید صرفاً به مسائل فنی و تکنیکی و فناوری تجهیزاتی و مهارت افزایی محدود شود. بلکه امروزه مسائل راهبردی دیگری در صنعت وجود دارد که اهمیت آن ها گاهی مهم تر از موارد فوق است و آن هم توجه به مسائل اجتماعی، اقتصادی، محیط زیستی و آمایش است که عدم توجه به هر یک از آن ها می تواند معضلات بیشتر و جدیدی را پیش روی صنعت قرار دهد. مناسب است انجمن با بهره گیری از ظرفیت علمی و رسانه ای کشور به مباحث حلقه های مفقود و یا موارد کم توجه شده، ورود نماید و با تدوین برنامه ای منسجم حداقل به جریان سازی طرح موارد ذیل کمک نماید:

- ✓ یکی از موارد تشدید مهاجرت، رشد جمعیت کلان شهرها و حاشیه نشینی است.
- ✓ از موارد دیگر عدم توجه به پتانسیل منابع آب در شکل گیری طرح های آمایش برای استقرار مراکز جمعیتی، صنعتی و تولیدی است. پیشنهاد سوق دادن جمعیت و استقرار صنایع بزرگ کشور به سواحل جنوب می تواند راه گشا باشد.
- ✓ موضوع مهم دیگر روند رو به افزایش آلودگی ها و ضرورت جلوگیری و زدایش منابع و استفاده از منابع غیر متعارف داخل سرزمین است.
- ✓ از موضوعات دیگر نقش آفرینی در شکل گیری طرح های توسعه ای منطقه ای و حوضه ای است تا تنش ها کمتر از گذشته شود.
- ✓ موضوعات و مقوله هایی مانند اقتصاد آب چه در زمینه تامین مالی، استفاده از ابزارهای بازار مالی و سرمایه و ... از جمله حلقه های مفقودی در صنعت است که باید انجمن به طرح آن در سطح کشور، کمک نماید.
- ✓ موضوع حفظ اکوسیستم ها، جلوگیری از تخریب بیشتر تالاب ها و مخازن آبی و کاهش خودپالایی رودخانه ها از جمله مسائل باقیمانده روی زمین است که باید برای آن فکری کرد.
- ✓ موضوع کلیدی و اساسی پرداختن به مسائل اجتماعی اعم از بالابردن رضایت مندی از خدمات، کمک به حل و فصل منازعات اجتماعی، کمک و تسهیل گری برای زمینه سازی مشارکت آحاد جامعه در تصمیم سازی دست اندرکاران می تواند اثربخشی بسیار مناسبی را در صنعت به همراه داشته باشد.

* نظر خود را در رابطه با نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب بیان کنید. آیا این نشریه توانسته است به رسالت خود برای ارتباط متقابل بین دانشگاه و صنعت دست یابد؟
- نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب، آینه و تابلوی بازخورد کلیه مسائل متنوع و مبتلا به صنعت آب و فاضلاب کشور تلقی می شود و در طول عمر نسبتاً کوتاه خود توانسته ضمن ارتباط مستمر با عوامل ذی مدخل و نقش آفرین در صنعت، از طریق طرح موضوعات متنوع کلیدی و اساسی در راهبری صنعت نقش آفرین باشد.

اصولاً دستگاه های اجرایی و عملیاتی با توجه به مشغله های کاری و روزمره از بهره گیری از دانش و فناوری روز و نتایج امور تحقیقاتی و پژوهشی و یا افزایش مهارت و دانش نیروهای زیرمجموعه خود غافل می شوند. از طرفی دانشگاه ها و مراکز علمی هم گاهی بدون توجه به نیازهای روز صنعت، صرفاً به مسائل آموزشی آکادمیک و افزایش تعداد دانش آموختگان (بدون ارتباط با صنعت) می پردازند.

حلقه مفقوده در این بین ایجاد ارتباط بین این دو نهاد است. برای هم افزایی و رشد و بالندگی بیشتر، چراکه هر دو بخش اصولاً نمی توانند بدون حضور دیگری به اهداف خود نائل شوند، بنابراین وظیفه پیدا کردن و اتصال این حلقه مفقوده به عهده انجمن های علمی است و در این بین جایگاه نشریه علمی که بازگوکننده مسائل هر دو طیف نقش آفرین در صنعت است، بسیار با اهمیت تلقی می شود.

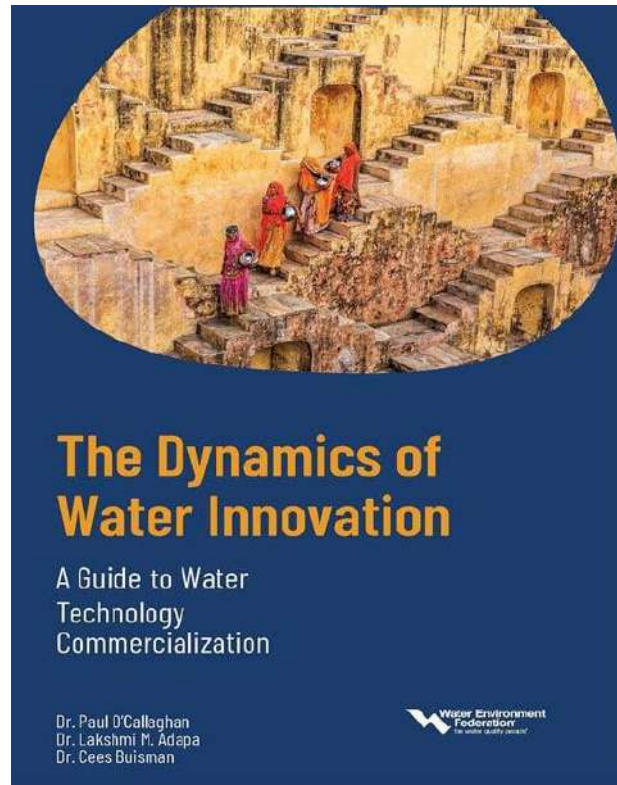
پیشنهاد این جانب این است که به دلیل درهم تنیدگی و پیچیدگی امور فنی، اجرایی، بهره برداری، اجتماعی، محیط زیستی، اقتصادی، امنیتی و سیاسی در موضوع آب و فاضلاب، نشریه علمی مذکور صرفاً به علوم و مهندسی آب و فاضلاب بسنده نکند و در مسائل مهم اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی مرتبط با صنعت ورود نماید.

هم چنین در همین جا لازم می دانم از دست اندرکاران و هیئت محترم تحریریه نشریه برای زحمات و اقدامات تا به حالشان و نیز انجام این مصاحبه کمال تشکر و سپاسگزاری را داشته باشم.

* از آن جا که جنابعالی در همایش سال ۱۴۰۲ انجمن به عنوان پیشکسوت نمونه برگزیده و مورد تقدیر قرار گرفتید، لطفاً تاثیر فعالیت های انجمن از جمله اجرای همایش ها و برنامه های آن از جمله نشست های تخصصی و تقدیر از پیشکسوتان و ارتقای ارتباط با صنعت و ایجاد انگیزه بیشتر در افراد برای فعالیت موثر را بیان فرمایید.

- در این جا لازم می‌دانم از حسن نظر مسئولین (هیئت مدیره محترم) انجمن و عزیزان کمیته‌های علمی و اجرایی و دست‌اندرکاران همایش نسبت به این‌جانب صمیمانه سپاس‌گزاری نمایم و از این‌که با وجود چهره‌های نام‌آشنا و پیشکسوتان خوش‌نام بنده حقیر را در زمره پیشکسوتان قرار دادند تشکر نمایم. اصولاً برای پیشبرد اهداف و مأموریت هر انجمن، نیاز به برگزاری چنین همایشی با برنامه‌های متنوع ضروری است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود انجمن علاوه بر برگزاری کارگاه‌ها و نشست‌های تخصصی متعدد در طول سال با موضوعات راهبردی صنعت، نیاز به گردهمایی و همایش عمومی حداقل یکی دو جلسه در طول سال دارد. در این جلسات می‌توان علاوه بر طرح مسائل روز پیش‌روی صنعت، اهداف و برنامه‌های استراتژیک صنعت و انجمن، برنامه عملیاتی و نقشه راه کوتاه و بلندمدت انجمن و چگونگی دستیابی به اهداف و برنامه‌ها را با اعضا و دیگر دست‌اندرکاران صنعت به مشورت و نظرخواهی گذاشت. عملکرد انجمن مورد تحلیل و ارزیابی قرارگیرد و به‌طور کلی منجر به یک هم‌افزایی، رشد و بالندگی و ایجاد انگیزش شود. بدون شک فقدان این همایش‌ها و یا ضعیف برگزار کردن آن‌ها و عدم اطلاع‌رسانی رسمی عملکردها و برنامه‌ها می‌تواند آسیب جدی به رشد و بالندگی رساننده و باعث بی‌انگیزگی در بین اعضا شود. از دیگر اقدامات بسیار مثبت و انگیزشی اثرگذار انتخاب و معرفی و تقدیر پیشکسوتان است، فارغ از این‌که بنده خودم را در جایگاه این عزیزان نمی‌بینم. اما به‌دلیل قدمت ۴۳ ساله فعالیت این‌جانب در صنعت، شاهد تلاش‌ها و کوشش‌های فراوان بسیاری از عزیزان در طول ۵۰ سال گذشته در مجامع علمی، دانشگاهی، پژوهشی، فضای کسب و کار بخش خصوصی و نیز کارشناسان و مدیران برجسته در درون نظام تشکیلاتی دولتی و غیردولتی بخش صنعت آب و فاضلاب بوده و هستم که مناسب است زمینه معرفی و تقدیر هرچه بیشتر این عزیزان در نشست‌های مختلف فراهم شود. بی‌شک بازگویی خاطرات و تجربه‌های تلخ و شیرین آن‌ها در راهبرد صنعت، می‌تواند علاوه بر انگیزش فعالان به‌نحوی راه‌گشای پیشبرد مسائل در آینده باشد.

عنوان: پویایی نوآوری آبی: راهنمای تجاری سازی فناوری های آبی
 ناشر: فدراسیون محیط زیست آب (WEF)
 زمان انتشار: سال ۲۰۲۴



این کتاب منبعی ارزشمند برای افراد و سازمان هایی است که منجر به اتخاذ نوآوری های جدید در صنعت آب می شوند؛ مانند کارآفرینان، سرمایه گذاران، فناوران، محققان و دانشگاہیان. در واقع بحران جهانی آب بدین معنی است که نیاز ضروری و فوری به توسعه، معرفی و صنعتی شدن فناوری های آبی در سراسر جهان وجود دارد. به صورت کلی می توان اذعان کرد که صنعت آب از نظر پذیرش نوآوری، بسیار کند عمل کرده است؛ اما تحقیقات بسیار محدودی برای تأیید یا توضیح این پدیده وجود دارد.

این کتاب یک مدل جدید اتخاذ فناوری آب (WaTA) را پیشنهاد می دهد که برای شرایط منحصر به فرد صنعت آب ایجاد شده و از مدل های بین بخشی موجود استخراج شده است. مدل WaTA شامل مجموعه ای عملی از معیارهایی است که می تواند در شرایط واقعی برای برنامه ریزی و تصمیم گیری آگاهانه تر نوآوران و سرمایه گذاران به کار گرفته شود. این مدل، به نوآوران حوزه آب یک روش عملی و مقاوم برای برنامه ریزی و رهگیری توسعه ها ارائه می دهد، که می تواند تأثیر قابل توجهی بر آگاهی از سرعت تغییرات، اطمینان بازار و نتایج آتی به همراه داشته باشد.

فهرست مطالب این کتاب به قرار زیر است:

- (۱) چالش های آبی پیش روی جهان؛ (۲) بهبود کارایی یک نوآوری آبی برای ایجاد ارزش؛ (۳) توسعه و به کارگیری مدلی به منظور پذیرش فناوری آبی؛ (۴) عوامل مؤثر بر نرخ پذیرش فناوری آبی؛ (۵) کاربرد تئوری های نوآورانه در صنعت آب؛ (۶) چارچوب جدیدی برای اندازه گیری سطح تأثیر بازار؛ (۷) یکپارچه سازی جدول های زمانی، محرک ها، انواع نوآوری ها و تأثیر آن در درک جامعی از پویایی نوآوری آبی؛ (۸) سناریوهای آینده: در ادامه چه خواهد شد؟
- اطلاعات بیشتری از این کتاب در پیوند زیر موجود است:

https://www.wef.org/publications/publications/books/the-dynamics-of-water-innovation/?utm_campaign=Dynamics+Email&utm_source=email&utm_medium=email&utm_term=&utm_content=&cpn_id=660eb2ad1266f1aacdc6f851&e_id=660eacb91266f1aacdc6f842

اخبار و فعالیت‌های عمده انجام شده انجمن آب و فاضلاب ایران در سه ماهه چهارم سال ۱۴۰۲ به شرح زیر است:

- برگزاری جلسه با معاونت محترم منابع انسانی آبفای استان تهران (۱۴۰۲/۱۰/۱۱)
- برگزاری جلسه با ریاست و اعضای محترم گروه آب دانشکده عمران دانشگاه اصفهان (۱۴۰۲/۱۰/۲۰)
- برگزاری جلسه با معاونت محترم منابع انسانی آبفای اصفهان (۱۴۰۲/۱۰/۲۰)
- حضور جلسه انتخابات شورای عتف (۱۴۰۲/۱۰/۲۳)
- برگزاری جلسه هشتاد و سوم هیئت مدیره انجمن (۱۴۰۲/۱۰/۲۷)
- انتشار خبرنامه شماره ۹۴ انجمن (دی‌ماه ۱۴۰۲)
- جلسات اتاق فکر پروژه تاریخ شفاهی صنعت آب و فاضلاب (۹ و ۱۱/۲۳/۱۴۰۲)
- ملاقات اعضای اتاق فکر پروژه تاریخ شفاهی صنعت آب و فاضلاب با آقای دکتر منوچهری (۱۴۰۲/۱۱/۲۴)
- برگزاری جلسه با ریاست و اعضای محترم گروه آب دانشکده عمران دانشگاه اصفهان (۱۴۰۲/۱۱/۱۸)
- برگزاری جلسه با معاونت محترم منابع انسانی آبفای اصفهان (۱۴۰۲/۱۱/۱۸)
- برگزاری جلسه هشتاد و چهارم هیئت مدیره انجمن (۱۴۰۲/۱۱/۲۵)
- انتشار خبرنامه شماره ۹۵ انجمن (بهمن‌ماه ۱۴۰۲)
- برگزاری جلسات شورای سیاستگذاری کنگره ۱۴۰۳ (۹ و ۱۶ و ۱۲/۲۳/۱۴۰۲)
- جلسه هیئت مدیره انجمن با مدیرعامل محترم شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور (۱۴۰۲/۱۲/۱۲)
- جلسات اتاق فکر پروژه تاریخ شفاهی صنعت آب و فاضلاب (۷ و ۱۲/۲۱/۱۴۰۲)
- برگزاری مرحله اول چهارمین دوره المپیاد آب و فاضلاب ایران (یادواره خانم دکتر سیمین ناصری) (۱۴۰۲/۱۲/۱۰)
- ارزیابی ایده های دریافتی در پنجمین دوره مسابقه ایده برتر (اسفندماه ۱۴۰۲)
- برگزاری جلسه هشتاد و پنجم هیئت مدیره انجمن (۱۴۰۲/۱۲/۲۳)
- انتشار خبرنامه شماره ۹۶ انجمن (اسفندماه ۱۴۰۲)
- انتشار شماره ۴، دوره ۸ نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب (اسفند ۱۴۰۲)

لینک آپارات	موضوع (ارائه دهنده)	رویداد	ردیف
https://www.aparat.com/v/hevFM?playlist=28325845	ویروس کرونا در صنعت آب و فاضلاب (دکتر عبدالله رشیدی)	وبینارهای تخصصی انجمن آب و فاضلاب ایران	۱
https://www.aparat.com/v/Antvj?playlist=28327448	راه کارهای بهبود کیفیت پساب برکه‌های تثبیت فاضلاب (دکتر حسین ساسانی)		
https://www.aparat.com/v/Pob7C?playlist=29641530	مروری بر ظرفیت‌های ارتقای پژوهش و نوآوری در حوزه آب کشور (دکتر مجتبی شفیع)		
https://www.aparat.com/v/Uf3N5?playlist=28368237	نشت‌یابی در شبکه‌های آبرسانی (دکتر محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده)		
https://www.aparat.com/v/4QcMo?playlist=30860968	مدیریت شورابه‌های ناشی از سامانه‌های نمک‌زدایی با تاکید بر فناوری‌های ZLD (دکتر عباس اکبرزاده)		
https://www.aparat.com/v/mTSiK?playlist=737673	چالش‌های روش‌های جایگزین برای بهبود و مدیریت کیفیت آب (دکتر مسعود یونسیان، مهندس سلیمه رضایی‌نیا و دکتر محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده)		
https://www.aparat.com/v/DtoQY?playlist=33226803	ارزیابی عملکرد مدل‌های متابولیسم آب شهری قابلیت‌ها و محدودیت‌ها (دکتر کوروش بهزادیان)		
https://www.aparat.com/v/FPtCY?playlist=34242002	سواد آبی در جوامع شهری (دکتر شروین جمشیدی)		
https://www.aparat.com/v/5c7Ph?playlist=35313047	تأثیرات شرایط اقلیمی بر روی ظرفیت شبکه‌ها و شکست (دکتر احسان روشنی)		
https://www.aparat.com/v/W8P7J?playlist=35547113	ارزیابی اثرات محیط‌زیستی پروژه‌های آب و فاضلاب با رویکرد چرخه حیات (LCA) (مهندس هانیه صفرپور)		
https://www.aparat.com/v/y1euk?playlist=36262652	کاربردهای اقتصاد چرخشی در صنعت آب و فاضلاب (دکتر سیدحسین سجادی‌فر)		
https://www.aparat.com/v/36WoO?playlist=37676753	توسعه و بهره‌برداری از شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب با رویکرد تمرکززدایی (دکتر علی حقیقی)		
https://www.aparat.com/v/f8dyx?playlist=37677090	نقشه‌راه برای ارتقای شبکه‌های آبرسانی موجود به هوشمند (دکتر محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده)		
https://www.aparat.com/v/RPkeb?playlist=38227690	مبانی نظری تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار شبکه‌های توزیع آب (دکتر مسعود تابش)		
https://www.aparat.com/v/mbNDM?playlist=39035474	آشنایی با تکنیک PCR در تحقیقات محیط‌زیست و بهداشت محیط (دکتر رحیم عالی)		
https://www.aparat.com/v/hwC9I?playlist=39248099	بررسی ۲۵,۰۰۰ مقاله محیط‌زیست برای یافتن داغترین موضوعات تحقیقاتی (دکتر علیرضا بازارگان)		
https://www.aparat.com/v/6Ewy5?playlist=39248537	توسعه مدل روندیابی مقیاس قاره‌ای میزوروت به منظور لحاظ دریاچه‌ها و مخازن (دکتر شروان قراری)		
https://www.aparat.com/v/epxDt	مروری بر وضعیت و تجارب تصفیه آب و فاضلاب در ژاپن (دکتر یحیی محزون)		
https://www.aparat.com/v/EaeTg	سیستم‌های آبی پایدار و تاب‌آور (دکتر راضیه فرمانی)		

https://www.aparat.com/v/3sxtT?playlist=737673	ارزیابی و بهینه‌سازی انرژی در سیستم‌های توزیع آب (دکتر سعید هاشمی)
https://www.aparat.com/v/Fcvyw?playlist=737673	بازچرخانی و مدیریت کیفی زهاب‌های کشاورزی (دکتر بهمن یارقلی)
https://www.aparat.com/v/IFHhK?playlist=737673	بازچرخانی آب‌های خاکستری در ساختمان‌های بلندمرتبه و مجتمع‌های مسکونی جدید در قالب مباحث الزامی جهت ساخت مسکن (دکتر عباس اکبرزاده و همکاران)
https://www.aparat.com/v/D7BvT?playlist=737673	مقدمه‌ای بر یادگیری ماشین برای کاربردهای مهندسی آب شهری (دکتر سیدامیر هوشنگ آیتی)
https://www.aparat.com/v/D7BvT	طراحی پایدار زیرساخت‌های دفع آب سطحی و فاضلاب شهری به کمک بهینه‌سازی چند هدفه و سیستم‌های کمک تصمیم‌گیری (دکتر امین ابراهیم بخشی پور)
https://www.aparat.com/v/rKPvH/	چالش‌های مدل‌سازی در بهره‌برداری بهینه و هوشمند از شبکه‌های توزیع آب (دکتر مهدی دینی)
https://www.aparat.com/v/jTbgx/	مدلسازی سیلاب و زهکشی شهری - اهمیت و رویکردها و مقدمه‌ای بر مدل TU-FLOW و کاربردهای آن (دکتر حامد توکلی‌فر، دکتر دانکن کیتس)
https://www.aparat.com/v/Nig5q/	کاربرد متدولوژی ارزش برای بهبود پروژه‌های بزرگ آب و آبفا (دکتر کامران امامی)
https://www.aparat.com/v/AxQw3	آلودگی منابع آب و خاک به آرسنیک و روش‌های پالایش آن (دکتر بهمن یارقلی)
https://www.aparat.com/v/kdcZC	مدل‌های داده‌محور و برخط پیش‌بینی سیلاب در سیستم‌های جمع‌آوری آب باران شهری (مهندس فرزاد پیاده)
https://www.aparat.com/v/cQevG	پیل سوختی میکروبی به‌عنوان یک راه‌حل پایدار برای تصفیه فاضلاب: از تحقیق تا کاربرد (دکتر علیرضا ولی پور مرندي)
https://www.aparat.com/v/zNPCU	بیوراكتورهای غشایی در تصفیه فاضلاب: وضعیت موجود، چالشها و فرصتهای پیش‌رو (دکتر مسعود طاهریون)
https://www.aparat.com/v/AOrNB	اثرات تغییر اقلیم بر کیفیت رواناب‌های شهری: از مدل‌سازی تا رویکردهای مدیریتی مبتنی بر توسعه پایدار (دکتر یاسر طهماسبی بیرگانی)
https://www.aparat.com/v/5SVaJ	نبرد شبکه‌های متمرکز و غیرمتمرکز جمع‌آوری آب شهری: از دیدگاه افزونگی (مهندس سینا حصارکزاری)
https://www.aparat.com/v/Q3SCK	مدیریت ناترازی تولید و مصرف آب با تکیه بر مدیریت مصرف آب (دکتر عباس اکبرزاده)
https://www.aparat.com/v/OnIs2	واکاوی تجربه کشور چین در حفاظت از منابع طبیعی و مدیریت مصرف آب (دکتر بنفشه زهرایی)
https://www.aparat.com/v/TtlmP	ضربه آبی، چرا و چگونه؟ از مفاهیم تا اجرا

	(مهندس ابوالفضل رضایی راد)		
https://www.aparat.com/v/ieWtp	پکیج‌های تصفیه فاضلاب؛ معیارهای طراحی و روش ساخت (مهندس حمیدرضا خسروچردی)		
https://www.aparat.com/v/DcoFP	سپتاز، یک معضل محیط‌زیستی کشور، چالش‌ها، راه‌حل‌ها (دکتر ذبیح اله یوسفی)		
https://www.aparat.com/v/Fvb7q	قدرت تحول آفرین سنجش از دور و هوش مصنوعی (دکتر احد نظریور)		
https://www.aparat.com/dashboard/videostat/185Cp	مطالعه ترکیبات مختل‌کننده غدد درون‌ریز (EDCs) در رودخانه کارون و تصفیه‌خانه فاضلاب (دکتر علی اکبر بابائی)		
https://www.aparat.com/v/n5B73	بررسی انواع میکرو پلاستیک‌ها و استر فتالات‌ها در فاضلاب و نقش واحدهای تصفیه‌خانه فاضلاب در حذف آن‌ها (مطالعه موردی تصفیه‌خانه فاضلاب اهواز) (دکتر افشین تکدستان)		
https://www.aparat.com/v/JL0OZ	معرفی نسل جدید مواد اولیه PE100-RD مناسب جهت لوله و اتصالات پلی‌اتیلنی مورد استفاده در سامانه‌های لوله‌گذاری انتقال آب با گندزاداهای پایه کلر (دکتر غلامرضا پیرچراغی، مهندس حمیدرضا شمسی و مهندس علیرضا صحاف امین)		
https://www.aparat.com/v/XIujP	چرخه معیوب آب بدون درآمد و مکانیسم نشت آب شناخت و راهکار (مهندس محمدرضا عزیزی)		
https://www.aparat.com/v/6OhwE?playlist=31020035	سامانه‌های فاضلاب، اپیدمی‌ها و بیماری‌های نوظهور	نشست‌های تخصصی انجمن آب و فاضلاب ایران	۲
https://www.aparat.com/v/IXWfd?playlist=31174320	تاب‌آوری شبکه‌های آب و فاضلاب		
https://www.aparat.com/v/7JxVU?playlist=35531526	هوشمندسازی و نوآوری در سامانه‌های آب و فاضلاب		
https://www.aparat.com/v/ISgM7?playlist=31219788	بازنگری شاخص و استاندارد کیفیت منابع آب ایران		
https://www.aparat.com/v/tn4E9?playlist=32316111	چالش‌های تعیین‌الگوی مصرف آب		
https://www.aparat.com/v/DZzYX?playlist=879646	تاب‌آوری زیرساخت‌های آب و فاضلاب در شرایط بحران به ویژه سیلاب		
https://www.aparat.com/v/t1iaZ?playlist=33416246	استفاده از آب خاکستری در محیط‌های شهری		
https://www.aparat.com/v/oIgeI?playlist=36877054	چالش‌ها، راهبردها و انتظارات از وزیر آبی نیرو در حوزه آب		
https://www.aparat.com/v/LxjEw?playlist=879646	نقش اقتصاد در مدیریت مصرف آب		
https://www.aparat.com/v/s3lwQ?playlist=879646	کاهش تلفات واقعی		
https://www.aparat.com/v/nBNj5?playlist=879646	تلفات ظاهری آب		
https://www.aparat.com/v/PO35T?playlist=879646	مدیریت مصرف آب		
https://www.aparat.com/v/xyr2O?playlist=879646	نمک‌زدایی آب‌های شور و بازیافت آب به‌عنوان منابع راهبردی در مقابله با تنش آبی کشور		
https://www.aparat.com/v/dVKvu?playlist=879646	مدیریت مصرف آب و سازگاری با کم آبی		
https://www.aparat.com/v/hEXdv?playlist=879646	مدیریت تعارضات آب و بازتعریف مسئله زاینده‌رود		
https://www.aparat.com/v/Ax3cG?playlist=879646	دستاوردها و چالش‌های استفاده از آب‌های نامتعارف		
h https://www.aparat.com/v/xyr2O	نمک‌زدایی آب‌های شور و بازیافت آب به‌عنوان منابع راهبردی در مقابله با تنش آبی کشور		
https://www.aparat.com/v/BFhCa	رویکردهای برنامه‌ایمنی آب		
https://www.aparat.com/v/LxjEw	نقش اقتصاد در مدیریت مصرف آب		
https://www.aparat.com/v/Lzf1g	چالش‌های انتقال آب دریا به فلات مرکزی		

https://www.aparat.com/v/B5Lle	تاب‌آوری سامانه‌های آب و فاضلاب، با نگاه به تجربه همدان و شهرکرد		
https://www.aparat.com/v/41JAS	چالش‌های استفاده دوباره از پساب‌های شهری در صنعت و فضای سبز		
https://www.aparat.com/v/jBUwJ	بررسی چالش‌ها و پیامدهای تغییر اقلیم و مداخلات انسانی بر کیفیت آب		
https://www.aparat.com/v/eotT5	مدیریت بهینه مصرف آب با رویکرد الزام صنایع به استفاده از پساب		
https://www.aparat.com/v/qOUfQ	راه‌کار و چالش‌های سرمایه‌گذاری در کاهش هدررفت آب در سامانه‌های آبرسانی		
https://www.aparat.com/v/hcuOk?playlist=5771644	مراسم افتتاحیه	اولین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران (۱۳۹۵)	۳
https://www.aparat.com/v/j2IAK?playlist=5771644	نشست تخصصی اول؛ سیاست‌های تأمین آب شرب در ایران		
https://www.aparat.com/v/LajYD?playlist=5771644	نشست تخصصی دوم؛ سیاست‌های صنعت جمع‌آوری فاضلاب و بازیافت پساب		
https://www.aparat.com/v/6LBfm?playlist=5771644	نشست تخصصی سوم؛ تأثیر مسائل اجتماعی، فرهنگی و مشارکت جامعه در مدیریت مصرف آب		
https://www.aparat.com/v/hr4Un?playlist=5771644	مراسم اختتامیه		
https://www.aparat.com/v/AmjKX	مراسم افتتاحیه	اولین همایش ملی مدیریت مصرف و هدررفت آب (۱۳۹۶)	۴
https://www.aparat.com/v/PO35T	نشست تخصصی اول؛ پنل مدیریت مصرف آب		
https://www.aparat.com/v/nBNj5	نشست تخصصی دوم؛ پنل تلفات ظاهری آب		
https://www.aparat.com/v/s3lwQ	نشست تخصصی سوم؛ پنل کاهش تلفات واقعی		
https://www.aparat.com/v/wmjDk	مراسم اختتامیه		
https://www.aparat.com/v/SAOxw	مراسم افتتاحیه	دومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران و دومین همایش ملی عرضه و تقاضای آب شرب و بهداشتی (۱۳۹۷)	۵
https://www.aparat.com/v/hEXdv	نشست تخصصی اول- مدیریت تعارضات آب و بازتعریف مسئله زاینده رود		
https://www.aparat.com/v/dVKvu	نشست تخصصی دوم- مدیریت مصرف آب و سازگاری با کم‌آبی		
https://www.aparat.com/v/Ax3cG	نشست تخصصی سوم- دستاوردها و چالش‌های استفاده از آب‌های نامتعارف		
https://www.aparat.com/v/pYO7g	مراسم اختتامیه		
https://www.aparat.com/v/SHiuG	مراسم افتتاحیه	دومین همایش ملی مدیریت مصرف آب با رویکرد کاهش هدررفت و بازیافت (۱۳۹۸)	۶
https://www.aparat.com/v/tn4E9	نشست تخصصی اول؛ چالش‌های تعیین‌الگوی مصرف آب		
https://www.aparat.com/v/DZzYX	نشست تخصصی دوم؛ تاب‌آوری زیرساخت‌های آب و فاضلاب در شرایط بحران به ویژه سیلاب		
https://www.aparat.com/v/t1iaZ	نشست تخصصی سوم؛ استفاده از آب خاکستری در محیط‌های شهری		
https://www.aparat.com/v/nQ2Ez	مراسم اختتامیه		
https://www.aparat.com/v/V7BNT	مراسم افتتاحیه	سومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران (۱۳۹۹)	۷
https://www.aparat.com/v/6OhwE	نشست تخصصی اول؛ سامانه‌های فاضلاب، اپیدمی‌ها و بیماری‌های نوظهور		
https://www.aparat.com/v/IXWfd	نشست تخصصی دوم؛ تاب‌آوری شبکه‌های آب و فاضلاب		
https://www.aparat.com/v/7JxVU	نشست تخصصی سوم؛ هوشمندسازی و نوآوری در سامانه‌های آب و فاضلاب		
https://www.aparat.com/v/ISgM7	نشست تخصصی چهارم؛ بازنگری شاخص و استاندارد		

	کیفیت منابع آب ایران		
https://www.aparat.com/v/cGUnl	کلینیک صنعت اول؛ شبکه‌های توزیع آب		
https://www.aparat.com/v/ntsvY	کلینیک صنعت دوم؛ کیفیت آب		
https://www.aparat.com/v/Fz5wu	کلینیک صنعت سوم؛ تصفیه فاضلاب و بازیافت آب		
https://www.aparat.com/v/IKLRc	کلینیک صنعت چهارم؛ شبکه های جمع آوری فاضلاب		
https://www.aparat.com/v/yLp7u	مراسم اختتامیه		
https://www.aparat.com/v/FWHLM	مراسم افتتاحیه		
https://www.aparat.com/v/xyr2O	نشست تخصصی اول: نمک‌زدایی آبهای شور و بازیافت آب	اولین همایش	۸
https://www.aparat.com/v/BFhCa	بعنوان منابع راهبردی در مقابله با تنش آبی کشور	ملی مدیریت	
https://www.aparat.com/v/LxjEw	نشست تخصصی دوم: رویکردهای برنامه ایمنی آب	کیفیت آب و	
https://www.aparat.com/v/5c82a	نشست تخصصی سوم: نقش اقتصاد در مدیریت مصرف آب	سومین همایش	
https://www.aparat.com/v/5c82a	کلینیک صنعت اول: محور شبکه‌های توزیع آب و کاهش هدررفت	ملی مدیریت	
https://www.aparat.com/v/5c82a	مصرف آب	(۱۴۰۰)	
https://www.aparat.com/v/KnEdF	کلینیک صنعت دوم: محور بازیافت آب		
https://www.aparat.com/v/A5wkz	کلینیک صنعت سوم: محور کیفیت آب		
https://www.aparat.com/v/OgGXj	مراسم اختتامیه		
https://www.aparat.com/v/OB57I	مراسم افتتاحیه		
https://www.aparat.com/v/Lzf1g	نشست تخصصی چالش‌های انتقال آب دریا به فلات مرکزی		۹
https://www.aparat.com/v/B5Lle	نشست تخصصی تاب‌آوری سامانه‌های آب و فاضلاب، با نگاه به تجربه همدان و شهرکرد	چهارمین کنگره	
https://www.aparat.com/v/41JAS	نشست تخصصی چالش‌های استفاده دوباره از پساب‌های شهری در صنعت و فضای سبز	علوم و مهندسی	
https://www.aparat.com/v/16VTE	کلینیک صنعت- محور کیفیت آب	آب و فاضلاب	
https://www.aparat.com/v/PupUv	کلینیک صنعت- محور شبکه‌های توزیع و هدررفت آب	ایران (۱۴۰۱)	
https://www.aparat.com/v/hr8Qs	کلینیک صنعت- محور بازیافت آب و تصفیه فاضلاب		
https://www.aparat.com/v/nRdX3	مراسم اختتامیه		
https://www.aparat.com/v/kiHYq	پیام آقای مهندس محمودیان		
https://www.aparat.com/v/Uaun9	کارگاه ایمنی آب		
https://www.aparat.com/dashboard/videostat/UwoCu	مراسم افتتاحیه		
https://www.aparat.com/dashboard/videostat/YHG3	سخنرانی جناب آقای دکتر مهدی قاسمیه		۱۰
https://www.aparat.com/dashboard/videostat/O5jre	سخنرانی جناب آقای دکتر مسعود تابش	دومین همایش	
https://www.aparat.com/dashboard/videostat/Ovg0e	سخنرانی جناب آقای دکتر مسعود تجریشی	ملی کیفیت	
https://www.aparat.com/v/Zz6aS	سخنرانی سرکار خانم دکتر سمیه رفیعی	آب و چهارمین	
https://www.aparat.com/dashboard/videostat/Gs89r	مراسم تجلیل از پیشکسوتان برگزیده	همایش ملی	
https://www.aparat.com/v/jBUwJ	نشست تخصصی اول؛ بررسی چالش‌ها و پیامدهای تغییر اقلیم و مداخلات انسانی بر کیفیت آب	مدیریت	
https://www.aparat.com/v/eotT5	نشست تخصصی دوم؛ مدیریت بهینه مصرف آب با رویکرد الزام صنایع به استفاده از پساب	مصرف آب با	
https://www.aparat.com/v/qOUfO	نشست تخصصی سوم؛ راه‌کار و چالش‌های سرمایه‌گذاری در کاهش هدررفت آب در سامانه‌های آبرسانی	رویکرد کاهش	
https://www.aparat.com/v/GDMw7	کلینیک صنعت اول: طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع آب و مدیریت مصرف	هدررفت و	
https://www.aparat.com/v/HuZRi	کلینیک صنعت دوم: کیفیت آب و پساب	بازیافت	
https://www.aparat.com/v/nCJ0p	کلینیک صنعت سوم: تصفیه و بازچرخانی فاضلاب شهری و صنعتی	(۱۴۰۲)	
https://www.aparat.com/v/j90wr	مراسم اختتامیه		

کنفرانس‌های داخلی

عنوان کنفرانس	برگزارکنندگان	محل برگزاری	تاریخ برگزاری	سایت کنفرانس
چهاردهمین کنگره ملی مهندسی عمران	دانشگاه زنجان	زنجان	۱ تا ۲ خرداد ۱۴۰۳	https://14ncee.ir/
بیست و سومین کنفرانس هیدرولیک ایران	انجمن هیدرولیک ایران - دانشگاه رازی کرمانشاه	کرمانشاه	۹ تا ۱۰ آبان ۱۴۰۳	https://conf.iha.ir/
پنجمین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران	انجمن آب و فاضلاب ایران - دانشگاه اصفهان	اصفهان	۶ الی ۸ آذرماه ۱۴۰۳	/https://iwwa-conf.ir

کنفرانس‌های خارجی

عنوان کنفرانس	محل برگزاری	تاریخ برگزاری	سایت کنفرانس
4th International Conference Waters in Sensitive and Protected Areas – Supported	Pula, Croatia	10 – 13 April 2024	https://www.wspa2024.org/english-index.php
Water Loss 2024	San Sebastian, Spain	14 – 17 April 2024	https://www.waterloss2024.org/
Water Management in Changing Conditions – Supported	Munich, Germany	14 – 15 May 2024	https://wmcc2024.net/
IWA Conference on Sustainable Sludge Management	Beijing, China	17 – 20 May 2024	https://iwa-sludge-2024.casconf.cn/
15th International Conference on Hydroinformatics HIC 2024 – From Nature to Digital Water: challenges and opportunities	Beijing, China	27 – 31 May 2024	https://hic2024.scimeeting.cn/en/web/index/1661
18th IWA World Conference on Anaerobic Digestion	Istanbul, Turkey	2 – 6 June 2024	https://iwa-ad18.org/
International Conference on Urban Drainage 2024	Delft, Netherlands	9 – 14 June 2024	https://icud2024.org/
13th IWA Micropol and Ecohazard Conference	Taipei, Chinese Taipei	16 – 20 June 2024	https://iwa2024micropol.org/
YWP European Conference 2024	Copenhagen, Denmark	16 – 19 June 2024	https://ywpeur2024.com/
International Conference On Wider- Uptake Of Water Resource Recovery From Wastewater Treatment – Supported	Palermo, Italy	18 – 21 June 2024	https://icwrr2024.org/
IWA Regional Membrane Technology Conference (supported)	Palermo, Italy	18 – 21 June 2024	https://icwrr2024.org/
LET2024: 19th IWA Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies	Essen, Germany	24 – 28 June 2024	http://iwa-let.org/
IWA World Water Congress & Exhibition, August 2024	Toronto, Canada	11 – 15 August 2024	https://worldwatercongress.org/
10th IWA Odour and Air Emission Conference	Tasmania, Australia	25 – 28 August 2024	https://odourconference2024.com/
IWA 14th Specialized Conference on the Design, Operation and Economics of Large Wastewater Treatment Plants, Budapest 2024	Budapest, Hungary	11 – 15 September 2024	https://lwwtp2024.org/
Water in Industry 2024	Nanjing, China	23 – 27 September 2024	https://www.iwa-win.org/
4th International Conference on Disinfection and DBPs	Almeria, Spain	7 – 10 October 2024	https://iwa-network.org/events/4th-international-conference-on-disinfection-and-dbps/
17th Small Water and Wastewater Systems and 9th Resource Oriented Sanitation	Curitiba, Brazil	7 – 10 November 2024	https://www.swwsrosconference2024.org/
Nutrient Removal and Recovery Conference 2024	Brisbane, Australia	17 – 21 November 2024	https://uqevents.eventsair.com/nrr24/

لوگو	سطح عضویت	نام شرکت
 <p>آبساران مهندسين مشاور Absaran Consulting Engineers www.absaran-co.ir</p>	الماسی	مهندسين مشاور آبساران
 <p>شرکت فناور ایمن لوتوس</p>	طلایی	فناور ایمن لوتوس
 <p>طوس آب شرکت مهندسی مشاور</p>	طلایی	مهندسی مشاور طوس آب
 <p>TAVANA</p>	طلایی	شرکت مهندسی خطوط لوله توانا
 <p>مهندسین مشاور یکم</p>	برنزی	مهندسین مشاور یکم
 <p>ABRAM ETTESAL</p>	برنزی	آبان بسپار پارسیان
 <p>MGET فراگیر انرژی و پالایش مادیار Madyar Global Energy And Water Treatmet Co</p>	برنزی	فراگیر انرژی و پالایش مادیار

 <p>هیپیکو Hapico</p>	<p>برنزی</p>	<p>خط لوله هامون (هیپیکو)</p>
	<p>برنزی</p>	<p>مهندسين مشاور طرح و تحقیقات اصفهان</p>
 <p>Sanjesh Afzar Asia Co. Ltd.</p>	<p>برنزی</p>	<p>سنجش افزار آسیا</p>
 <p>مهندسين مشاور آبران</p>	<p>برنزی</p>	<p>مهندسين مشاور آبران</p>
 <p>شرکت آب و فاضلاب آذربایجان شرقی</p>	<p>برنزی</p>	<p>آب و فاضلاب آذربایجان شرقی</p>
 <p>مهندسين مشاور آینده میترا</p>	<p>برنزی</p>	<p>مهندسين مشاور آینده میترا</p>
 <p>Persia Optimized Designing شرکت بهینه طراحی پرشیا</p>	<p>برنزی</p>	<p>بهینه طراحی پرشیا</p>
 <p>گوه مینا شرکت مهندسی و ساخت بویلر و تجهیزات مینا</p>	<p>برنزی</p>	<p>شرکت مهندسی و ساخت بویلر و تجهیزات مینا</p>
 <p>شرکت مهندسين مشاور آب سو</p>	<p>برنزی</p>	<p>شرکت مهندسين مشاور آب سو</p>

<p>شرکت مهندسی خطوط لوله توانا (سطح عضویت طلابی)</p> <p>شرکت مهندسی خطوط لوله توانا با بیش از ۲۰ سال سابقه در زمینه‌های کنترل خوردگی، تولید تجهیزات حفاظت کاتدی، تولید پوشش‌های عایقی خطوط لوله فولادی، مخازن و اسکله‌ها با اخذ رتبه ۲ شرکت دانش‌بنیان برای دو محصول، در راستای تحقق اهداف شرکت و ارائه خدمات مهندسی ارزنده به صنعت کشور در مجموعه کارخانجات خود به مساحت ۱۷۵۰۰ مترمربع اقدام به تولید و ساخت محصولات کلیدی ذیل مورد مصرف در پروژه‌های احداث خطوط لوله فولادی نموده است:</p> <ul style="list-style-type: none"> - نوار عایق انقباضی حرارتی سرجوش (HSS) خطوط لوله با پوشش اصلی 3LPE و FBE - انواع نوارهای سرد و گرم مخصوص خطوط لوله فولادی و پوشش‌های پترولاتیوم مخصوص اتصالات - پوشش‌های اپوکسی دو جزئی مخصوص سرجوش خطوط لوله با پوشش FBE - مشاوره، طراحی سیستم‌های حفاظت کاتدی و ساخت انواع رکتیفایرهای حفاظت کاتدی - ساخت و تولید آندهای سیلیکون، انواع آندهای MMO، آندهای منیزیم، روی و آلومینیوم - تولید راکشیلد محافظ پوشش خطوط لوله 	
<p>شرکت مهندسی و ساخت بویلر و تجهیزات مپنا (سطح عضویت برنزی)</p> <p>شرکت مهندسی و ساخت بویلر و تجهیزات مپنا، شرکتی است دانش‌بنیان و توانمند که در زمینه طراحی، تامین، ساخت، نصب و راه‌اندازی انواع بویلرهای بازیافت حرارتی/ تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP)، واتر تیوب (پکیج/ صنعتی/ نیروگاهی) و تجهیزات جانبی مرتبط در بخش‌های نیرو، نفت و گاز، پتروشیمی، آب و سایر صنایع در بازارهای داخلی و خارجی به صورت EP و EPC فعالیت می‌کند. این شرکت براساس اعتقاد به مسئولیت‌های اجتماعی، اقدام به ارزش آفرینی برای کلیه ذی‌نفعان نموده و پاسخگویی اجتماعی، پویایی اقتصادی و پایداری محیط‌زیستی را سرلوحه فعالیت‌های خود در جهت توسعه پایدار قرارداده است و در راستای منافع ملی گام برمی‌دارد. در راستای سیاست‌های کشور و اهداف برنامه‌های توسعه در زمینه طراحی و ساخت بویلرهای بازیافت حرارتی (HRSG) در سال ۱۳۸۲ قرارداد انتقال دانش فنی با شرکت DOOSAN کره جنوبی منعقد شد و با اتکا به آن تاکنون بیش از ۱۶۰ دستگاه بویلر بازیافت حرارتی مورد بهره‌برداری یا در دست اجرا قرار گرفته است. هم‌چنین در حوزه بویلرهای صنعتی بعد از همکاری‌های انجام شده با شرکت‌های Macci ایتالیا و Thermodesign کانادا به فناوری طراحی، تولید، نصب و راه‌اندازی بویلرهای صنعتی دست‌یافته و تاکنون بیش از ۴۰ دستگاه بویلر مورد بهره‌برداری یا در دست اجرا دارد. به‌منظور برآورده ساختن نیازهای جدید بازار برق، این شرکت در سال ۱۳۹۵ قراردادی را برای انتقال تکنولوژی و لیسانس بویلرهای بازیافت حرارتی با ظرفیت بالا برای نصب در پایین‌دست توربین‌های گاز کلاس F.H و بالاتر با شرکت صاحب نام John Cockerill (CMI) بلژیک منعقد کرد و تنها شرکتی در کشور است که این دانش را در اختیار دارد. هم‌چنین این شرکت در حوزه تامین آب شرب و صنعتی، طراحی، تامین، ساخت، نصب و راه‌اندازی سیستم‌های پیش تصفیه، تصفیه و شیرین‌سازی با فناوری‌های غشایی از جمله RO و EDI را نیز در گروه مپنا برعهده داشته و آمادگی ارائه پیشنهاد رقابتی به مشتریان را در این زمینه داراست و هم‌اکنون بیش از ۱۱۰ هزار مترمکعب پروژه تصفیه آب در دست بهره‌برداری یا اجرا دارد.</p>	



شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان



انجمن آب و فاضلاب ایران

کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

5th IRAN WATER & Wastewater Science Engineering Congress

26-28 November 2024 Isfahan-Iran



دانشگاه اصفهان

۶ الی ۸ آذرماه ۱۴۰۳

مهلت ارسال مقاله کامل: ۵ مهرماه ۱۴۰۳



www.iwwa-conf.ir



irwwa.conf@gmail.com



[Instagram.com/irwwa.ir](https://www.instagram.com/irwwa.ir)



t.me/iwwa_conf



۰۳۱-۳۷۹۳۲۶۷۷



۰۳۱-۳۷۹۳۲۶۷۷

محورهای کنگره:

محور ویژه: فرونشست زمین و چالش های آن

- تامین، تصفیه، انتقال، توزیع و بازچرخانی آب
- جمع آوری و تصفیه فاضلاب و رواناب
- بهره برداری از تاسیسات آب و فاضلاب و خدمات مشترکین
- چالش های کمی و کیفی نمک زدایی و انتقال آب دریا
- فناوری های نوین در صنعت آب و فاضلاب
- هوشمندسازی، مدیریت هدررفت، مصرف آب و انرژی و سازگاری با کم آبی
- مدیریت منابع آب و استفاده از آب های نامتعارف
- تاب آوری تاسیسات آب و فاضلاب و پدافند غیرعامل
- بهره وری، مهندسی ارزش و مدیریت منابع انسانی و مالی
- آموزش و رویکردهای اجتماعی و فرهنگی در مدیریت آب شهری
- تدوین استانداردها، ضوابط و تجارب بومی در صنعت آب و فاضلاب
- اقتصاد آب و پساب، بازار و تجارت آلودگی

دبیرخانه: اصفهان، بلوار هزارجریب، دانشگاه اصفهان،

ساختمان شماره ۳ دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل



irwwa.ir

Sponsored and Indexed by
CIVILICA
We Respect the Science



iwwa-conf.ir



فراخوان نهمین دوره انتخاب پایان نامه برتر

۹

ویژه دانش آموختگان سال های ۱۴۰۰ به بعد



انجمن آب و فاضلاب ایران در نظر دارد در نهمین دوره برگزاری مسابقات پایان نامه برتر، به منظور ترویج تحقیقات بنیادی و کاربردی در حوزه علوم و مهندسی آب و فاضلاب، پایان نامه های برتر در "مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری" را با اهدای **لوح تقدیر و جوایز نفیس** مورد تشویق قرار دهد.

از علاقه مندان دعوت می شود تا برای شرکت در مسابقه، **حداکثر تا تاریخ ۲۰ مهرماه ۱۴۰۳** با مراجعه به سایت انجمن به نشانی **IRWWA.IR**، اقدام به دریافت فرم شرکت در مسابقه نموده و پس از تکمیل، فرم مربوطه را همراه با فایل پایان نامه و مقالات منتشر شده ISI و علمی-پژوهشی خود، به آدرس ایمیل مسابقات انجمن به نشانی "**irwwa.competitions@gmail.com**" ارسال نمایند.

جوایز نفرات اول تا سوم در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری، همزمان با برگزاری

"پنجمین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران"

که از ۶ تا ۸ آذرماه ۱۴۰۳ در دانشگاه اصفهان برگزار می شود، اعطا می شود.



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.

نوع	مبلغ (ریال)
حق عضویت با تاخیر سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ (به‌ازای هر سال)	۹۰۰۰۰۰
حق عضویت دو ساله (۱۴۰۳ - ۱۴۰۴)	۲۷۵۰۰۰۰
حق عضویت چهار ساله (۱۴۰۳ - ۱۴۰۶)	۴۵۰۰۰۰۰
حق عضویت دو ساله دانشجویی (۱۴۰۳ - ۱۴۰۴)	۱۸۰۰۰۰۰
عضویت دائمی	۱۶۰۰۰۰۰۰

نوع	مبلغ (ریال)
۱ صفحه در یک شماره	۱۵۰۰۰۰۰۰
۲ صفحه در یک شماره	۳۰۰۰۰۰۰۰
۱ صفحه در چهار شماره پیاپی*	۶۰۰۰۰۰۰۰
۲ صفحه در چهار شماره پیاپی*	۹۰۰۰۰۰۰۰

* شامل یک‌سال عضویت حقوقی انجمن

شماره حساب: ۱۳۵۷۲۰۶۲۳

شماره شبا: IR930180000000000135720623

شماره کارت مجازی: ۵۸۵۹-۸۳۷۰-۰۹۹۰-۳۱۰۱

بانک تجارت شعبه دانشگاه (کد ۱۸۶) به‌نام انجمن آب و فاضلاب ایران
 لطفا اسکن فیش واریزی را به ایمیل انجمن (info@irwwa.ir) ارسال فرمایید.

جدول مزایای اعضای حقوقی طرح جدید

الماسی (سالانه ۱۵)	طلایی (سالانه ۱۲)	نقره‌ای (سالانه ۹)	برنزی (سالانه ۶)	سطح عضویت (مبلغ پرداختی)	مزایای عضویت
میلیون تومان)	میلیون تومان)	میلیون تومان)	میلیون تومان)	دریافت اعتبار یک‌ساله (نحوه استفاده از اعتبار دریافتی، در ذیل جدول شرح داده می‌شود)	
میلیون تومان	میلیون تومان	میلیون تومان	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 کنفرانس‌های سالانه انجمن در مدت زمان عضویت (در صورت داشتن اعتبار، مبلغ اجاره غرفه از اعتبار کسر خواهد شد)	*
*	*	*	*	امکان انتقال نیمی از اعتبار باقیمانده به سال آینده (در صورت تمدید عضویت)	*
*	*	*	*	امکان برگزاری کارگاه و وبینار کاربردی (براساس پروژه‌ها 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

سطح عضویت حقوقی				عضو حقیقی	مزایای عضویت
الماسی	طلایی	نقره‌ای	برنزی		
٪۲۰	٪۱۵	٪۱۰	٪۵	٪۲۰	تخفیف شرکت در همایش‌های انجمن
٪۲۰	٪۱۵	٪۱۰	٪۵	-	تخفیف شرکت در نمایشگاه‌های انجمن
٪۲۰	٪۱۵	٪۱۰	٪۵	٪۲۰	تخفیف شرکت در دوره‌های آموزشی انجمن
٪۲۰	٪۱۵	٪۱۰	٪۵	٪۲۰	تخفیف شرکت در کارگاه‌ها و بازدیدهای انجمن
٪۲۰	٪۱۵	٪۱۰	٪۵	-	تخفیف چاپ مقالات در مجلات انجمن
٪۲۰	٪۲۰	٪۲۰	٪۲۰	-	تخفیف چاپ آگهی 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 به‌هیچ‌عنوان 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 تصفیه‌خانه 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

فیش آن را به همراه فایل‌های مقاله در سایت نشریه بارگزاری کنند.

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/>

❖ تذکر مهم:

براساس مصوبه هیئت تحریریه و تایید هیئت مدیره انجمن آب و فاضلاب ایران، کلیه مقالاتی که از ابتدای سال ۱۴۰۳ به مجله ارسال می شود باید مبلغ دو میلیون و پانصد هزار ریال برای هزینه پردازش اولیه و مبلغ چهار میلیون ریال برای هزینه انتشار به شماره کارت: ۰۹۹۰-۳۱۰۱-۸۳۷۰-۵۸۵۹ به نام انجمن آب و فاضلاب ایران در بانک تجارت شعبه دانشگاه (کد ۱۸۶) واریز و

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering

Vol. 8, No. 4, Winter 2024

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: Haghghi, 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
Talebeydokhti, 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



Industrial Water and Wastewater Policy Council:

Amini, H. (Ph.D.): Managing Director, National Water and Wastewater Engineering Company (NWWEC)
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, NWWEC
Honari, H. (M.Sc.): Retired Faculty Member, Tehran University of Medical Science
Salamat, A. (Ph.D.): Deputy of Human Resources and Support, NWWEC

Editorial Staff: Akhtari, N.
Graphic Designer: Shahangian, S.A. (Ph.D.)
Page Setting: Akhtari, N.
Publisher: Iran Water and Wastewater Association (IWWA)
Address: No. 7, 4th Floor, 429 Taleghani Street, Tehran, Iran
Tel: +98 21 88956097
Fax: +98 21 88391390
Print ISSN: 2588-3941
Online ISSM: 2588-396X
E-Mail: info@jwwse.ir



ISSN 2588-3941

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering

Volume 8, No. 4, Winter 2024

Preface (Consequences of Climate Change on Drinking Water Services) Majid Ghannadi	2
<u>Papers</u>	
Investigation of Arsenic Removal from Drinking Water Using Alum Coagulant Sina Karimi, Hadi Ramezani Etedali and Abbas Sotoodehnia	4
Grey Water Quantity and Quality Assessment (Case Study: Isfahan University Dormitories) Shervin Jamshidi and Ali Dehnavi	11
Investigating the Effect of the Sizes of CuO Nanomaterials on Improving the Water Flux and Antifouling Properties of PVDF Nanocomposite Ultrafiltration Membrane in Urban Wastewater Treatment Mahyar Pakan, Maryam Mirabi and Alireza Valipour	22
Redevelopment of BSM1 Model to Model the Wastewater Treatment System of Carousel Oxidation (Case Study: South Tehran Wastewater Treatment Plant) Sara Nazif, Yaser Khatibi, Anahita Pourmohamadi and Ali Khajavian	35
Optimizing and Investigating the Removal of Deltamethrin Pesticide from Aqueous Environments by AC/Fe₃O₄ Magnetic Activated Carbon Composite using Response Surface RSM-BBD Method Hossein Rasouli and Reza Mohammadi	51
Evaluating Maintenance Strategies of Service Companies' Physical Assets with a Green Approach Using the Fuzzy Hierarchical Analysis Method (Case Study: Water and Waste Water Company of Tehran Province) Reza Shahrjardi and Mostafa Gurbanpour Delivand	70
<u>General Section</u>	
Interview (Eng. Abbas Shafiei)	85
Book Presentation	96
IWWA News	97