



ISSN 2588-3941

نشریه علمی

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

سال یازدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵

نشریه علمی

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

سال یازدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵

انجمن آب و فاضلاب ایران

- ۲ پیشگفتار (از آب‌شناسی تا امنیت آبی، چرا ایران باید در نهمین فاز برنامه آب‌شناسی یونسکو نقش آفرین باشد؟)
دکتر محمدحسین صراف‌زاده

مقالات علمی

- ۴ مروری بر انواع مدل‌های برآورد نشت زمینه در شبکه‌های توزیع آب
بی‌تا حیدری، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده و ایمان مصلحی
- ۱۷ پیش‌بینی شکست لوله‌ها با مدل رگرسیون لجستیک وزن‌دار برای مدیریت داده‌های نامتعادل و رویدادهای مکرر
(مطالعه موردی: منطقه ۲ شهری تهران)
محسن ستاری و همایون مطیعی
- ۳۱ بررسی کارایی منعقدکننده‌های کلروفریک و پلی‌آلومینیوم کلراید در حذف آرسنیک از آب آلوده در حضور غلظت‌های مختلف کمک منعقدکننده
توران آقاعلی‌زاده، بهزاد کوهی و مهدی میرزاحمدی
- ۴۱ ارائه الگوی توسعه پایدار سازمانی در صنعت آب و فاضلاب: مرور تحلیلی براساس تجارب شرکت آب و فاضلاب مشهد
محمد حسینی، محمد طلعتی، علی سلامی کوچه‌باغ، مسعود عبدالله‌پور، فریبا قنبری و سمانه توکلی امینیان
- ۵۹ تحلیل محتوای پیام‌های نوشتاری مدیریت مصرف آب تهران: تکنیک‌های اقناعی، قاب‌بندی و راه‌کارمحوری
زهرا مهری، باقر ساروخانی، یوسف خجیر و امیدعلی مسعودی
- ۷۶ بررسی کارایی نانوجاذب مزومتخلخل SBA-15 نشانده‌شده بر روی کیتوسان در حذف رنگ متیل اورانژ از محلول‌های آبی
سارا مهری، محمدصالح شفیعیان و محمد حبیبی جویباری

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

سال ۱۱، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵

این نشریه دارای مجوز کمیسیون بررسی نشریات علمی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، به شماره ۱۲۹/۳۱۸/۲۹۰ مورخ ۱۳۹۵/۱۲/۱۶ و مجوز وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی به شماره ۸۶۰۹۲ مورخ ۱۳۹۸/۱۰/۳۰ است.

انجمن آب و فاضلاب ایران

دکتر مسعود تابش

دکتر علی حقیقی

صاحب امتیاز

مدیر مسئول

سر دبیر

اعضای

هیئت تحریریه



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

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

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

شورای سیاستگذاری

صنعت آب و فاضلاب

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

کارشناس اجرایی:

طراح و صفحه آرا:

ناشر:

آدرس:

تلفن:

نمابر:

شاپا چاپی:

شاپا الکترونیکی:

ایمیل:

پیشگفتار (از آب شناسی تا امنیت آبی، چرا ایران باید در نهمین فاز برنامه آب شناسی یونسکو نقش آفرین باشد؟)..... ۲
دکتر محمدحسین صرافزاده

مقالات علمی

مروری بر انواع مدل های برآورد نشت زمینه در شبکه های توزیع آب ۴
بیبا حیدری، محمدرضا جلیلی قاضی زاده و ایمان مصلحی

پیش بینی شکست لوله ها با مدل رگرسیون لجستیک وزن دار برای مدیریت داده های نامتعادل و رویدادهای مکرر..... ۱۷
(مطالعه موردی: منطقه ۲ شهری تهران)
محسن ستاری و همایون مطیعی

بررسی کارایی منعقدکننده های کلروفریک و پلی آلومینیوم کلراید در حذف آرسنیک از آب آلوده در..... ۳۱
حضور غلظت های مختلف کمک منعقدکننده
توران آقاعلیزاده، بهزاد کوهی و مهدی میرزاحمدی

ارائه الگوی توسعه پایدار سازمانی در صنعت آب و فاضلاب: مرور تحلیلی..... ۴۱
براساس تجارب شرکت آب و فاضلاب مشهد
محمد حسینی، محمد طلعتی، علی سلامی کوچه باغ، مسعود عبدالله پور، فریبا قنبری و سمانه توکلی امینیان

تحلیل محتوای پیام های نوشتاری مدیریت مصرف آب تهران: تکنیک های اقناعی، قاب بندی و راه کارمحوری..... ۵۹
زهرامهری، باقر ساروخانی، یوسف خجیر و امیدعلی مسعودی

بررسی کارایی نانوجاذب مزومتخلخل SBA-15 نشانده شده بر روی کیتوسان در..... ۷۶
حذف رنگ متیل اورانژ از محلول های آبی
سارا مهری، محمد صالح شفیعیان و محمد حبیبی جویباری



از آب‌شناسی تا امنیت آبی، چرا ایران باید در نهمین فاز برنامه آب‌شناسی یونسکو نقش‌آفرین باشد؟



دکتر محمدحسین صراف‌زاده
رئیس کرسی یونسکو در بازیافت آب و
استاد دانشکده مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی،
دانشگاه تهران

آب را شاید بتوان یکی از محدود موضوعاتی دانست که هم‌زمان یک موضوع علمی، فناورانه، اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی و حتی ژئوپلیتیکی است. پیچیدگی مسائل امروز آب نیز دقیقاً از همین درهم‌تنیدگی ناشی می‌شود. دیگر نمی‌توان کم‌آبی، آلودگی، افت آب‌های زیرزمینی، خشکسالی، سیلاب، تغییر اقلیم، مصرف شهری و صنعتی و امنیت غذایی را به‌صورت مسائل جدا از یکدیگر بررسی کرد. این تحول در نگاه به آب را می‌توان به‌خوبی در مسیر تکامل برنامه آب‌شناسی یونسکو مشاهده کرد. برنامه آب‌شناسی یونسکو (Intergovernmental Hydrological Programme - IHP) تنها برنامه بین‌دولتی در نظام ملل متحد است که به‌طور اختصاصی بر پژوهش، مدیریت آب، آموزش و ظرفیت‌سازی در حوزه آب متمرکز است. این برنامه در امتداد "دهه بین‌المللی آب‌شناسی" (۱۹۶۵-۱۹۷۴) شکل گرفت و از سال ۱۹۷۵ تاکنون، یکی از مهم‌ترین بسترهای همکاری علمی بین‌المللی در حوزه آب بوده است.

برای ایران، این تاریخ صرفاً یک روایت بین‌المللی نیست؛ بخشی از تاریخ علمی کشور نیز با آن گره خورده است. ایران از همان سال‌های آغازین دهه بین‌المللی آب‌شناسی در توسعه دانش و ظرفیت‌های آب‌شناسی کشور فعال بوده و تأسیس نهادهای تخصصی آب‌شناسی در میانه دهه ۱۳۴۰، از جمله در ارتباط با

شکل‌گیری جریان علمی آب‌شناسی نوین در کشور، نشان‌دهنده قدمت این مسیر است هم‌چون تأسیس موسسه آب‌شناسی در سال ۱۳۴۴ خورشیدی در دانشگاه تهران. این پیشینه تاریخی، در کنار ظرفیت امروز دانشگاه‌ها، پژوهشگاه‌ها و دستگاه‌های اجرایی کشور، می‌تواند پشتوانه‌ای برای حضور فعال‌تر ایران در آینده IHP باشد.

برنامه آب‌شناسی یونسکو از شناخت چرخه آب تا ساختن جهان امن آبی

تحول تاریخی IHP را می‌توان نوعی گذار از "شناخت آب" به "مدیریت و حکمرانی آب" دانست. در مراحل نخست، تمرکز اصلی بر توسعه دانش پایه، مشاهده و اندازه‌گیری فرایندهای هیدرولوژیک و شناخت منابع آب بود. به تدریج، مسائل کیفیت آب، منابع آب زیرزمینی، مخاطرات آبی، تغییر اقلیم، اکوسیستم‌ها، آموزش و ظرفیت‌سازی وارد دستور کار شدند و امروز آب در ارتباط با اقتصاد، جامعه، انرژی، غذا، سلامت و محیط‌زیست مورد توجه قرار می‌گیرد. این تحول به‌خوبی در فاز نهم (IHP-IX)، (۲۰۲۲-۲۰۲۹) نمایان است. عنوان این فاز، علم برای جهانی با امنیت آبی در محیطی متغیر (Science for a Water Secure World in a Changing Environment) است و برخلاف رویکردهای بخشی گذشته، بر ماهیت فرایختی و درهم‌تنیده مسائل آب تأکید دارد. یونسکو IHP-IX را یک رویکرد روش‌شناختی به‌سوی transdisciplinary برای تولید راه‌حل در یک جهان پیچیده و متغیر معرفی می‌کند. پنج محور اولویت‌دار این فاز شامل پژوهش و نوآوری علمی؛ آموزش آب در عصر انقلاب صنعتی چهارم و پایداری؛ پر کردن شکاف داده و دانش؛ مدیریت یکپارچه منابع آب در شرایط تغییر جهانی؛ و حکمرانی آب مبتنی بر علم برای کاهش اثرات، سازگاری و تاب‌آوری است. در واقع، پیام IHP-IX روشن است: برای حل مسئله آب نمی‌توان تنها "فناوری تصفیه" یا "مدل هیدرولوژیک" تولید کرد؛ باید علم، فناوری، داده، آموزش، جامعه، اقتصاد و سیاست‌گذاری را در یک چارچوب یکپارچه قرار داد.

چرا IHP-IX برای ایران اهمیت ویژه‌ای دارد؟

این رویکرد با شرایط امروز ایران انطباق قابل توجهی دارد. افت ذخایر آب زیرزمینی، فرونشست زمین، کاهش جریان‌های سطحی، آلودگی منابع، خشکسالی‌های متوالی، سیلاب‌های ناگهانی، افزایش تقاضای آب و چالش تأمین آب برای شهرها، کشاورزی و صنعت، همگی مسائلی هستند که راه‌حل آنها در یک رشته یا یک دستگاه اجرایی خلاصه نمی‌شود. برای ایران، IHP-IX می‌تواند بیش از یک چارچوب پژوهشی بین‌المللی باشد؛

اجرایی، شرکت‌های دانش‌بنیان، صنعت، جامعه مدنی و به‌ویژه نسل جدید پژوهشگران باید بتوانند در این شبکه جهانی تولید و تبادل دانش نقش ایفا کنند. ایران نه تنها مصرف‌کننده دانش جهانی آب، بلکه با توجه به تجربه تاریخی، ظرفیت علمی و شرایط منحصربه‌فرد اقلیمی خود، می‌تواند تولیدکننده دانش و تجربه برای سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان نیز باشد. شاید یکی از مهم‌ترین درس‌های پنج دهه گذشته IHP همین باشد: مسئله آب را نمی‌توان با یک فناوری، یک رشته یا یک سازمان حل کرد. آینده آب در نقطه تلاقی علم، فناوری، جامعه و حکمرانی شکل می‌گیرد. اکنون که IHP در نهمین فاز خود به سر می‌برد، فرصت آن است که ایران نیز با تکیه بر سابقه تاریخی خود، ظرفیت دانشگاه‌ها و نهادهای علمی و تجربه کرسی‌ها و مراکز تخصصی، از یک عضو تاریخی برنامه به یک شریک فعال در تولید راه‌حل‌های آینده آب تبدیل شود.

می‌تواند بستری برای اتصال دانش ایرانی به شبکه جهانی آب، انتقال تجربه، توسعه ظرفیت انسانی، دسترسی به داده و دانش، شکل‌دهی پروژه‌های بین‌المللی و تبدیل پژوهش به سیاست و اقدام باشد. برنامه اجرایی IHP-IX شامل ۳۴ خروجی و حدود ۱۵۰ فعالیت کلیدی است و اجرای آن بر همکاری خانواده آبی یونسکو شامل دبیرخانه، کمیته‌های ملی IHP، مراکز، کرسی‌های یونسکو و شرکای بین‌المللی استوار است.

از این منظر، موضوعاتی مانند مدیریت و احیای آبخوان‌ها، استفاده از منابع آب نامتعارف، بازچرخانی و بازیافت آب، کاهش مصرف و افزایش بهره‌وری، مدیریت کیفیت آب، پایش آلاینده‌های نوظهور، راه‌کارهای طبیعت‌محور، پیوند آب-انرژی-غذا، دیجیتالی‌شدن مدیریت آب و استفاده از هوش مصنوعی در پایش و تصمیم‌گیری، همگی می‌توانند در قالب IHP-IX به پروژه‌های مشترک و اثرگذار منطقه‌ای و بین‌المللی تبدیل شوند.

در همین چارچوب، تجربه کرسی یونسکو در بازیافت آب دانشگاه تهران نیز می‌تواند نمونه‌ای از حرکت از یک موضوع تخصصی به سوی نگاه سیستمی به آب باشد. تمرکز کرسی بر بازچرخانی و استفاده مجدد از آب، منابع آب نامتعارف، فناوری‌های پیشرفته تصفیه، بهره‌وری آب و توسعه نظام Water Closed-Loop System در امتداد نگاه IHP-IX به آب به‌عنوان یک نظام به‌هم‌پیوسته قرار می‌گیرد. نظام مدار بسته آب، در حقیقت بخشی از تغییر پارادایم مورد نیاز امروز است: آب نباید پس از یک بار مصرف، به‌عنوان پسماند تلقی شود؛ بلکه باید امکان بازگشت آن به چرخه، متناسب با کیفیت مورد نیاز و با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی، محیط‌زیستی و بهداشتی بررسی شود. همین منطق را می‌توان به انرژی، مواد مغذی و سایر منابع موجود در جریان‌های فاضلاب نیز تعمیم داد.

فرصت ایران در مرحله‌ای تعیین‌کننده

امروز ایران با یک انتخاب مهم روبه‌رو است. می‌توان هم‌چنان با مسائل آب به‌صورت پروژه‌های پراکنده، بخشی و کوتاه‌مدت برخورد کرد؛ یا از ظرفیت شبکه‌های علمی بین‌المللی برای شکل‌دهی به یک برنامه بلندمدت، مبتنی بر علم و متناسب با شرایط اقلیمی و اجتماعی کشور استفاده کرد. IHP-IX دقیقاً در نقطه‌ای قرار دارد که چنین فرصتی را فراهم می‌کند. مدیریت یکپارچه منابع آب، علم و فناوری، داده، آموزش، حکمرانی و مشارکت ذی‌نفعان در این فاز از یکدیگر جدا نیستند.

از این‌رو، مشارکت فعال ایران نیازمند حضور نمایندگان کشور در جلسات این برنامه است. دانشگاه‌ها، پژوهشگاه‌ها، دستگاه‌های

Review Paper

مقاله مروری

A Review of Various Models for Estimating Background Leakage in Water Distribution Networks

مروری بر انواع مدل‌های برآورد نشت زمینه در شبکه‌های توزیع آب

Bita Heidari¹, Mohamad Reza Jalili Ghazizadeh^{2*} and Iman Moslehi³

بی‌تا حیدری^۱، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده^{۲*} و ایمان مصلحی^۳

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

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

2- Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

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

3- Ph.D., Faculty of Civil, Water and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

۳- دانش‌آموخته دکتر، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

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

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

Received: 20/01/2025

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

Revised: 16/11/2025

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵

Accepted: 10/12/2025

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

Leakage in water distribution networks is a major concern due to the considerable losses of water and energy it entails. Leakage is typically divided into three categories: reported, unreported, and background leakage. Background leakage originates from very fine cracks that cannot be detected through conventional leak detection or visual inspection. Because these leaks often remain undetected for extended periods, they can cause significant cumulative water losses. This study aims to provide a comprehensive review of background leakage rate models with respect to pressure and time in water distribution systems. A review of over 50 relevant studies revealed that more than half focused on pressure management as the most effective strategy to reduce background leakage, whereas less than one-third investigated the time-dependent growth of leakage rates. Despite its importance, temporal variation in background leakage has received limited attention in modeling studies, mainly due to challenges in estimating leakage growth rates and the scarcity of reliable data. Accordingly, this research reviews both pressure-based and time-dependent leakage models and discusses how these models can be applied to the analysis and management of water distribution networks.

نشت‌ها در شبکه‌های توزیع آب با توجه به اتلاف قابل توجه آب و انرژی، با اهمیت و پر هزینه هستند. انواع نشت به سه جزء گزارش شده، گزارش نشده و نشت زمینه طبقه‌بندی می‌شوند. نشت زمینه حاصل نشت از شکاف‌های بسیار ریز است که با روش‌های معمول نشت‌یابی یا بازرسی بصری قابل تشخیص نیستند و چون به مدت طولانی بدون شناسایی باقی می‌مانند منجر به تلفات آب قابل توجهی می‌شوند. هدف این پژوهش، بررسی جامع مدل‌های پیش‌بینی نرخ نشت زمینه در ارتباط با فشار و زمان در شبکه‌های آبرسانی است. براساس مرور بیش از ۵۰ مقاله مرتبط، نتایج نشان‌داد که بیش از ۵۰٪ مطالعات بر مدیریت فشار به‌عنوان مؤثرترین راه‌کار کاهش نشت زمینه تمرکز داشته‌اند، درحالی‌که کمتر از ۳۰٪ مقالات به نشت زمینه و نرخ افزایش آن با زمان پرداخته‌اند. علی‌رغم اهمیت این موضوع، عموماً بخاطر دشواری بودن تخمین نرخ نشت زمینه و عدم وجود داده‌های کافی، در مدل‌سازی‌ها کمتر به نرخ رشد نشت با زمان توجه شده است. بنابراین، در این مطالعه علاوه بر مرور مدل‌های مبتنی بر فشار، مدل‌هایی که تأثیر زمان را نیز در نظر گرفته‌اند بررسی شده و در نهایت، چگونگی به‌کارگیری این مدل‌ها در تحلیل شبکه‌های آبرسانی بررسی شده است.

Keywords: Background leakage, Pressure-leakage, Time-dependent leakage, Leakage modelling, Leakage management.

واژه‌های کلیدی: نشت زمینه، رابطه فشار-نشت، رابطه نشت-زمان، مدل‌سازی نشت، مدیریت نشت.

و تئوری تحلیل شده است. برآورد میزان نشت زمینه برای تعیین نشت اقتصادی بلندمدت علاوه بر فشار، تحت‌تأثیر پارامتر زمان نیز است که کمتر موردتوجه محققان قرار گرفته است. علی‌رغم اهمیت این موضوع عموماً به‌خاطر دشوار بودن تخمین نرخ نشت‌زمینه و عدم وجود داده‌های کافی، در مدل‌سازی‌ها کمتر به نرخ رشد نشت با زمان توجه شده است. بنابراین، در این مطالعه علاوه بر مرور مدل‌های مبتنی بر فشار، مدل‌هایی که تأثیر زمان را نیز در نظر گرفته‌اند بررسی شده و در نهایت، چگونگی ترکیب و به‌کارگیری این مدل‌ها در تحلیل شبکه‌های آبرسانی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- مدل‌های نشت زمینه

نشت زمینه ناشی از نشت‌هایی است که با روش‌های معمول نشت‌یابی قابل شناسایی نیستند. به‌خاطر جریان کم، این نوع نشت‌ها در طول زمان بدون شناسایی باقی می‌مانند و منجر به هدررفت مقدار زیاد آب در شبکه می‌شوند. نشت‌های قابل تشخیص که عموماً با شکستگی در لوله‌ها همراه است، نیز منجر به از دست رفتن آب می‌شود. با این حال، نشت‌های قابل تشخیص معمولاً با جداسازی و تعمیر لوله آسیب‌دیده، در زمان کوتاهی شناسایی و برطرف می‌شوند. بنابراین، اگرچه ممکن است آن‌ها به‌خاطر جریان بالا شناسایی و در نتیجه همراه با هدررفت مقدار زیادی آب به‌نظر برسند، اما چون در مدت زمان کوتاهی شناسایی و تعمیر می‌شوند آب هدررفته نسبتاً کم است (Lambert, 2002). با توجه به نقش تعیین‌کننده نشت زمینه در افزایش تلفات واقعی آب و تأثیر آن بر کارایی هیدرولیکی شبکه‌های توزیع، مطالعات متعددی به شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر این پدیده اختصاص یافته‌اند. در میان متغیرهای مؤثر، فشار هیدرولیکی و زمان از جمله عوامل کلیدی هستند که رفتار و نرخ نشت‌زمینه را به‌طور مستقیم تحت‌تأثیر قرار می‌دهند. بر این اساس، در بخش‌های پیش‌رو ابتدا تحقیقات مرتبط با تأثیر فشار بر نشت‌زمینه مرور می‌شود و در ادامه، مطالعات مربوط به روند تغییرات نشت‌زمینه در طول زمان مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲-۱- مدل‌های رشد نشت‌زمینه با فشار

اولین بار از یک معادله نوع روزنه برای توصیف رابطه فشار و نشت استفاده شد (Wiggert, 1968). با استفاده از معادله تورپچلی که از قانون بقای انرژی در سیالات قابل استخراج است، دبی نشت Q_i (m^3/s) از یک روزنه، به‌صورت معادله (۱) تعریف شد (Brater and King, 1996).

افزایش جهانی جمعیت و بهبود استانداردهای زندگی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تقاضا برای آب را در سال‌های اخیر تشدید کرده‌است و به‌طور هم‌زمان، تغییرات آب و هوایی، کمبود آب را به یک چالش جهانی مبدل کرده است. با این وجود تمام آب تولید شده به مصرف کنندگان نهایی نمی‌رسد و بخش قابل‌توجهی از این آب هدر می‌رود. این آب هدررفته به‌عنوان آب بدون درآمد (NRW)^۱ نامیده می‌شود (Wu et al., 2011). بخشی از حجم آب بدون درآمد را نشت تشکیل می‌دهد که می‌توان آن را به دو جزء اصلی تقسیم‌بندی کرد: نشت ناشی از شکستگی‌ها، که بیشتر به‌عنوان نشت گزارش شده و گزارش نشده طبقه‌بندی می‌شود و نشت زمینه. مقدار کل نشت ناشی از این شکستگی‌ها تحت‌تأثیر سرعتی است که محل شکستگی شناسایی و متعاقباً تعمیر می‌شود. بنابراین کنترل این مدت یا کنترل زمان اجرای تعمیر شکستگی، نشت را به حداقل می‌رساند. نشت‌زمینه، در واقع تجمع نشت‌هایی حاصل از اتصالات و شکاف‌هایی است که به‌صورت جداگانه و بسیار کوچک هستند که با بازرسی بصری یا صوتی با فناوری موجود نشت‌یابی قابل تشخیص نیستند. براساس مطالعات داده‌محور بر شکست و نشت شبکه‌های توزیع آب، عواملی نظیر شرایط و نوسانات فشار، نحوه مدیریت فشار، و نواحی اندازه‌گیری شده (DMA) می‌توانند به‌صورت غیرمستقیم بر تخمین مؤلفه‌های نشت به‌ویژه نشت زمینه تأثیرگذار باشند. این موضوع در پژوهش‌های بعدی نیز به‌عنوان یکی از پیش‌نیازهای اساسی برای پایش دقیق و تحلیل رشد زمانی نشت موردتوجه قرار گرفته است. در حال حاضر، نشت‌ها در شبکه‌های آبرسانی تقریباً در همه جا و شاید به تعداد بیشتر از آنچه واقعاً تصور می‌شود وجود دارد. نشت از مقدار بسیار کم حدود ۳-۷٪ آب تصفیه شده ورودی، در سیستم‌های آبرسانی که به‌خوبی نگهداری می‌شود، تا مقدار زیاد حدود ۵۰٪ در سیستم‌های آبرسانی که از نظر تعمیر و نگهداری در شرایط ضعیف‌تری هستند مشاهده می‌شود (Puust et al., 2010). نشت‌ها به‌دلایل مختلفی مانند هدررفت آب و مواد شیمیایی موردنیاز تصفیه، کاهش کیفیت آب، افزایش نیاز آبی، و افزایش مصرف انرژی موردنیاز برای تغذیه نشت‌ها، مهم و پرهزینه هستند.

این مقاله مروری جامع بر مدل‌های پیش‌بینی نرخ رشد نشت‌زمینه در ارتباط با فشار و زمان در شبکه‌های آبرسانی است. با توجه به وابستگی مستقیم نشت زمینه به فشار، در بسیاری از مطالعات، نشت به‌صورت تابعی از فشار و در قالب مدل‌های تجربی

$$Q_{Li} = C_{Li} L_i h_i^{leak} \quad (4)$$

که C_{Li} : ضریبی است که رابطه بین نشت به ازای طول لوله نسبت به فشار را نشان می‌دهد و به مشخصات سیستم مانند عمر لوله و شرایط خاک اطراف آن بستگی دارد، L_i : طول لوله است و h_i^{leak} : متوسط فشار در لوله فوق به صورت معادله (۵) محاسبه می‌شود (Jowitt and Xu, 1990).

$$h_i^{leak} = \frac{H_{i1} + H_{i2} - z_{i1} - z_{i2}}{2} \quad (5)$$

که z_i : ارتفاع سطح زمین در گره i و H_i : فشار در گره i است. عموماً محاسبه میزان نشت زمینه در یک شبکه توزیع آب به علت نامرئی بودن آن کار دشواری است. لذا اولین بار در سال ۱۹۹۶ مفهوم تئوری تخمین تلفات ناشی از شکستگی‌ها و نشت‌های زمینه (BABA) ارائه شد و هدف آن برآورد مولفه‌های نشت از شبکه براساس مقادیر متوسط جمع‌بندی شده از داده‌های جمع‌آوری شده قبلی بود. در این روش، نشت زمینه خطوط اصلی از معادله (۶) محاسبه می‌شود (Lambert and Morrison, 1996).

$$Q_L = q_{leak} \times \left(\frac{P_{ave}}{50}\right)^\alpha \times L \quad (6)$$

که q_{leak} : نرخ نشت از خطوط اصلی برحسب لیتر بر کیلومتر بر ساعت است و از مقادیر جدول ۱ به دست می‌آید، L : طول خط لوله اصلی برحسب کیلومتر، α توان فشار و P_{ave} : فشار متوسط سیستم برحسب متر است (تابش، ۱۳۹۴).

جدول ۱- مقادیر پیشنهاد شده برای نرخ نشت زمینه در فشار استاندارد ۵۰ متر (تابش، ۱۳۹۵)

شرایط زیرساخت خوب	شرایط زیرساخت متوسط	شرایط زیرساخت بد	واحد	مولفه‌های نشت زمینه
۲۰	۴۰	۶۰	لیتر بر کیلومتر بر ساعت	نشت زمینه در خطوط اصلی
۱/۵	۳	۴/۵	لیتر بر انشعاب بر ساعت	نشت زمینه در انشعاب مشترکین
۰/۵	۱	۱/۵	لیتر بر مشترک بر ساعت	نشت زمینه در لوله‌های درون اشتراک

رابطه خطی بین جریان و فشار می‌شود (Idelchik, 1994). در سال ۱۹۹۴ پیشنهاد شد که نشت در مواد منعطف دارای توان نشت ۱/۵ است و با ترکیب آن در معادله روزنه، یک معادله نشت جدید به صورت معادله (۷) ارائه شد (May, 1994).

$$Q_L = k_1 h^{0.5} + k_2 h^{1.5} \quad (7)$$

مقاله May (1994) بسیار تأثیرگذار شد زیرا طیف گسترده‌ای از روابط جریان/ فشار نشت اندازه‌گیری شده در بریتانیا و در سطح بین‌المللی را توضیح داد که منجر به توسعه مفهومی به نام دبی‌های منافذ ثابت و متغیر (FAVAD) به صورت معادله (۸) شد (Lambert, 2002).

$$Q_L = C_q A \sqrt{2gh} \quad (1)$$

که A : مساحت روزنه (m^2)، g : شتاب گرانشی (m/s^2)، h : فشار برحسب متر و C_q : ضریب جریان بدون بعد است. در معادله (۱) نشت با فشار با توان ۰/۵ رابطه دارد.

در ادامه یک معادله فشار-جریان نشت تعمیم‌یافته‌تر اتخاذ شد که امکان تعیین توان نشت متفاوت از ۰/۵ را فراهم کرد و نشت در شبکه با استفاده از معادله (۲) محاسبه شد (Germanopoulos, 1985).

$$Q_L = C(L P_{av})^{1.18} \quad (2)$$

که Q_L : نشت زمینه و نشت گزارش نشده، C : ضریب نشت و P_{av} : فشار متوسط و L : طول لوله است. ضریب نشت در معادله (۲) به صورت تجربی محاسبه و مقدار آن برابر است با 1×10^{-7} . در مطالعه دیگر، خطی‌سازی معادلات مربوط به شبکه آبرسانی با هدف کمینه‌کردن نشت با استفاده از تئوری خطی، انجام گرفت و به صورت معادله (۳) ارائه شد (Jowitt and Xu, 1990).

$$W_{Lj} = \sum_{i=1}^{np} Q_{Li} \Delta t \quad (3)$$

که W_{Lj} : مجموع کل نشت‌ها در بازه زمانی مشخص، Q_{Li} : دبی نشت از گره i و زمان i و Δt : بازه زمانی و به طور کلی جریان خروجی نشت در یک لوله به صورت معادله (۴) قابل محاسبه است.

استفاده از تحلیل جریان شبانه برای ارزیابی نشت از شبکه توزیع در طول ۲۴ ساعت نیازمند شناخت عوامل موثر بر تغییرات فشار در طول ۲۴ ساعت است. لذا در عمل، مشخص شده است که معادله روزنه، مدل رضایت‌بخشی برای رفتار نشت و فشار ارائه نمی‌دهد. تحقیقات زیادی در مورد اشکال و انواع مختلف با توجه به هیدرولیک روزنه‌ها انجام شده است. نتایج تجربی نشان داده است که رابطه ریشه دوم بین جریان و فشار در معادله روزنه فقط برای جریان آشفته معتبر است (برای یک روزنه با عدد رینولدز بیشتر از ۴۰۰۰) و برای جریان آرام در روزنه‌ها (اعداد رینولدز کمتر از ۱۰)، ضریب تخلیه نیز تابعی از فشار می‌شود که منجر به

کرد (Lambert, 2002).

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^\alpha \quad (10)$$

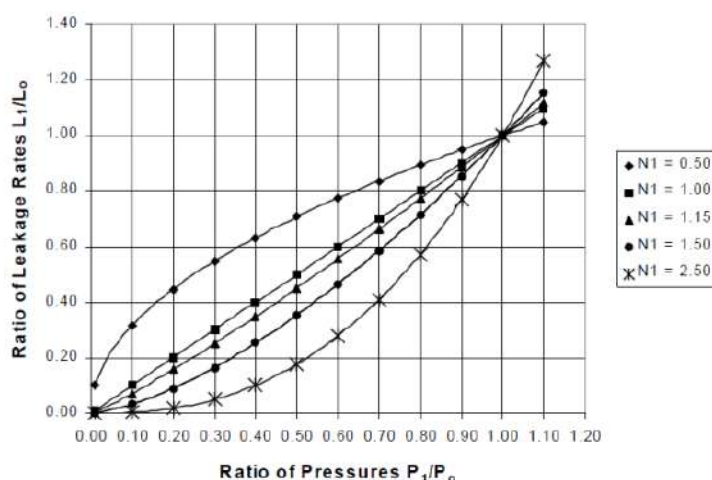
که Q_1 و Q_2 : دبی نشت و H_1 و H_2 : هد فشار هستند. از نظر ریاضی، معادله توان نشت یک شکل تعمیم یافته از معادله روزنه است که اجازه می دهد α متفاوت از ۰/۵ باشد. در مدیریت نشت، معادله (۱۰) معادله توان نشت نامیده می شود و α با نماد $N1$ جایگزین می شود که این رابطه در نمودار شکل ۱ نشان داده شده است (Lambert 2002).

$$Q = C H^\alpha \quad (8)$$

که Q : دبی نشت به ازای واحد طول لوله، H : فشار در لوله است و C : براساس ضریب تخلیه، C_d : و عرض شکاف (b)، با استفاده از معادله (۹) محاسبه می شود.

$$C = C_d b (2g)^\alpha \quad (9)$$

لذا افزایش یا کاهش هدررفت واقعی آب در شبکه آبرسانی ناشی از تغییرات فشار را می توان با استفاده از نسبت بین نشت اندازه گیری شده در دو فشار مختلف به شکل معادله (۱۰) بیان



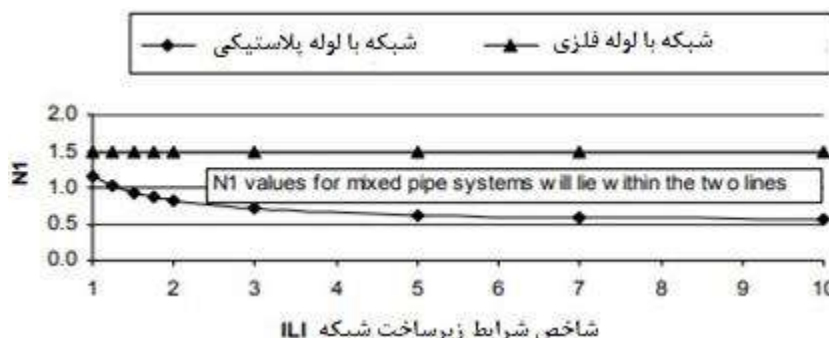
شکل ۱- رابطه بین فشار و نشت با توجه به توان نشت ($N1$) (Lambert, 2002)

شبکه های مختلف در مناطق و کشورهای مختلف محاسبه کرد. مطالعات تجربی با انواع مختلف نشت مانند منافذ گرد و ترک های طولی و انواع مختلف مواد مانند فولاد، آریست سیمان و PVC با مطالعات آزمایشگاهی روی انواع لوله ها انجام شد. نتایج نشان داد که برای سوراخ های گرد، مقدار اندازه گیری شده توان نشت حدود ۰/۵ به این معنی که می توان فرض کرد که سوراخ های گرد به معادله روزنه پایند هستند. با این حال، توان نشت می تواند به طور قابل ملاحظه ای برای ترک ها به ویژه برای PVC، حتی بیشتر از ۲ باشد. برای نشت زمینه، توان فشار ۱/۵ پیشنهاد شده است (شکل ۲).

یکی از رایج ترین شاخص نشت مورد استفاده، شاخص نشت زیرساخت (ILI) است (Farley and Trow, 2003). یکی از مزایای محاسبه شاخص نشت زیرساخت ILI این است که می توان از آن برای محاسبه توان نشت استفاده کرد (شکل ۲)، که در معادله (۱۱) این شاخص قابل محاسبه است.

$$N1 = 1.5 - \left(1 - \frac{0.65}{ILI}\right) \frac{p}{100} \quad (11)$$

که p : درصد سختی لوله (صلبیت لوله ها) در شبکه است. با استفاده از رابطه (۱۱) پارامتر $N1$ یا توان نشت را می توان برای



شکل ۲- توان نشت ($N1$) بر اساس شاخص شرایط زیرساخت شبکه (ILI) (Lambert, 2002)

معادله، دبی نشت را از طریق منافذ منبسط شده توصیف می‌کند. درحالی‌که این معادله از نظر شکل با معادله ارائه شده توسط (May 1994) یکسان است، اما یک تفاوت تفسیری مهم وجود دارد. در معادله (۱۳)، سطوح منافذ نشت ثابت یا متغیر در نظر گرفته نمی‌شوند، بلکه در محاسبه همه منافذ نشت متغیر در نظر گرفته می‌شوند. به عبارت دیگر، تمام نشت‌ها با افزایش فشار از نظر مساحت افزایش خواهند یافت. برای نشت‌هایی با شیب نمودار کم به احتمال زیاد، اولین ترم معادله (۱۳) غالب است، که منجر به نشت موثر با توان $0/5$ می‌شود. برعکس، برای نشت‌های انعطاف‌پذیر با شیب‌های فشاری بالا، عبارت دوم معادله غالب خواهد بود، که در نتیجه توان‌های نشت $1/5$ است. از معادله (۱۳) بدیهی است که تحت شرایط الاستیک، پاسخ مطمئن فشاری یک نشت را می‌توان با دانستن ناحیه اولیه A_0 و شیب فشار m به‌طور کامل مشخص کرد. در یک مطالعه سعی شد با بررسی رابطه بین FAVAD و معادلات توان، راهی برای تبدیل توان نشت $N1$ و ضرایب m و A_0 ایجاد شود. مشخص شد که معادله توان نشت معمولی، توصیف رضایت‌بخشی از نشت‌های الاستیک ارائه نمی‌کند، و لذا یک توصیف سازگارتر براساس یک عدد نشت بدون بعد L_N به‌عنوان نسبت جریان منطقه گسترش یافته به جریان منطقه اولیه به‌صورت معادله (۱۴) معرفی شد (Marzola, Alvisi, and Franchini, 2021).

$$L_N = \frac{mh}{A_0} \quad (14)$$

برای یافتن معادله (۱۵)، رابطه‌ای برای تبدیل بین L_N و $N1$ که با آزمایش‌های تجربی حاصل‌شده و با استفاده از تجزیه و تحلیل اجزای محدود نیز تأیید شده، در شکل ۳ نشان داده شده است (Marzola et al., 2021).

$$L_N = \frac{N1 - 0.5}{1.5 - N1} \quad (15)$$

علاوه‌بر بالانسینگ آب در تخمین نشت‌زمینه، ارزیابی و برآورد حجم نشت را با استفاده از برخی تحلیل‌های آماری می‌توان انجام داد. انتظار می‌رود که این روش دقیق‌تر باشد، اما نیاز به اندازه‌گیری مداوم و دقیق دبی در یک یا چند مکان در منطقه اندازه‌گیری ناحیه (DMA)^۵ دارد که می‌تواند در برخی موارد مشکل‌ساز باشد. لذا یک رویکرد ساده برای گنجاندن تخمین نشت‌زمینه در یک مدل هیدرولیکی ارائه‌شد که در این روش از تخمین‌های حداقل جریان شبانه (MNF)^۶ از نشت استفاده می‌شود. در این روش فرض این است که $N1$ توان نشت معادل $1/18$ و برای همه لوله‌ها برابر است، و یک ضریب نشت مشترک

مساحت منافذ نشت اغلب ثابت نیستند و با فشار سیال به‌دلیل تغییرات حاصل در تنش‌های دیواره لوله داخلی تغییر می‌کنند. این تغییرات ممکن است منجر به چهار نوع تغییر شکل شود: الاستیک، ویسکوالاستیک، پلاستیک و شکست. در همین راستا مدل‌سازی المان محدود، تحت فرضیه رفتار الاستیک خطی، برای تجزیه و تحلیل رفتار لوله‌های آب با مواد مختلف و انواع منافذ نشت (سوراخ‌های گرد و ترک‌های طولی، محیطی و مارپیچی) در شرایط مختلف فشار استفاده شد. مشخص شد که مساحت منافذ نشت با فشار به‌صورت خطی افزایش می‌یابد که مستقل از ابعاد لوله، مواد و شرایط بارگذاری است (van Zyl and Cassa, 2014; Ssozi et al., 2016).

رابطه فشار و نشت به‌دلیل تغییر شکل پیچیده در لوله در تغییرات پلاستیکی احتمالاً منجر به هیستریزیس می‌شود که سطوح منافذ نشت نه تنها به فشار، بلکه به زمان و نرخ تغییرات فشار وارده نیز بستگی دارد. اما با توجه به این‌که تغییرات پلاستیک در لوله‌ها، فرآیندهای برگشت‌ناپذیر هستند. لذا فقط می‌توانند مدت زمان محدودی ادامه داشته باشند و این تغییرات تنها زمانی که فشار در لوله و در نتیجه تنش‌های دیوار افزایش یابد، رخ می‌دهد بنابراین تغییرات خطی سطوح نشت با فشار را نمی‌توان بر مبنای تغییر شکل و شکست پلاستیک فرض کرد و برای درک بهتر این فرآیندها در لوله‌ها به مطالعات بیشتری نیاز است (Ssozi et al., 2016). این به این معنی است که تغییر شکل مساحت منافذ نشت، A را می‌توان تغییر شکل الاستیک در نظر گرفت و آن‌را به‌صورت معادله (۱۲)، مجموعه‌ای از منافذ ثابت و متغیر با توجه به فشار توصیف کرد.

$$A = A_0 + mh \quad (12)$$

که A_0 : مساحت اولیه منافذ نشت در هد فشاری صفر است برحسب مترمربع، m : شیب نمودار فشار-مساحت برحسب (m^2/m) و h : هد فشار برحسب متر. با جایگزینی معادله (۱۲) در معادله روزنه، یک رابطه جدید (معادله (۱۳)) بین نشت و فشار می‌توان یافت که بصورت معادله روزنه اصلاح شده تعریف شد (van Zyl et al., 2017).

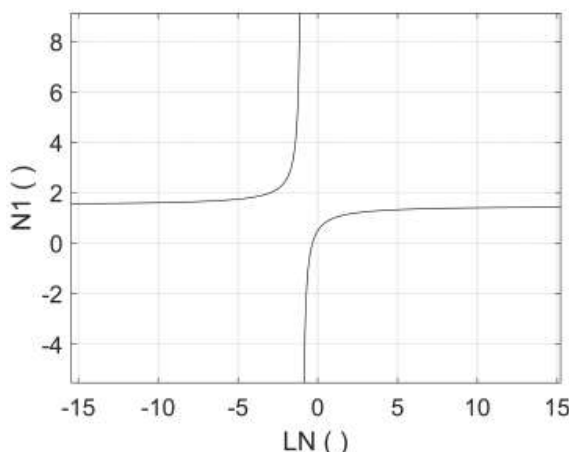
$$Q_l = C_q \sqrt{2gh} (A_0 h^{0.5} + mh^{1.5}) \quad (13)$$

که Q_l : دبی نشت، h : هد فشار، g : شتاب ناشی از گرانش، C_q : ضریب جریان (معمولاً برابر با $-0/65$)، A_0 : مساحت منافذ اولیه در فشار صفر و m : شیب نمودار فشار-مساحت هستند.

اولین عبارت معادله (۱۳) همان معادله روزنه است و دبی نشت را از طریق منافذ اولیه ثابت توصیف می‌کند. عبارت دوم در

ناحیه‌ای انجام و حداقل جریان شبانه که عمدتاً شامل نشت در شب است، همراه با فشار متوسط (AZP) در شب قبل و بعد از کاهش فشار در یک DMA اندازه‌گیری شود (Levin, 2019). سپس از معادلات (۱۶) تا (۱۹) برای ارزیابی ضرایب استفاده شود.

(C) برای همه لوله‌ها با به حداقل رساندن مجموع خطای مربعی بین مدل‌سازی و مشاهده MNF تعیین شد. حداقل جریان شبانه، ترکیبی از مصرف شبانه مشترکین و نشت شبانه است و در صورتی که شبکه به خوبی نگهداری شده باشد، آن را نشت زمینه می‌نامند (قاضی‌زاده و ایدی، ۱۳۹۵). به منظور محاسبه مقادیر N_1 و ضریب نشت C و شیب نمودار m باید آزمایش شبانه



شکل ۳- رابطه بین عدد نشت LN و توان نشت N_1 (Marzola et al. 2021)

از تبدیل فوریه کوتاه‌مدت (STFT)^۷ استفاده شد (Cody et al., 2020). با وجود مزایای موجود روش‌های ریاضی گزارش شده در ادبیات علمی، اشکال اصلی این است که ابزار ریاضی مشخصی برای محاسبه طیف‌های متقابل وجود ندارد که هم‌زمان حساسیت طیف فرکانسی را به حداکثر برساند و استخراج ویژگی‌های نشت پس‌زمینه را در مقادیر پایین‌تر از حد حداقل تلفات واقعی سالانه اجتناب‌ناپذیر (UARL)^۸ امکان‌پذیر سازد (Trutié-Carrero et al., 2023).

معادله (۲۰)، توصیه شده توسط IWA برای تخمین نشت‌زمینه اجتناب‌ناپذیر (UBL)^۹ با زیرساخت در شرایط خوب، از جمله اصلاح فشار بر اساس فشار متوسط ناحیه (۵۰ متر آب، به‌عنوان فشار مرجع) است (Morrison et al., 2024).

$$UBL = (0.02 \times L_m + 1.25 \times N_c + 0.033 \times L_p) \times \left(\frac{AZNP}{50}\right)^{1.5} \quad (20)$$

زیرساخت (ICF)^{۱۱} باشد (Özdemir et Morrison et al., 2024; al., 2021).

$$BL = ICF \times (0.02 \times L_m + 1.25 \times N_c + 0.033 \times L_p) \times \left(\frac{AZNP}{50}\right)^{1.5} \quad (21)$$

فاکتور شرایط زیرساخت (ICF)، معمولاً بین ۱ تا ۴ قرار دارد که بستگی به وضعیت اتصالات در خطوط اصلی شبکه و مشترکین

$$N_1 = \frac{\ln\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)}{\ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)} \quad (16)$$

$$C = \frac{Q_1}{h^{N_1}} \quad (17)$$

$$m = \frac{Q_2 - Q_1 h_2^{0.5} h_1^{-0.5}}{C_q \sqrt{2g} \cdot h_2^{0.5} (h_2 - h_1)} \quad (18)$$

$$A_0 = \frac{Q_1 h_1^{-0.5}}{C_q \sqrt{2g}} - m h_1 \quad (19)$$

که Q_1 و h_1 : جریان نشت و هد فشار قبل از اصلاح فشار در لوله و Q_2 و h_2 : جریان نشت و هد فشار پس از آن هستند (Marzola et al., 2021; Romero et al., 2022; Wu et al., 2022).

در مطالعه دیگر، روشی مبتنی بر پیش‌بینی خطی برای نشت‌یابی در شبکه‌های توزیع آب ارائه شده که برای تحلیل خود

که L_m : طول خطوط اصلی شبکه (m) و N_c : تعداد مشترکین و $AZNP$: متوسط فشار شبانه ناحیه (m) است. قانون توان ۱/۵ که به‌طور خاص برای نشت زمینه با استفاده از داده‌های بین‌المللی به‌دست آمده است نشان می‌دهد که چرا مدیریت فشار در مدیریت و کاهش نشت زمینه بسیار موثر است. UBL می‌تواند به‌عنوان بخشی از یک رویکرد انعطاف‌پذیر برای ارزیابی نشت‌زمینه واقعی (BL)^{۱۱} با استفاده از معادله (۲۱) با کمک فاکتور شرایط

هم‌چنین، در مطالعه‌ای دیگر، مدل‌سازی نشت‌زمینه و نشت گزارش نشده با زمان در شبکه‌های توزیع آب با تکیه بر مطالعات قبلی و براساس سطح شکاف و منافذ باز غیریکنواخت بر روی خطوط لوله که با توجه به زمان نصب اولیه لوله توزیع شده‌اند به‌صورت رابطه (۲۴) محاسبه شد (Alvisi and Franchini, 2009).

$$\Omega_p(\tau) = \pi d_p L_p v_p(\tau) \quad (24)$$

که Ω_p : مساحت بازشدگی شکاف، τ : سن لوله براساس زمان نصب لوله، v_p : درصد بازشدگی شکاف‌ها، L_p و d_p : به‌ترتیب طول و قطر لوله هستند. درصد بازشدگی با افزایش عمر لوله، افزایش می‌یابد و به دو پارامتر β و τ بستگی دارد. لذا با محاسبه درصد بازشدگی و بازنویسی معادله (۲۴)، رابطه محاسبه مساحت بازشدگی در لوله‌ها نسبت به عمر لوله به‌صورت معادلات (۲۵) و (۲۶) به‌دست می‌آید (Alvisi and Franchini, 2009).

$$v_p(\tau) = v_0 e^{\beta \tau} \quad (25)$$

$$\Omega_p(\tau) = \pi d_p L_p v_0 e^{\beta \tau} \quad (26)$$

که v_0 : درصد بازشدگی منافذ اولیه در زمان نصب لوله است که با توان β با افزایش عمر لوله، τ افزایش می‌یابد و دبی نشت‌زمینه و نشت گزارش نشده در لوله برای هریک از گرهِای متصل به لوله به‌صورت روابط (۲۷) و (۲۸) محاسبه می‌شود.

$$ql_{p1} = (H_{p1} - z_{p1})^\alpha \frac{\Omega_p(\tau)}{2} \quad (27)$$

$$= (H_{p1} - z_{p1})^\alpha \pi d_p \frac{L_p}{2} v_0 e^{\beta \tau}$$

$$ql_{p2} = (H_{p2} - z_{p2})^\alpha \frac{\Omega_p(\tau)}{2} \quad (28)$$

$$= (H_{p2} - z_{p2})^\alpha \pi d_p \frac{L_p}{2} v_0 e^{\beta \tau}$$

در ادامه مقدار جریان نشت‌زمینه و گزارش نشده در گرهِ n ام در شبکه‌ای با M لوله که به آن گرهِ وصل است به‌صورت رابطه (۲۹) قابل محاسبه است (Alvisi and Franchini, 2009).

$$ql_n = (H_n - z_n)^\alpha \sum_{j=1}^{M_n} \pi d_{jn} \frac{L_{jn}}{2} (v_0 e^{\beta \tau})_{jn} \quad (29)$$

معادله (۲۹) که مدل نشت مبتنی بر فشار در شبکه است با مدل هیدرولیکی مبتنی بر فشار ادغام شد. نکته قابل توجه این‌جا است که با افزایش سن لوله درصد بازشدگی لوله افزایش می‌یابد. با تعمیر لوله مقدار سن لوله یا پارامتر τ تغییر نمی‌کند، اما با تعویض لوله این مقدار صفر خواهد شد. در واقع τ ، عمر لوله یا زمان نصب لوله است. ممکن است مشاهده شود که پس از بررسی

دارد. مقدار ۱ برای شرایطی که خطوط اصلی شبکه و مشترکین در شرایط خوب قرار گرفته باشد و ۴ برای وضعیتی از زیر ساخت شبکه است که از نظر آب‌بندی، شبکه در شرایط نامناسب در نظر گرفته‌شده باشد (Morrison et al., 2024).

۲-۲- مدل‌های رشد نشت‌زمینه با زمان

لوله‌ها برای تحمل بارهایی که تحت شرایط بهره‌برداری عادی قرار دارند طراحی شده‌اند. با این حال، تمام نقاط روی دیواره لوله استحکام یکسانی ندارند و ممکن است نقاط ضعیف به دلیل نقص یا آسیب در ساخت وجود داشته باشد. لوله‌ها در معرض مکانیسم‌های فرسودگی مختلفی قرار می‌گیرند که در طول زمان استحکام آنها را کاهش می‌دهد. نقاط ضعیف و ناپیوستگی‌ها (مانند ترک‌های کوچک) بیشتر از بقیه دیواره لوله در معرض مکانیسم‌های زوال هستند. مکانیسم‌های اصلی زوال لوله عبارتند از خوردگی، خستگی، شستشوی خاک و آسیب‌های سازه‌ای.

در لوله‌های آب، نوسانات فشار روزانه معمولی ناشی از تغییرات تقاضا دارای دامنه نسبتاً ثابتی است. تغییرات فشار گذرا نیز باعث نوسانات فشار کوچکتر و نامنظم‌تر در سیستم‌های توزیع آب به دلیل باز و بسته شدن شیرها می‌شود. برای یک ترک تحت بارهای چرخه‌ای دامنه ثابت، رفتار نرخ رشد تابعی از ضریب شدت تنش است. برای اولین بار، رشد ترک به عنوان تابعی از ضریب شدت تنش K و نسبت چرخه بارگذاری به صورت معادله (۲۲)، در نظر گرفته شد. ضریب شدت تنش، شدت میدان تنش در نزدیکی ترک را توصیف می‌کند. این عامل به هندسه اجزا، طول، موقعیت و آرایش ترک، و نوع و محل بارگذاری بستگی دارد (Paris and Erdogan, 1963).

$$K = \sigma Y \sqrt{\pi a} \quad (22)$$

که α : نصف طول ترک (m)، σ : تنش و Y : فاکتور هندسه است. فاکتور هندسه موقعیت ترک، نوع و موقعیت بارگذاری و هندسه جزء را در نظر می‌گیرد. عوامل هندسی عوامل شدت تنش بدون بعد هستند. قانون پاریس برای اولین بار به‌صورت معادله تجربی (۲۳)، برای رشد ترک توصیف شد (Paris and Erdogan, 1963).

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (23)$$

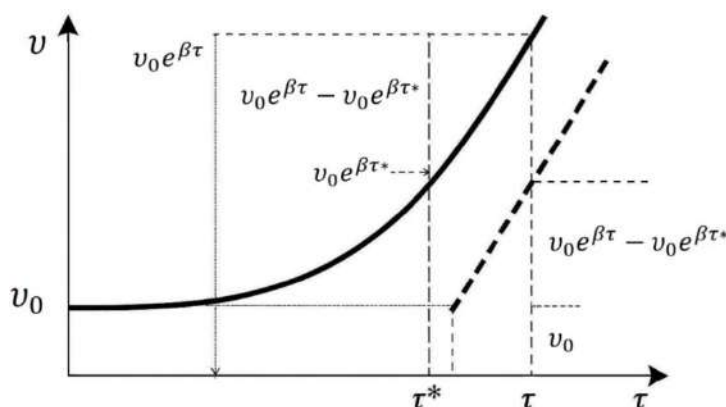
که ΔK : ضریب شدت تنش چرخه‌ای ($Mpa\sqrt{m}$)، N : تعداد چرخه و C و m : ثابت پاریس هستند. هر دو ثابت به‌صورت تجربی به‌دست می‌آیند و به خواص جنس لوله بستگی دارند. C به نسبت شدت تنش نیز بستگی دارد.

به دلیل درک محدود ما از فرایند گسترش و رشد نشت (روزنه نشت) و ثابت فرض کردن مساحت نشت، منجر به خطا در محاسبات دبی نشت در طول زمان می‌گردد. به منظور رفع این چالش، با استفاده از توابع رشد، بازنمایی فرایند رشد نشت برقراری یک رابطه تابعی میان دبی نشت و مدت زمان تداوم نشت پیشنهاد شد. در این راستا، یک مدل توسعه و پیشروی نشت جهت شبیه‌سازی فرایند رشد نشت و بهینه‌سازی پارامترهای توابع رشد به کار گرفته شد که نتایج نشان می‌دهد که تابع ریچاردز^{۱۲} عملکرد بهتری نسبت به سایر توابع رشد داشته است (Guo et al., 2021).

تشخیص نشت، درصد سطح باز $v_p(\tau)$ به عنوان تابعی از سن واقعی لوله به صورت معادله (۳۰) به رشد خود ادامه دهد، بنابراین سریع‌تر از آنچه در صورت تعویض لوله اتفاق می‌افتد نشت مشاهده می‌شود.

$$v(\tau) = (v_0 e^{\beta\tau} - v_0 e^{\beta\tau^*}) + v_0 = v_0 (1 + e^{\beta\tau} - e^{\beta\tau^*}) \quad (30)$$

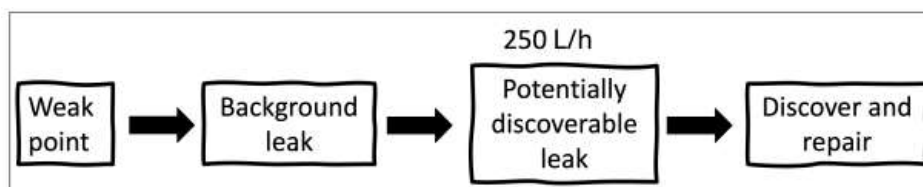
شکل ۴ نشان می‌دهد که درصد بازشدگی لوله با سن لوله افزایش می‌یابد و چنانچه در سن τ^* لوله عملیات تعویض لوله انجام شود، درصد سطح بازشدگی به مقدار اولیه آن یعنی به زمان نصب اولیه می‌رسد (Alvisi and Franchini, 2009).



شکل ۴- روند درصد بازشدگی منافذ روی لوله به سن لوله (Alvisi and Franchini, 2009)

شکست باقی‌مانده تقسیم می‌شود (Lopez Vega, 2022). شکستگی‌ها می‌توانند به صورت آنی رخ دهند، اما به طور کلی، در طی روزها، هفته‌ها یا حتی سال‌ها ایجاد می‌شوند. درک علل و ایجاد نشت در طول زمان و این که چگونه فشار می‌تواند در این فرآیند نقش داشته باشد، مهم است. مسیر توسعه یک نشت در شکل ۵ خلاصه شده است.

مدل‌هایی که رشد ترک‌ها را با زمان، به دلیل نوسانات فشار توصیف می‌کنند، بر طول ترک یا رشد ناحیه نشت تمرکز دارند. نرخ رشد نشت با زمان در لوله‌های آب با نوسانات فشار معمولاً با استفاده از اصول مکانیک شکست مدل می‌شود. در این زمینه، طول عمر ترک به دو مرحله تقسیم می‌شود: ۱- مرحله تشکیل ترک و ۲- مرحله انتشار. تشکیل ترک به شروع ترک و رشد میکرو ترک تقسیم می‌شود، درحالی که انتشار ترک به رشد ترک و



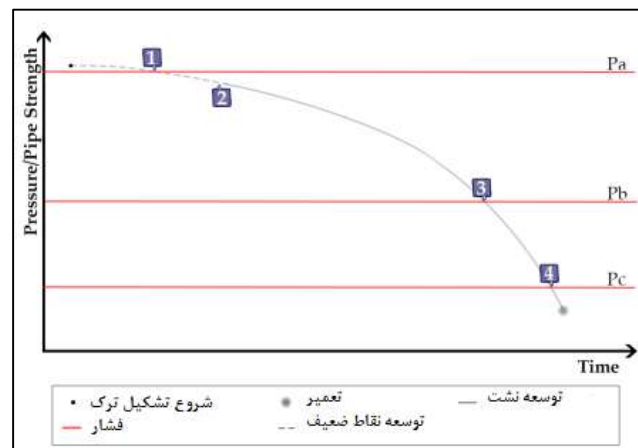
شکل ۵- مسیر توسعه نشت در لوله‌ها (Lopez et al., 2025)

زمانی کشف می‌شوند که تاثیر قابل اندازه‌گیری داشته باشند، مانند ظاهرشدن آب در بالای زمین یا افت فشار سیستم، یا از طریق تشخیص نشت فعال (ALC) شناسایی شوند. تعیین‌کننده اصلی قابلیت کشف، نرخ جریان نشت است. نشت‌های کوچک خود را نشان نمی‌دهند و با تجهیزات نشت‌یابی معمولی قابل کشف نیستند که به آنها نشت‌زمینه می‌گویند و اطلاعات کمی در مورد

در مطالعه‌ای که بر روی نرخ رشد نشت انجام گرفت مشخص شد که آنچه در طول زمان موجب افزایش نشت می‌شود، انواع مکانیسم‌های زوال است که به مرور زمان لوله را ضعیف می‌کند. پس از مدتی، استحکام ضعیف‌ترین نقطه روی لوله به حدی بدتر می‌شود که فشار وارده از استحکام آن بیشتر می‌شود و در نتیجه دیواره لوله شکسته و نشت شروع می‌شود. نشت‌ها

کردن رابطه بین نرخ رشد زوال با زمان و فشار از شاخص استحکام استفاده کرده است. لذا این شاخص به عنوان فشاری تعریف می‌شود که ضعیف‌ترین نقطه آن به یک نشت قابل کشف تبدیل می‌شود. برای نشان دادن کاربرد این مفهوم، شاخص استحکام لوله به صورت یک خط خاکستری در شکل ۶ نشان داده شده است (Lopez et al., 2025).

این شاخص با گذشت زمان کاهش می‌یابد زیرا فرآیندهای مختلف زوال، استحکام دیواره لوله را تضعیف می‌کند. خط چین در نقطه ۱ نشان‌دهنده نقاط ضعیفی است که هنوز نشت ندارد. نشت زمانی قابل کشف می‌شود که شاخص استحکام آن کمتر از فشار در لوله باشد. هنگامی که شاخص استحکام بالاتر از فشار باشد، نشت آن قدر کوچک است که قابل کشف نیست و بنابراین یک نشت زمینه است (Lopez et al., 2025).



شکل ۶- توسعه شاخص استحکام لوله با زمان (Lopez et al., 2025)

عملی آن در بهبود عملکرد، کالیبراسیون مدل و برآورد بهتر نشت زمینه در شبکه آبرسانی ایجاد می‌کند (Wang et al., 2024; Maskit and Ostfeld, 2014; Di Nardo et al., 2015).

برای مدل‌سازی نشت، تابع روزنه (معادله (۳۱)) با دو پارامتر، ضریب آفشان C_E و توان آفشان α تعریف شد که به طور کلی اندازه و شکل یک نشت، C_E را منعکس می‌کند و اغلب هنگام مدل‌سازی نشت‌های با مقیاس‌های مختلف تنظیم می‌شود. اگرچه مقدار α معمولاً ۰/۵ تنظیم می‌شود، مقادیر دیگری نیز پیشنهاد شده است. به عنوان مثال مقدار توان ۱/۱۸ که نشان‌دهنده ضریب «کشش» بالاتر است و چگونگی واکنش ناحیه مؤثر نشت به فشار داخلی لوله را نشان می‌دهد، ارائه شده است (Goodwin, 1980).

$$\frac{dQ}{dh} = \alpha C_E h^{\alpha-1} \quad (31)$$

که h : فشار داخلی است و زمانی که $\alpha < 1$ ، با افزایش فشار، نرخ افزایش دبی نشت کاهش می‌یابد، درحالی‌که برای $\alpha = 1$ تغییر

شیوع و خواص آنها در شبکه‌های آب وجود دارد. هنگامی که یک نشت به جریان تقریباً ۲۵۰ لیتر در ساعت می‌رسد، به اندازه کافی بزرگ می‌شود که قابل تشخیص باشد و به آن نشت بالقوه قابل کشف (PD)^{۱۲} می‌گویند. با این حال، بیشتر نشت‌های PD در این مرحله قابل مشاهده نیستند و تا زمانی که کشف نشوند به رشد خود ادامه خواهند داد. هنگامی که یک نشت کشف می‌شود، به آن شکستگی می‌گویند که قابل تعمیر است. فشار به عنوان بار اولیه روی دیواره‌های لوله، عاملی مؤثر در برخی مکانیسم‌های زوال و محرک اصلی نرخ جریان نشت، نقش حیاتی در فرآیند توسعه نشت ایفا می‌کند. نشت‌های لوله، از نوع روزنه‌ای هستند و بنابراین سرعت نشت با جذر فشار افزایش می‌یابد. با این حال، فشار ممکن است بر مساحت نشت نیز تأثیر بگذارد و بنابراین تأثیر بیشتری بر نرخ جریان نشت داشته باشد. در این مطالعه برای مشخص

۳- مدل‌سازی نشت زمینه در تحلیل شبکه‌های توزیع آب

با توجه به بررسی رفتار نشت زمینه در طول زمان و وابستگی آن به فشار، گام بعدی در ارزیابی شبکه‌های توزیع آب، ادغام این روابط در مدل‌های تحلیلی شبکه است. درحالی‌که روابط وابسته به زمان و فشار، چگونگی تغییر نشت را در مقیاس موضعی لوله یا روزنه توصیف می‌کنند، به کارگیری آن‌ها در مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه، امکان ارزیابی جامع اثرات نشت بر عملکرد هیدرولیکی و بهره‌برداری شبکه را فراهم می‌سازد. در این راستا، پژوهش‌های اخیر با استفاده از روابط تجربی و نظری فشار-نشت، مدل‌های نشت را در حلگرهای هیدرولیکی در نرم‌افزارهای EPANET و WaterGEMS پیاده‌سازی کرده‌اند تا تحلیل وابسته به فشار^{۱۴} و کالیبراسیون ضرایب نشتی^{۱۵} به صورت واقع‌گرایانه‌تر انجام گیرد. از این منظر، مدل‌سازی نشت زمینه در سطح شبکه، پلی میان درک مفهومی رفتار نشت و کاربردهای

می‌شود (Tolson and Khedr, 2014).

$$Q_n = \gamma_n P_n^\alpha \quad (34)$$

که Q_n : جریان نشت در گره n ام (L/s)، γ_n : ضریب آفشان (L/s/m) و P_n : فشار در گره n هستند. چنانچه نشت در چند لوله متصل به یک گره موردنظر باشد، مجموع جریان‌های نشت، d_n^{leaks} از رابطه (35) به‌دست می‌آید (Tolson and Khedr, 2014).

$$q_n^{leaks} = \sum_{i=1}^m 0.5 d_i^{leaks} \quad (35)$$

در تحقیق دیگر برای بهبود مدل هیدرولیکی، نشت به‌صورت خروجی وابسته به فشار در شبکه مدل‌سازی می‌شود و در معادله بقای جرم گره‌ها وارد می‌شود، به‌گونه‌ای که حجم نشت هر لوله تابع فشار متوسط آن است. این وابستگی به‌صورت معادله (36) و با استفاده از روابط تحلیلی Germanopoulos یا مدل FAVAD که تغییر مساحت نشت با فشار را لحاظ می‌کند، بیان می‌شود (Berardi and Giustolisi, 2021).

$$\frac{V_k^{leak}}{\Delta T} = \begin{cases} L_k \beta_k P_{k,ave}^\alpha & \text{Germanopoulos} \\ L_k \left((\beta_{1,k} + \beta_{2,k} P_{k,ave}(t)) \sqrt{P_{k,ave}(t)} \right) & \text{FAVAD} \quad P_{k,ave}(t) > 0 \\ 0 & P_{k,ave}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (36)$$

کاهش چشمگیر تعداد پارامترهای کالیبراسیون و تسهیل همگرایی مدل تحلیلی می‌شود. با این‌حال، در این مطالعه اشاره شد که گروه‌بندی نامناسب ممکن است منجر به افت دقت مدل و تخمین‌های نادرست از نرخ نشت واقعی شود. در نهایت، روشی برای تخمین هم‌زمان توان نشت α و ضریب نشت β ارائه شد که براساس به حداقل رساندن مجموع خطاهای مربعی بین دبی‌ها و فشارهای مدل و مشاهده شده است، ارائه شد. در مطالعات بعدی، استدلال می‌شود که نمی‌توان یک مقدار را برای α در نظر گرفت، زیرا در یک محدوده بزرگ (۲/۸-۰/۳) مشاهده شده است و باید ویژگی‌های شبکه‌ای که مطالعه می‌شود در نظر گرفته شود. در مطالعه Di Nardo et al. (2015) روشی برای تخمین مشترک پارامترهای نشت هم‌زمان با ضرایب تقاضا توسعه دادند. این روش با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک (GA)، مجموع وزنی مربعات خطا بین داده‌های مدل‌شده و اندازه‌گیری‌شده را به حداقل می‌رساند. در این مدل که به‌صورت رابطه (37) ارائه شد، فرض می‌شود تمام لوله‌ها دارای مقادیر یکسان α و β هستند. الگوریتم مذکور بر روی یک شبکه کوچک شامل سه نقطه اندازه‌گیری جریان و فشار

دبی نسبت به فشار خطی است (Goodwin 1980). در مطالعه دیگر برای بهینه‌سازی مقدار نشت در شبکه‌های آبرسانی، رابطه (32) برای نشت در طول لوله‌ها پیشنهاد شد (Tolson and Khedr, 2014).

$$d_k^{leak} = \beta_k L_k [P_k]^\alpha \quad (32)$$

که d_k^{leak} : جریان نشت در طول k امین لوله و برحسب (m³/s) است، β_k و α : پارامترهای مدل‌سازی نشت هستند و به‌ترتیب برحسب (m²- α /sec) و $(-)$ ، P_k : فشار لوله برحسب متر آب و L_k : طول k امین لوله برحسب متر است. برای مدل‌سازی نشت در هر گره معادله (32) به‌صورت رابطه (33) بازنویسی شد.

$$q_n^{leak} = \frac{1}{2} |A_{np}| d_p^{leak} \quad (33)$$

که A_{np} : ماتریس درهم‌نمایی^{۱۶} است که نشان می‌دهد کدام گره متعلق به کدام لوله است. در این مطالعه از EPANET برای تقریب معادلات بنیادی فوق استفاده شد. در محیط EPANET، نشت‌ها به‌صورت گره‌ای و از طریق تعریف آفشان^{۱۷} مدل می‌شوند. معادله عمومی مدل نشت در این نرم‌افزار به‌شکل معادله (34) بیان

که V_k^{leak} : نصف نشت در طول لوله‌هایی است که به گره i متصل است، $P_{k,ave}(t)$: فشار متوسط در زمان t در شبکه است. α : توان فشار و مرتبط با سختی مکانیکی جنس لوله بوده، درحالی‌که β پارامتر زوال و بیانگر تمایل لوله به نشت تحت تأثیر عواملی نظیر فرسودگی و شرایط بهره‌برداری است. این مدل با ادغام روابط غیرخطی نشت با معادلات بقای جرم و انرژی شبکه در قالب یک مدل هیدرولیکی پیشرفته است که در آن نشت، مصرف و فشار به‌صورت هم‌زمان و سازگار محاسبه می‌شوند. این رویکرد امکان ارزیابی واقع‌بینانه اثر اقدامات مدیریتی نظیر کنترل فشار، تفکیک DMA و بازسازی لوله‌ها را فراهم می‌کند (Berardi and Giustolisi, 2021).

در مطالعه دیگری (Maskit and Ostfeld 2014) برای برآورد پارامترهای α و β در معادلات تحلیل شبکه که دارای انواع لوله تحت شرایط مختلف محیطی و هیدرولیکی بود و به‌منظور افزایش پایداری محاسبات، لوله‌ها براساس ویژگی‌های مشابه نشت در چند گروه طبقه‌بندی شد؛ به این ترتیب، برای هر گروه، یک جفت پارامتر نشت (ضریب β و توان α) تعریف شد. این روش باعث

که پدیده‌هایی مانند ویسکوالاستیسیته و تغییر شکل‌های پلاستیک در لوله‌های پلیمری می‌تواند فرضیات مدل‌های الاستیک را نقض کند. بنابراین، توسعه مدل‌هایی که این ویژگی‌های ماده و رفتار زمان‌مند نشت را در نظر بگیرند، از اولویت‌های پژوهش‌های آتی است.

در این مقاله مروری، تلاش شد با بررسی روند مدل‌سازی نشت‌زمینه در مطالعات مختلف، به‌ویژه در مدل‌های برآورد نشت در شبکه‌های آبرسانی، تصویر روشن‌تری از جایگاه این نوع نشت ارائه شود. نتایج بررسی‌ها نشان‌داد که اکثر مدل‌های موجود، وابستگی شدیدی به فشار دارند و کمتر تأثیرات زمانی نظیر فرسودگی لوله‌ها را در نظر گرفته‌اند. هم‌چنین، شکاف قابل‌توجهی بین ادبیات تحقیق و کاربردهای عملی در زمینه مدیریت نشت زمینه مشاهده می‌شود. مرور انجام‌شده نشان می‌دهد که گنجاندن نشت‌زمینه در مدل‌های پیش‌بینی و بهینه‌سازی، به‌ویژه در شرایط فقدان داده، نیازمند توسعه مدل‌های جدید یا استفاده از رویکردهای تلفیقی و داده‌محور است.

بر این اساس، می‌توان پیشنهاد‌های زیر را برای مسیرهای آتی پژوهش مطرح کرد:

- استانداردسازی روش‌های برآورد پارامترهای کلیدی نشت‌زمینه (مانند سطح اولیه و شیب فشار-مساحت) از طریق آزمایش‌های میدانی قبل و بعد از تغییر فشار.
- توسعه مدل‌های FAVAD که اثرات ویسکوالاستیک و پلاستیک مواد مختلف لوله را در نظر بگیرند و در شرایط آزمایشگاهی و میدانی اعتبارسنجی شوند.
- پیاده‌سازی روابط اصلاح‌شده روزه در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی شبکه مانند EPANET و بازنگری در نتایج مطالعاتی که صرفاً به معادله توانی تکیه داشته‌اند.
- توسعه چارچوب‌های بهینه‌سازی چندهدفه که فشار، انرژی، هزینه و سطح اقتصادی نشت را به‌طور هم‌زمان در نظر بگیرند.
- اجرای مطالعات مقایسه‌ای بر روی شبکه‌های نمونه واقعی و آزمودن مجموعه‌ای از روش‌های مختلف برای ارائه راهنمای عملی انتخاب رویکرد مناسب، متناسب با شرایط داده و محدودیت‌های هر منطقه.

در مجموع، می‌توان نتیجه‌گرفت که مسیر واقع‌بینانه برای مدیریت نشت‌زمینه، اتکا به مدل‌های فیزیکی مانند FAVAD همراه با بهره‌گیری از روش‌های کم‌داده و چارچوب‌های بهینه‌سازی اقتصادی است. چنین رویکردی نه تنها اتکای بیش از حد به ضرایب تجربی را کاهش می‌دهد، بلکه امکان کالیبراسیون

آزمایش شد و نتایج نشان‌داد که هم‌تخمینی این دو پارامتر می‌تواند رفتار نشت را با دقت قابل‌قبولی بازتولید کند.

$$D_i^k = n_{ui} \times c_d^k + c(p_i^k)^\gamma \quad (37)$$

که D_i^k : دبی گره i در ساعت k است، n_{ui} : تعداد مشترکینی است که از گره i برداشت می‌کنند، c_d^k : مقدار تقاضای سرانه آب در ساعت k است که میانگین روزانه‌ی آن بیانگر تقاضای روزانه‌ی سرانه‌ی آب شیرین است و p_i^k : هد فشار در گره i را نشان می‌دهد و ضریب C به تعداد مشترکین و تمام طول لوله‌ای که به هر گره متصل است بستگی دارد.

با این حال، مطالعات بعدی نشان‌دادند که تخمین هم‌زمان α و β می‌تواند بسیار حساس به تغییرات کوچک در داده‌های کالیبراسیون باشد، زیرا ممکن است پارامتر α دارای زیرمجموعه‌های بزرگ باشد. بنابراین، کالیبراسیون مشترک ضریب نشت و توان به‌دلیل تمایل مشکل کالیبراسیون به شرایط نامناسب، غالباً ممکن است در عمل دشوار باشد. لذا روش تخمین پارامتر نشت و عدم قطعیت پارامترهای نشت و ارزیابی اثر آن بر نتایج مدل‌سازی مورد مطالعه قرارگرفت (Rokstad and Ugarelli, 2017).

۳- نتیجه‌گیری

مرور نظام‌مند پیشینه تحقیق نشان‌داد که نشت‌زمینه، با وجود سهم قابل‌توجه در تلفات واقعی آب، نسبت به دیگر انواع نشت یعنی نشت گزارش‌شده و نشت گزارش‌نشده کمتر موردتوجه قرارگرفته است. پایه نظری تحلیل نشت زمینه بر روابط اصلاح‌شده روزه و مدل‌های مشابه استوار است. در این چارچوب، نشت با پارامترهایی چون سطح اولیه نشت، شیب رابطه فشار-مساحت و ضریب تخلیه توصیف می‌شود. برخلاف معادله توانی متداول (NI) که به‌شدت وابسته به داده‌های کالیبراسیون است، مدل اصلاح‌شده روزه قادر است رفتار نشت را واقع‌بینانه‌تر و قابل‌تعمیم‌تر بیان کند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که مساحت نشت در شرایط الاستیک اغلب رابطه‌ای خطی با فشار دارد و همین امر، استفاده از مدل‌های فیزیکی مانند FAVAD را نسبت به روابط صرفاً تجربی توجیه‌پذیرتر می‌سازد.

هم‌چنین پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در مقیاس شبکه، توان نشت معمولاً از میانگین توان نشت‌های منفرد بزرگ‌تر است. به بیان دیگر، با تحلیل داده‌های مدیریت فشار در سطح DMA می‌توان ویژگی‌های سامانه‌ای نشت‌ها را استنباط کرد. در این میان، نقش جنس و رفتار مکانیکی لوله‌ها بسیار مهم است؛ چرا

- Berardi, L., and Giustolisi, O., (2021), "Calibration of design models for leakage management of water distribution networks", *Water Resources Management*, 35(8), 2537-2551, <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02847-x>
- Brater, E., and King, H., (1996), *Analysis of flow in water distribution networks*, Technomic Publishing Co., Inc. Handbook of Hydraulics, Lindell E. James, New York: Mc Graw Hill.
- Cody, R.A., Dey, P. and Narasimhan, S., (2020). Linear prediction for leak detection in water distribution networks. 11(1), 04019043, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000415](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000415)
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Gisonni, C., and Iervolino, M., (2015), "A genetic algorithm for demand pattern and leakage estimation in a water distribution network", *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 64(1), 35-46, <https://doi.org/10.2166/aqua.2014.086>
- Farley, M., and Trow, S. (2003). *Losses in water distribution networks*, IWA publishing.
- Germanopoulos, G., (1985), "A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models", *Civil Engineering Systems*, 2(3), 171-179, <https://doi.org/10.1080/02630258508970478>
- Goodwin, S.J., (1980), *The results of the experimental programme on leakage and leakage control*, WRC Environmental Protection, Swindon, UK.
- Guo, G., Liu, S., Jia, D., Wang, S. and Wu, X., (2021), Simulation of a leak's growth process in water distribution systems based on growth functions", *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 70(4), 521-536, <https://doi.org/10.2166/aqua.2021.021>
- Idelchik, I.E., (1994), *Handbook on hydraulic resistance*, CRC: Begell House.
- Jowitt, P.W., and Xu, C., (1990), Optimal valve control in water-distribution networks, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116(4), 455-472, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1990\)116:4\(455\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1990)116:4(455))
- Lambert, A., and Morrison, J.A.E. (1996)., "Recent developments in application of 'bursts and background estimates' concepts for leakage management", *Water and Environment Journal*, 10(2), 100-104, <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.1996.tb00016.x>
- Lambert, A.O., (2002), International report: Water losses management and techniques, *Water Science and Technology: Water Supply*, 2(4), 1-20, <https://doi.org/10.2166/ws.2002.0107>
- Levin, S.J., (2019), "An evaluation of the pressure-leakage response of selected water distribution networks in South Africa", M.Sc. Thesis, University of Cape Town, Cape Town, South Africa.
- Lopez, L.L., van Zyl, J.E., and Kelly, P.A., (2025), "Conceptual framework for leak development in water distribution systems, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 151(6), 04025011,

تکرارپذیر و تصمیم‌گیری اقتصادی مبتنی بر ریسک را نیز برای شرکت‌های آب و فاضلاب فراهم می‌سازد.

۴- پی‌نوشت‌ها

- 1- Non-Revenue Water
- 2- Burst and Background Losses Estimate
- 3- Fixed and Variable Area Discharge
- 4- Infrastructure Leakage Index
- 5- District Metered Area
- 6- Minimum Night Flow
- 7- Short-Time Fourier Transform
- 8- Unavoidable Annual Real Losses
- 9- Unavoidable Background Leakage
- 10- Background Leakage
- 11- Infrastructure Condition Factor
- 12- Richards Function
- 13- Potentially discoverable leak
- 14- Pressure-Driven Analysis
- 15- Emitter coefficients
- 16- Incidence matrix
- 17- Emitter

۵- اظهارنامه مالی

این مقاله هیچ‌گونه حمایت مالی از سازمان‌های دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

۶- اظهارنامه نحوه استفاده از هوش مصنوعی

در فرآیند نگارش این مقاله، از ابزارهای هوش مصنوعی صرفاً به‌منظور ویرایش زبانی، بهبود نگارش متون و ارتقای کیفیت بصری برخی از تصاویر استفاده شده است. محتوا، تحلیل‌ها و نتیجه‌گیری نهایی به‌طور کامل توسط نویسندگان بازرینی و تأیید شده و مسئولیت نهایی آن بر عهده نویسندگان است.

۷- مراجع

- تابش، م.، (۱۳۹۵)، *مدل‌سازی پیشرفته شبکه‌های توزیع آب*، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوم.
- جلیلی قاضی‌زاده، م.، و ایدی، ض.، (۲۰۱۶) "ارائه روابط تحلیلی مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب"، *محیط شناسی*، ۴۲(۳)، ۵۱۷-۵۲۹، <https://doi.org/10.22059/jes.2016.60064>
- Alvisi, S., and Franchini, M., (2009), "Multiobjective optimization of rehabilitation and leakage detection scheduling in water distribution systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(6), 426-439, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2009\)135:6\(426\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2009)135:6(426))

- Herrera-Díaz, J.C., Cantó, J., and Escobedo-Alatorre, J.J., (2023), "Detection of background water leaks using a high-resolution dyadic transform", *Water*, 15(4), 736, <https://doi.org/10.3390/w15040736>
- van Zyl, J.E., and Cassa, A., (2014), "Modeling elastically deforming leaks in water distribution pipes", *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(2), 182-189.
- van Zyl, J.E., Lambert, A.O., and Collins, R., (2017), "Realistic modeling of leakage and intrusion flows through leak openings in pipes", *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(9), 04017030, <https://doi.org/10.1061/JHE.1943-5541.0001544>
- Wang, J., Wang, H., and Nie, L., (2024), "Hydraulic simulation of water supply network leakage based on EPANET", *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 15(1), 05023006, <https://doi.org/10.1061/JPSEA2.0002306>
- Wiggert, D.C. (1968), "Unsteady flows in lines with distributed leakage", *Journal of the Hydraulics Division*, 94(1), 143-162.
- Wu, J., Ma, D., and Wang, W., (2022), "Leakage identification in water distribution networks based on XGBoost algorithm", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(3), 04021107, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001523](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001523)
- Wu, Z.Y., Farley, M., Turtle, D., Kapelan, Z., Boxall, J.B., Mounce, S.R., Ellis, D., Ulanicki, B., and Karney, B.J., (2011), "Online monitoring and detection", In: *Water Loss Reduction* (Chapter 9, pp. 168-189), Bentley Institute Press, Exton, PA, USA.
- Xue, Z., Tao, L., Fuchun, J., Riehle, E., Xiang, H., Bowen, N. and Singh, R.P., (2020), "Application of acoustic intelligent leak detection in an urban water supply pipe network", *Journal of Water Supply: Research and Technology (AQUA)*, 69(5), 512-520, <https://doi.org/10.2166/aqua.2020.022>
- Lopez Vega, L.L. (2022). "Analysis and modelling of leaks in the Auckland water distribution system", Doctoral Dissertation, ResearchSpace@ Auckland.
- Marzola, I., Alvisi, S., and Franchini, M., (2021), "Analysis of MNF and FAVAD model for leakage characterization by exploiting smart-metered data: The case of the Gorino Ferrarese (FE-Italy) district", *Water*, 13(5), 643, <https://doi.org/10.3390/w13050643>
- Maskit, M., and Ostfeld, A., (2014), "Leakage calibration of water distribution networks", *Procedia Engineering*, 89, 664-671, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.492>
- May, J., (1994), "Pressure dependent leakage" *World Water and Environmental Engineering*, 17(8), 10.
- Morrison, J., Tooms, S., and Lambert, A., (2024), *DMA management guidance notes*, IWA Water Loss Specialist Group, Retrieved from <https://globalnrw.com>
- Özdemir, Ö., Fırat, M., Yılmaz, S., and Usluer, M., (2021), "Analysis of the effect of pressure control on leakages in distribution systems by FAVAD equation and field applications", *Water Practice and Technology*, 16(2), 320-332, <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.024>
- Paris, P., and Erdogan, F., (1963), "A critical analysis of crack propagation laws", *Journal of Basic Engineering*, 85(4), 528-533, <https://doi.org/10.1115/1.3656900>
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D.A., and Koppel, T., (2010), "A review of methods for leakage management in pipe networks" *Urban Water Journal*, 7(1), 25-45, <https://doi.org/10.1080/15730621003610878>
- Rokstad, M.M., and Ugarelli, R.M., (2017), "Investigation of the ability to accurately estimate background leakage parameters in WDS network simulation models", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(4), 04017002, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000734](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000734)
- Romero, L., Blesa, J., Puig, V. and Cembrano, G., (2022), "Clustering-learning approach to the localization of leaks in water distribution networks", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(4), 04022003, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001527](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001527)
- Ssozi, E.N., Reddy, B.D., and van Zyl, J.E., (2016), "Numerical investigation of the influence of viscoelastic deformation on the pressure-leakage behavior of plastic pipes", *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(3), 04015057, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001085](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001085)
- Tolson, B.A., and Khedr, A., (2014), "Battle of background leakage assessment for water networks (BBLAWN): An incremental savings approach", *Procedia Engineering*, 89, 69-77, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.166>
- Trutié-Carrero, E., Seuret-Jiménez, D., Nieto-Jalil, J.M.,



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

Pipe Failure Prediction Using Weighted Logistic Regression for Managing Imbalanced and Recurring Events (Case Study: District 2 of Tehran)

پیش‌بینی شکست لوله‌ها با مدل رگرسیون لجستیک
وزن‌دار برای مدیریت داده‌های نامتعادل و رویدادهای
مکرر (مطالعه موردی: منطقه ۲ شهری تهران)

Mohsen Sattari¹ and Homayoun Motiee^{2*}

محسن ستاری^۱ و همایون مطیعی^{۲*}

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

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

2- Associate Professor, Civil, Water and Environmental Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

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

*Corresponding author, Email: h_motiei@sbu.ac.ir

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

Received: 20/11/2025

Revised: 08/06/2026

Accepted: 22/06/2026

© IWWA

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۹

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۵/۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

Predicting pipe failures in water distribution networks is crucial for transitioning from reactive maintenance to proactive management. However, developing accurate predictive models faces challenges posed by imbalanced data (failures vs. non-failures) and the recurring nature of these events, which are often overlooked. This research addresses these challenges by developing a weighted logistic regression model, a machine learning technique. The study utilized 12 years of real-world pipe failure data from the water distribution network of District 2 in Tehran. The data were randomly split into two subsets: 70% for training and 30% for validation, to verify the model's performance on unseen data. The model's performance was evaluated using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve. Results demonstrated high predictive power with an Area Under the Curve (AUC) of 0.88 on the validation set. Pipe length was identified as the most significant predictor, with an odds ratio of 1.02. A negative coefficient for pipe age (-0.104) was a key finding, attributed to survivor bias stemming from premature failures due to improper installation. This model can serve as a reliable tool for water utilities to prioritize pipe inspections and replacements, emphasizing the critical role of installation quality alongside the pipe's physical characteristics.

پیش‌بینی شکست لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب، برای گذار از نگهداری واکنشی به مدیریت پیشگیرانه، ضروری است. اما توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق با چالش‌های داده‌های نامتعادل (شکست و عدم شکست) و ماهیت تکرارشونده آن‌ها مواجه است که اغلب نادیده گرفته می‌شوند. این پژوهش با توسعه یک مدل رگرسیون لجستیک وزن‌دار به‌عنوان یک تکنیک یادگیری ماشین، به این چالش‌ها پاسخ می‌دهد. در تحقیق حاضر از داده‌های واقعی شکست لوله‌ها در شبکه توزیع آب منطقه ۲ شهری تهران به‌مدت ۱۲ سال استفاده شد. داده‌ها به‌صورت تصادفی به دو زیرمجموعه ۷۰٪ برای آموزش و ۳۰٪ برای اعتبارسنجی تقسیم شد تا عملکرد مدل بر روی داده‌های دیده‌نشده، صحت‌سنجی شود. برای ارزیابی مدل از منحنی مشخصه عملکرد استفاده و مدل با مساحت زیر نمودار برابر ۰/۸۸ در مجموعه اعتبارسنجی، قدرت پیش‌بینی بالایی را از خود نشان داد. طول لوله با نسبت شانس ۱/۰۲ مهم‌ترین پیش‌بینی‌کننده شناسایی شد. ضریب منفی سن لوله (-۰/۱۰۴) یک یافته کلیدی بود که به سوگیری بازماندگان ناشی از شکست‌های زودهنگام به‌دلیل نصب نامناسب، نسبت داده شد. این مدل می‌تواند ابزاری قابل اعتماد برای شرکت‌های آب برای اولویت‌بندی بازرسی و جایگزینی لوله‌ها بوده و بر نقش حیاتی کیفیت نصب در کنار ویژگی‌های فیزیکی لوله، تأکید دارد.

Keywords: Pipe Failure, Water Distribution Network, Machine Learning, Imbalanced Data, Recurrent Events.

کلمات کلیدی: شکست لوله، شبکه توزیع آب، یادگیری ماشین، داده‌های نامتعادل، رویدادهای تکرارشونده.

پتانسیل یادگیری و بهبود مداوم بر اساس داده‌های بازخورد است (Wang et al., 2022).

چندین مدل پیش‌بینی (فیزیکی و آماری) در طول دهه‌های گذشته برای پیش‌بینی نرخ شکست و تخریب خطوط لوله آب توسعه داده شده‌اند. مدل‌های فیزیکی برای یافتن اجزای مؤثر بر شکست لوله به داده‌های ورودی قابل توجهی نیاز دارند. بنابراین، توسعه این مدل‌ها پرهزینه و زمان‌بر است. از سوی دیگر، مدل‌های آماری، شکست لوله را با استفاده از داده‌های تاریخی پیش‌بینی می‌کنند و در مقایسه با مدل‌های فیزیکی، ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر هستند. الگوریتم‌های داده‌کاوی و یادگیری ماشین می‌توانند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای به اولویت‌بندی بازرسی‌های میدانی، بازسازی‌ها و تعویض‌ها کمک کرده و از تعداد زیادی از شکستگی‌های لوله جلوگیری کنند (Snider and McBean, 2020).

در سال‌های اخیر، محققان از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی نرخ شکستگی خطوط لوله آب استفاده کردند. روش‌های رایج مورد استفاده شامل تحلیل رگرسیون^۲، درخت تصمیم^۳ (DT)، جنگل تصادفی^۴ (RF)، ماشین‌های بردار پشتیبان^۵ (SVM) و تقویت گرادیان شدید^۶ (XGboost) هستند (Barton et al., 2022). در تحقیق Omar et al. (2023) مدل یادگیری ماشین برای پیش‌بینی خرابی‌ها در شبکه توزیع آب شهر کیچنر کانادا مقایسه شد. نتایج مطالعه نشان داد که پایش و مداخله پیشگیرانه در تنها ۸٪ از کل سامانه می‌تواند حدود ۷۲٪ از خرابی‌ها را کاهش دهد.

Robles-Velasco et al. (2020) از رگرسیون لجستیک^۷ (LR) و طبقه‌بندی بردار پشتیبان^۸ (SVC) برای پیش‌بینی احتمال خرابی استفاده کردند. آن‌ها از یک تکنیک نمونه‌گیری کمتر برای مقابله با مجموعه داده‌های نامتوازن استفاده کردند. علاوه بر این، آن‌ها مدل‌ها را با توجه به نوع ماده همگن کردند. مطالعه آن‌ها عملکرد کمی بهتر برای LR در مقایسه با SVC را نشان داد و همچنین، برای مطالعه موردی خود، آن‌ها دریافتند که با جایگزینی تنها ۳٪ از خطوط لوله، می‌توان از حدود ۳۰٪ از خرابی‌ها جلوگیری کرد.

Karadirek et al. (2024) با بهره‌گیری از رگرسیون لجستیک، خرابی لوله‌ها را براساس داده‌های دو ساله رخدادهای ثبت‌شده پیش‌بینی کردند. در این مدل، عواملی نظیر عمر لوله، قطر، جنس و فشار عملیاتی مورد توجه قرار گرفت. مدل حاصل دقتی برابر با ۷۰/۱٪ به‌دست آورد و نشان داد که لوله‌های قدیمی‌تر و همچنین آن‌هایی که از مواد PVC یا HDPE ساخته شده‌اند،

شبکه‌های توزیع آب از مهم‌ترین اجزای زیرساخت‌های شهری مدرن به‌شمار می‌آیند و نقشی کلیدی در تأمین مستمر آب آشامیدنی برای بخش‌های مختلف از جمله مصارف خانگی، صنعتی و کشاورزی دارند. این سامانه‌های وسیع که عمدتاً در زیر سطح زمین قرار گرفته‌اند، نشان‌دهنده سرمایه‌گذاری‌های قابل توجه و بلندمدت در حوزه زیرساختی هستند. با این حال، بسیاری از این شبکه‌ها به‌دلیل عبور از دوره بهره‌وری مطلوب و قرارگرفتن در مرحله فرسودگی، بیش از پیش در معرض آسیب، خرابی و وقوع اختلالات ناشی از نقص‌های فنی قرار دارند (Lešťáková et al., 2024).

افت فشار، نارضایتی مشترکین، تلفات سنگین اقتصادی، مدیریت پرهزینه و فرسایش بسترهای لوله را می‌توان از جمله اثرات شکست لوله‌ها در نظر گرفت که به‌منظور جلوگیری از اتلاف انرژی و کمک به حفظ تأمین آب باید کاهش شکست را به‌عنوان اولویت اول و عاملی برای افزایش پایداری آب شهرها در نظر گرفت (نوذری و همکاران، ۱۴۰۲). صنعت آب در حال حاضر در مسیر تغییر از رویکردهای سنتی نگهداری واکنشی به سمت راه‌حل‌های پیش‌بینی‌کننده‌تر و پیشگیرانه‌تر روی آورده است. نگهداری واکنشی شامل نظارت، تعمیر و تعویض لوله‌ها در پاسخ به خرابی‌ها می‌شود. با این حال، یک رویکرد پیشگیرانه‌تر شامل مدل‌سازی زوال شبکه و ارزیابی خطر خرابی در اجزای آن برای جلوگیری از ترکیدگی است. از طریق استفاده از روش‌های داده‌محور و تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌کننده، ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع آب و پیش‌بینی وقوع خرابی‌ها امکان‌پذیر می‌شود. در نتیجه، این امر امکان اجرای نگهداری پیش‌بینی‌کننده را به‌عنوان جزئی از نگهداری پیشگیرانه فراهم می‌کند (Latifi et al., 2024). ارزیابی دقیق یکپارچگی پیش‌بینی در سیستم‌های خط لوله برای اجرای استراتژی‌های نگهداری پیشگیرانه که از خرابی‌های فاجعه‌بار جلوگیری کرده و قابلیت اطمینان خدمات را تضمین می‌کنند، بسیار مهم است. در دهه‌های اخیر، کاربرد یادگیری ماشین^۱ به‌عنوان یک تکنیک امیدوارکننده برای پردازش و استخراج تعاملات پیچیده بین عوامل مؤثر و روندهای خرابی در سیستم‌های شبکه توزیع آب شهری ظهور کرده است (Chen et al., 2025). مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین به‌دلیل مهارتشان در مدیریت مجموعه داده‌های گسترده و پیچیده، به‌عنوان ابزاری برجسته در حوزه پیش‌بینی شکست هستند. نقاط قوت اصلی آن‌ها شامل دقت بالا، قابلیت‌های پیش‌بینی قوی، سازگاری و

به‌طور معناداری بیشتر مستعد خرابی هستند، درحالی‌که لوله‌های چندی انعطاف‌پذیر از مقاومت بالاتری برخوردارند.

Karimian et al. (2021) یک روش رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی برای پیش‌بینی تعداد شکستگی‌های خط لوله آب توسعه دادند. متغیرهای مستقل از طریق بهترین رگرسیون زیرمجموعه انتخاب و خطوط لوله براساس طول، سن، جنس و قطر آن‌ها خوشه‌بندی شدند. این مطالعه نشان‌داد که خطوط لوله با قطر کوچکتر احتمال خرابی بیشتری دارند. هم‌چنین یک تحلیل حساسیت بین طول، جنس و قطر انجام و نتیجه‌گیری شد که مورد دوم بیشترین حساسیت را روی تعداد پیش‌بینی‌شده شکستگی‌ها دارد.

برخی از محققین رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی را با خوشه‌بندی k-means برای پیش‌بینی شکست خطوط لوله ترکیب کردند و با ادغام این دو روش دقت پیش‌بینی شکست را در مقایسه با رویکرد رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی غیرخوشه‌ای به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشیدند (Farmani et al., 2017; Kakoudakis et al., 2017). این پژوهش‌ها به‌طور کلی نشان دادند که عواملی مانند طول، قطر، سن و جنس لوله، پیش‌بینی‌کننده‌های کلیدی شکست هستند.

یک چالش مهم در کاربرد مدل مبتنی بر یادگیری ماشین، عدم توجه کافی به اندازه و ویژگی‌های مجموعه داده‌ها در طول انتخاب مدل است. این غفلت اغلب منجر به بروز مشکلاتی در کارایی و کاربردپذیری می‌شود. به‌عنوان مثال، مدل‌های مبتنی بر درخت و بردار پشتیبان معمولاً در مجموعه داده‌های کوچک تا متوسط عملکرد خوبی دارند و دقت بالایی را با نمونه‌های کمتر ارائه می‌دهند. با این حال، در مجموعه داده‌های بزرگ، این مدل‌ها ممکن است به دلیل تنظیم پیچیده فرایارامتر و تقاضای محاسباتی بالا، کارایی کمتری داشته باشند. مدل‌های پیچیده‌تر مانند جنگل تصادفی و درخت تقویت شده ممکن است دقت بالایی ارائه دهند، اما در معرض خطر بیش‌برازش^۹ قراردارند و تفسیرپذیری کمتری دارند (Solomatine and Ostfeld, 2008). مدل رگرسیون لجستیک به دلایل متعددی برای پیش‌بینی شکست لوله‌ها گزینه‌ی بسیار مناسبی محسوب می‌شود. این روش، قابلیت اطمینان بالایی در انجام وظایف طبقه‌بندی دودویی^{۱۰} دارد؛ به‌عنوان مثال، می‌تواند به‌طور دقیق پیش‌بینی کند که آیا یک لوله در معرض شکست قرار خواهد گرفت یا خیر (Rifaai et al., 2022). با توجه به این‌که این مدل قادر به تخمین احتمال وقوع یک رویداد براساس ویژگی‌های ورودی است، در درک رابطه بین متغیرهای مختلف و نتیجه‌ی موردنظر (شکست لوله) بسیار مؤثر

عمل می‌کند. علاوه بر این، رگرسیون لجستیک تفسیرپذیری نتایج را فراهم می‌آورد و امکان درک تأثیر هر ویژگی بر احتمال خرابی لوله را میسر می‌سازد. این قابلیت تفسیر برای تصمیم‌گیری آگاهانه در مدیریت زیرساخت‌ها بسیار مهم است (Asadi, 2024). با این‌که این مدل، به راحتی قابل تفسیر هست اما ممکن است در مدل‌سازی روابط غیرخطی موجود در داده‌ها ناکارآمد باشد (Barton et al., 2022).

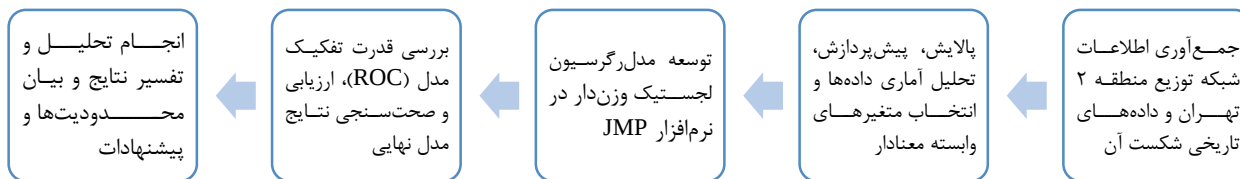
با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در حوزه داده‌کاوی و یادگیری ماشین، پژوهش‌های گذشته در زمینه مدل‌سازی شکست لوله‌های آب با چالش‌های متعددی روبرو بوده‌اند که منجر به یک شکاف تحقیقاتی مشخص بین پژوهش‌های آکادمیک و نیازهای عملی دنیای واقعی شده و این امر اثربخشی مدل‌ها را محدود کرده است. بسیاری از مطالعات پیشین، به‌طور هم‌زمان با سه چالش کلیدی روبرو هستند که کارایی عملی آن‌ها را محدود می‌کند. چالش اول، عدم تعادل کلاس‌ها است؛ در داده‌های شکست، رویداد شکست (کلاس اقلیت) بسیار نادرتر از عدم شکست (کلاس اکثریت) است که این امر مدل‌ها را به سمت پیش‌بینی کلاس اکثریت سوگیری می‌دهد. در واقع در مجموعه داده‌های واقعی اتفاقات شبکه توزیع آب، تعداد مشاهدات مربوط به لوله‌های سالم به مراتب بیشتر از لوله‌های دچار شکست است. این عدم تعادل باعث می‌شود مدل‌های یادگیری ماشین تمایل به پیش‌بینی کلاس اکثریت (لوله‌های سالم) پیدا کرده و در شناسایی کلاس اقلیت (لوله‌های شکسته) عملکرد ضعیفی از خود نشان دهند. چالش دوم، نادیده گرفتن ماهیت تکرارشونده شکست‌ها است. یک لوله واحد ممکن است چندین بار شکست بخورد که این خود یک سیگنال قوی از ضعف در آن لوله است. در عمل وقتی یک لوله دچار شکست شده، ممکن است به دلایل ساختاری یا محیطی، در معرض ریسک بالاتری برای شکست‌های آتی قرار داشته باشد. نادیده گرفتن این ویژگی تکرارشونده، منجر به از دست رفتن اطلاعات ارزشمندی در مورد پویایی خرابی لوله‌ها و کاهش دقت پیش‌بینی می‌شود. چالش سوم، ضعف در فرآیند صحت‌سنجی است. بسیاری از مطالعات، عملکرد مدل خود را صرفاً بر روی داده‌های آموزشی گزارش می‌دهند که این امر، پتانسیل بیش‌برازش را افزایش می‌دهد و در مورد توانایی مدل در تعمیم نتایج به داده‌های جدید، تردید جدی ایجاد می‌کند.

این پژوهش تلاش دارد تا به‌طور مستقیم به این شکاف تحقیقاتی سه‌گانه پاسخ دهد. هدف اصلی، توسعه یک چارچوب مدل‌سازی جامع و قابل اعتماد برای پیش‌بینی شکست لوله‌های آب است که هم‌زمان این سه چالش را هدف قراردهد. در حوزه

قوی برای ارزیابی دقیق عملکرد و قابلیت تفسیر نتایج، که در حوزه مدیریت زیرساخت‌های آب اهمیت زیادی دارد. این ترکیب منحصربه‌فرد، چارچوبی جامع و قابل اعتماد برای پیش‌بینی و تحلیل شکست لوله‌ها ارائه می‌دهد که نه تنها در بهبود دقت پیش‌بینی، بلکه در ارتقای قابلیت تصمیم‌گیری‌های عملیاتی و سیاست‌گذاری‌های نگهداری، کاربردی و کارآمد است.

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف توسعه یک مدل پیش‌بینی‌کننده برای شکست لوله‌های آب، با رویکردی داده-محور و با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک انجام شده است. فرآیند کلی تحقیق شامل جمع‌آوری و پالایش داده‌های تاریخی شکست، پیش‌پردازش و مهندسی ویژگی، توسعه مدل و ارزیابی عملکرد آن بوده است که در ادامه به تفصیل شرح داده می‌شود. در شکل ۱ روندنمای پژوهش حاضر نشان داده شده است.

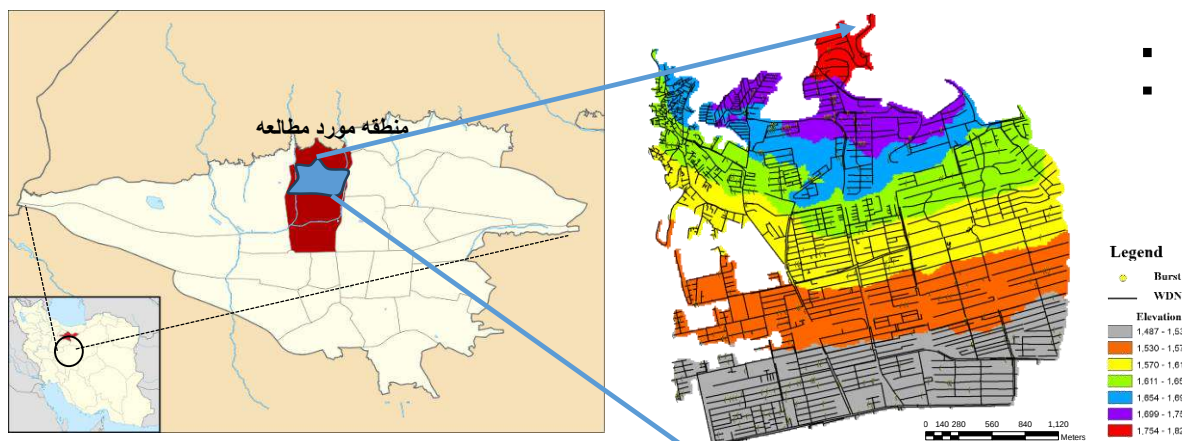


شکل ۱- روندنمای پژوهش حاضر

تهران هستند، استفاده شده است. منطقه مورد مطالعه، با ۴۷/۱ کیلومترمربع مساحت، در محدوده میانی و شمالی شهر تهران و در ارتفاع حدود ۱۴۵۰-۱۸۵۰ متر از سطح آزاد دریا قرار دارد. منطقه مورد مطالعه از شما به رشته کوه البرز، از شرق به بلوار بیست و چهار متری، از غرب به بزرگراه یادگار امام و از جنوب به بلوار دادمان محدود می‌شود (شکل ۲).

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

برای بررسی و ارزیابی حوادث رخ داده از آمار حوادث روی داده در شبکه‌ی توزیع آب منطقه ۲ شهری تهران شامل ناحیه ۱ (سعادت آباد و دریا)، ناحیه ۸ (آسمان‌ها و سپهر) و ناحیه ۹ (فراز، پرواز و فرحزاد) که بخشی از منطقه ۱ شرکت آب و فاضلاب



شکل ۲- محدوده مورد بررسی (منطقه ۱ شرکت آب و فاضلاب تهران، منطقه ۲ شهری تهران)

و حوادث رخ داده (به تعداد مجموع ۵۷۸ حادثه) موضوع این پژوهش در شبکه توزیع آب در منطقه مورد مطالعه برای جنس لوله‌های مختلف در جدول ۱ ارائه شده است.

در این تحقیق مجموع طول خطوط لوله این نواحی حدوداً ۲۰۰ کیلومتر است که از جنس‌های چدن داکتیل^{۱۱} (DI)، پلی‌اتیلن^{۱۲} (PE)، آزیست^{۱۳} (AC)، فولادی^{۱۴} (Steel) و یوپی‌وی‌سی^{۱۵} (UPVC) تشکیل شده است. آمار اطلاعات لوله‌ها

جدول ۱- مشخصات و تعداد شکست‌ها لوله‌ها بین سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۳

جنس لوله	تعداد لوله‌ها	مجموع طول (متر)	درصد لوله در شبکه	تعداد شکست	فرکانس شکست در هر متر لوله
AC	۴۱	۱,۶۳۶/۶	۰/۸	۲۱	۰/۰۱۲۸
DI	۲۵۶۹	۱۳۹,۱۵۶	۶۹/۵	۳۱۹	۰/۰۰۲۳
PE	۱۴۱۳	۵۸,۰۵۴	۲۹	۲۳۲	۰/۰۰۴
ST	۱۷	۱,۲۸۲/۴	۰/۶	۳	۰/۰۰۲۳
UPVC	۹	۸۳/۶	۰	۳	۰/۰۳۵۹
مجموع	۴,۰۴۹	۲۰۰,۲۱۲	۱۰۰	۵۷۸	---

با مشکل عدم تعادل داده‌ها مقابله کند. برای این منظور به هر مشاهده مربوط به کلاس شکست، وزنی معادل با $7/82$ که برابر با نسبت تعداد لوله‌های سالم (۳۵۹۰) به لوله‌های دچار شکست بدون تکرار شکست (۴۵۹) است، اختصاص داده شد. این رویکرد که به‌عنوان یادگیری حساس به هزینه شناخته می‌شود، هزینه خطای دسته‌بندی اشتباه یک لوله شکسته را افزایش داده و مدل را تشویق می‌کند تا حساسیت بیشتری در شناسایی این کلاس نشان دهد (He and Garcia, 2009).

با توجه به آمار اخذ شده از شرکت آب و فاضلاب منطقه ۱ (اطلاعات و مشخصات شبکه توزیع آب نواحی ۱، ۸ و ۹ منطقه ۲ شهر تهران) متغیرهای مستقل در توسعه مدل شامل؛ طول، عمر، قطر، عمق نصب، فشار و جنس لوله‌ها بوده است. لازم به ذکر است با توجه به این‌که فشار در شبکه توزیع دارای مقدار ثابتی نیست و علاوه بر این، تأثیر فشار هیدرولیکی بر دقت مدل پیش‌بینی ترکیدگی لوله مبتنی بر داده، حائز اهمیت است (مصلحی و جلیلی، ۱۳۹۵)، در این پژوهش براساس مطالعات قبلی پژوهشگران در این زمینه، از فشار هیدرولیکی متوسط استفاده شده است (Shirzad and Safari, 2019). در جدول ۲ نمونه اطلاعات ورودی به نرم‌افزار برای توسعه مدل، نشان داده شده است.

لازم به ذکر است در داده‌های منطقه مورد مطالعه لوله‌های با طول کمتر از ۲ متر (لوله‌های مربوط به انشعابات که تأثیری در شبکه توزیع ندارند) و هم‌چنین با قطر کمتر از ۶۰ میلی‌متر (حداقل قطر در شبکه ۸۰ میلی‌متر است) از داده‌های ورودی حذف شدند. در جدول ۳ توصیف آماری لوله‌های موجود شبکه (حداقل، حداکثر و متوسط پارامترها) ارائه شده است.

همان‌طور که دیده می‌شود، لوله‌های چدن داکتیل (DI) با $69/5\%$ ، بیشترین سهم را در ساختار شبکه دارند، درحالی‌که لوله‌های آزیست سیمانی (AC) و یوپی‌وی‌سی (UPVC) با وجود سهم کمتر، بالاترین فرکانس شکست را به ازای هر متر طول لوله به‌خود اختصاص داده‌اند.

۲-۲- پیش‌پردازش داده‌ها و مهندسی ویژگی

پیش از توسعه مدل، مجموعه داده‌های خام تحت چندین مرحله پیش‌پردازش قرارگرفت تا برای الگوریتم یادگیری ماشین مورد استفاده در این پژوهش (رگرسیون لجستیک) آماده شود. این مراحل عبارت بودند از:

الف) تعریف متغیر وابسته: متغیر هدف، شکست^{۱۶} به‌صورت یک متغیر دودویی تعریف شد؛ مقدار ۱ برای لوله‌هایی که حداقل یک بار در دوره مطالعه دچار شکست شده‌اند و ۰ برای سایر لوله‌ها. لازم به ذکر است منظور از شکست در این تحقیق شکست فیزیکی لوله‌ها در شبکه توزیع، است.

ب) مدیریت رویدادهای تکرارشونده: برای لحاظ‌کردن اطلاعات مربوط به شکست‌های مکرر یک لوله، ساختار داده‌ها به یک قالب رویداد-زمان^{۱۷} تبدیل شد. در این ساختار، هر شکست ثبت‌شده برای یک لوله به‌عنوان یک مشاهده مجدد در نظر گرفته شد و سن لوله در زمان وقوع آن شکست به‌روزرسانی شد.

ج) مدیریت عدم تعادل کلاس‌ها: مجموعه داده به‌شدت نامتعادل بود (تنها $11/3\%$ لوله‌ها دچار شکست شده‌اند). برای جلوگیری از سوگیری مدل به‌سمت کلاس اکثریت، از تکنیک وزن‌دهی مجدد^{۱۸} استفاده شد. در این روش، به کلاس اقلیت (لوله‌های شکسته) وزن بیشتری داده می‌شود تا مدل به شناسایی دقیق‌تر آن‌ها ترغیب شده و ضمن حفظ تفسیرپذیری مدل، به‌طور مؤثری

جدول ۲- نمونه اطلاعات ورودی به نرم افزار برای توسعه مدل

Label	Dep. (m)	Dia. (mm)	Material	Len. (m)	Pr (mH ₂ O)	Age (year)	Weight	Failure	Validation	Failure_Count
P-277	1.1	60	DI	14.3	38.5	20.01644	1	0	0	0
layelole-	1.1	60	DI	14.5	62.5	27.02192	1	0	1	0
P-128	1.1	60	DI	15.2	36.5	21.03836	1	0	0	0
layelole-	1.1	63	UPVC	13	69	29.07123	7.82	1	0	1
layelole-	1.3	63	PE	13.1	48.5	21.07397	1	0	1	0
layelole-	1.1	63	PE	13.2	70	20.06027	1	0	0	0
layelole-	1.2	63	PE	13.8	45	21.05753	1	0	0	0

جدول ۳- توصیف آماری پارامترهای در نظر گرفته شده

پارامتر	طول (متر)	قطر (میلی متر)	سن (سال)	عمق (متر)	فشار (متر آب)
حداکثر	۸۵۱/۴	۷۰۰	۴۵	۲/۲	۹۰
حداقل	۲	۶۰	۰/۰۴	۰/۵	۲
متوسط	۴۹/۶	۱۵۵	۲۳/۸	۱/۲	۵۱/۸

۲-۳- توسعه مدل پیش‌بینی‌کننده

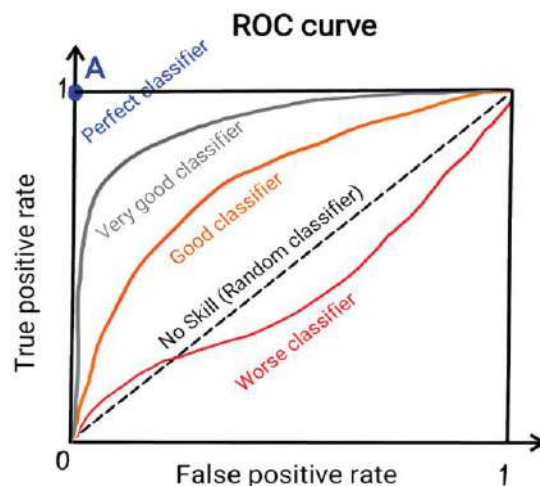
در این پژوهش، مدل رگرسیون لجستیک به‌عنوان یک تکنیک یادگیری ماشین تفسیرپذیر و کلاسیک برای پیش‌بینی احتمال شکست لوله به‌کار گرفته شد. این مدل به‌دلیل توانایی در شناسایی روابط بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و یک خروجی دودویی، انتخاب شد (مطیعی و قاسم نژاد، ۱۳۹۶). مراحل تحلیل داده، شامل پیش‌پردازش، توسعه مدل، اعمال وزن‌ها و ارزیابی عملکرد، با بهره‌گیری از نرم‌افزار آماری JMP Pro نسخه ۱۷,۲,۰ انجام شد. این نرم‌افزار که توسط شرکت SAS Institute Inc توسعه یافته، به‌عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند در حوزه تحلیل و اکتشاف داده‌های آماری شناخته می‌شود. دلیل انتخاب این پلتفرم، توانمندی‌های قابل‌توجه آن در مدل‌سازی رگرسیونی، مدیریت داده‌های نامتوازن از طریق اختصاص وزن و همچنین ارائه ابزارهای تحلیلی بصری و جامع برای ارزیابی مدل‌ها بوده است. افزون بر این، ترکیب محیط کاربری گرافیکی تعاملی با روش‌های پیشرفته آماری و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، این نرم‌افزار را به گزینه‌ای مناسب و پرکاربرد برای تحلیل داده‌های پیچیده در میان پژوهشگران و متخصصان تبدیل کرده است (Gross and Harris, 2013). برای اطمینان از قابلیت تعمیم‌پذیری مدل و جلوگیری از بیش‌برازش، کل مجموعه داده به‌صورت تصادفی به دو زیرمجموعه تقسیم شد؛ ۷۰٪ برای آموزش^{۱۹} مدل و ۳۰٪ برای اعتبارسنجی^{۲۰}. مدل به‌طور کامل روی مجموعه آموزشی، آموزش داده شد و عملکرد آن بر روی مجموعه اعتبارسنجی که مدل آن‌ها را ندیده بود، صحت‌سنجی شد.

۲-۴- معیارهای ارزیابی مدل

منحنی مشخصه عملکرد سیستم^{۲۱} (ROC) به‌عنوان یک

ابزار کمی در ارزیابی مسائل طبقه‌بندی به‌کار می‌رود و امکان سنجش دقیق توان تشخیص یک سامانه را فراهم می‌سازد. در این رویکرد، عملکرد مدل بر پایه شاخص‌هایی ارزیابی می‌شود که وابسته به قضاوت‌های فردی نبوده و بر معیارهای عینی استوار هستند؛ از این‌رو، تحلیل ارائه‌شده از دقت و قابلیت تفکیک‌پذیری مدل، قابل‌اعتمادتر خواهد بود (Chang and Newman., 2024). کارایی الگوریتم‌های دسته‌بندی دو دویی معمولاً به‌وسیله شاخص‌هایی مثل حساسیت^{۲۲} و ویژگی^{۲۳} سنجیده می‌شوند. اما در نمودار ROC هر دوی این شاخص‌ها ترکیب شده و به‌صورت یک منحنی نمایش داده می‌شوند. اغلب برای بررسی کارایی الگوریتم‌های دسته‌بندی یا ایجاد داده‌های رسته‌ای از منحنی ROC استفاده می‌کنند. این موضوع در شاخه یادگیری ماشین با نظارت، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

منحنی ROC با رسم نرخ مثبت واقعی^{۲۴} (TPR) در مقابل نرخ مثبت کاذب^{۲۵} (FPR) در سطوح مختلف آستانه تصمیم‌گیری شکل می‌گیرد. در این چارچوب، TPR بیانگر نسبت پیش‌بینی‌های صحیح از وقوع شکست به کل رخدادهای واقعی است و با عناوینی نظیر حساسیت، بازیابی یا احتمال کشف نیز شناخته می‌شود. در مقابل، FPR نشان‌دهنده سهم پیش‌بینی‌های نادرست از وقوع شکست در میان مواردی است که در واقع شکست رخ نداده است و معمولاً به‌عنوان احتمال هشدار کاذب در نظر گرفته می‌شود؛ این شاخص را می‌توان به‌صورت (۱ منهای ویژگی) نیز بیان کرد. در شکل ۳، منحنی ROC ارتباط میان نرخ مثبت واقعی به‌عنوان منفعت و نرخ مثبت کاذب به‌عنوان هزینه را به‌خوبی نمایش می‌دهد (Salehinasab and Goshtasbi Rad, 2025).



شکل ۳- نمودار منحنی ROC (Salehinasab and Goshtasbi Rad, 2025)

مدل به‌طور مداوم نتایج نادرست ارائه دهد، با معکوس‌سازی خروجی‌های آن می‌توان به عملکردی قابل قبول دست یافت. از منحنی ROC می‌توان برای ارزیابی کارایی مدل‌های رگرسیون لجستیک نیز بهره گرفت. در این زمینه، معیار مساحت زیر منحنی (AUC) شاخصی مهم تلقی می‌شود؛ به گونه‌ای که هرچه مقدار آن بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده توان تفکیک‌پذیری و عملکرد بهتر مدل خواهد بود (Li et al., 2019).

در مسئله پیش‌بینی دو کلاسه‌ای (کلاسه‌بندی دودویی) خروجی طبقه‌بندی، شامل ۴ نوع نتیجه است. به صورتی که دسته اول، همان پیش‌بینی‌های صحیح هستند که شامل مثبت صحیح (TP) و منفی صحیح (TN) می‌شوند و دسته دوم نیز همان پیش‌بینی‌های نادرست هستند که شامل مثبت نادرست (FP) و منفی نادرست (FN) می‌شوند و می‌توان آن‌ها را در قالب ماتریسی که در جدول ۴ نشان داده شده است (که به صورت ۲×۲ است) ارائه کرد (Wu and Liu., 2017).

جدول ۴- نتایج پیش‌بینی دو کلاسه‌ای (ماتریس درهم ریختگی^{۲۷})

Status	Predicted Positive	Predicted Negative
Actual Positive	True Positives (TP)	False Negatives (FN)
Actual Negative	False Positives (FP)	True Negatives (TN)

معادلات یکسانی می‌باشند که تمامی آن‌ها در کنار هم قرار داده شده‌اند و معادلات آن‌ها نیز به شرح زیر است (Wu and Liu., 2017).

$$\text{Accuracy} = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN} \quad (۱)$$

$$\text{Sensitivity} = \text{Recall} = \text{True Positive Rate} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (۲)$$

با توجه به این که نرخ مثبت واقعی (TPR) معادل حساسیت و نرخ مثبت کاذب (FPR) برابر با ۱ منهای ویژگی است، نمودار ROC در برخی منابع به صورت نمودار حساسیت در برابر ۱ منهای ویژگی نیز معرفی می‌شود. هر خروجی پیش‌بینی یا هر حالت از ماتریس درهم‌ریختگی، به صورت یک نقطه در فضای ROC قابل نمایش است. در حالت ایده‌آل، بهترین مدل پیش‌بینی نقطه‌ای در گوشه بالای سمت چپ این فضا، یعنی مختصات (۰، ۱)، تولید می‌کند که بیانگر حساسیت کامل (عدم وجود منفی کاذب) و ویژگی کامل (عدم وجود مثبت کاذب) است؛ این وضعیت به عنوان طبقه‌بندی بی نقص شناخته می‌شود. در مقابل، عملکرد تصادفی به صورت نقاطی روی خط قطری از گوشه پایین چپ تا گوشه بالا راست ظاهر می‌شود که فضای ROC را به دو بخش تقسیم می‌کند. نقاطی که بالاتر از این خط قرار دارند نشان‌دهنده عملکردی بهتر از حد تصادفی هستند، در حالی که نقاط زیر آن بیانگر عملکرد ضعیف‌تر از تصادف هستند. جالب آن که اگر یک

برای ارزیابی عملکرد مدل‌سازی ناشی از حوادث به وقوع پیوسته در شبکه توزیع آب مورد مطالعه، از روابط (۱) تا (۵) استفاده شده است. هرچه مقدار این معادلات بیشتر باشد، به معنای عملکرد بهتر مدل و بالاتر بودن قدرت مدل در پیش‌گویی و دسته‌بندی داده‌ها است. دقت کلی^{۲۸}، حساسیت، ویژگی، دقت^{۲۹} (صحت) و F-Score از جمله معادلاتی هستند که برای انجام ارزیابی مدل‌سازی‌ها، از محبوبیت و کارایی بالاتری در میان پژوهشگران برخوردارند. در این میان برخی از مفاهیم دارای

نتیجه، مدل نهایی دارای پنج متغیر پیش‌بینی‌کننده معنادار شامل طول، سن، جنس، قطر و فشار لوله است.

۳-۲- ارزیابی کلی و معناداری مدل نهایی

معیارهای برازش برای مدل نهایی ۵ متغیره مانند آزمون نسبت درست‌نمایی^{۳۰} نشان می‌دهد که مدل به‌طور کلی بسیار معنادار است ($\text{ChiSq} < 0.0001$) و عملکرد آن به مراتب بهتر از یک مدل صرف (مدل بدون هیچ متغیر پیش‌بینی‌کننده) است. هم‌چنین معیار RSquare (U) برابر با ۰/۳۵ است که نشان می‌دهد مدل حدود ۳۵٪ از تغییرات در لگاریتم احتمالات شکست را توضیح می‌دهد. این مقدار برای مسائل مهندسی واقعی که با داده‌های پرنویز همراه هستند، یک مقدار قابل‌قبول محسوب می‌شود. مقادیر بین ۰/۲ تا ۰/۴ برای این معیار، عموماً به‌عنوان یک برازش خوب در نظر گرفته می‌شوند (Hosmer et al., 2013).

۳-۳- تحلیل اهمیت و تأثیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده

جدول ۵، اهمیت آماری هر متغیر را بر اساس LogWorth و P-Value نشان می‌دهد. نتایج رتبه‌بندی زیر را برای متغیرها مشخص می‌کند: قطر لوله > فشار > جنس لوله > سن لوله > طول لوله.

جدول ۶ ضرایب تخمین‌زده شده برای هر متغیر را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است نرم‌افزار به‌صورت خودکار یکی از متغیرها (نه بهترین و نه بدترین) را به‌عنوان مرجع در نظر می‌گیرد. در این پژوهش برای متغیر دسته‌بندی شده جنس، UPVC به‌عنوان گروه مرجع در نظر گرفته شده است. نسبت شانس برای جنس یعنی متغیر دیگر به چه نسبتی از متغیر مرجع (با ثابت بودن سایر متغیرها) دارای شانس شکست است. به‌عنوان نمونه لوله آریست ۳/۳۸ برابر بیشتر از لوله UPVC با شکست مواجه خواهد شد. نسبت شانس برای سایر متغیرها نیز میزان اهمیت آن متغیر برای شکست است که هرچه عدد بزرگتر از ۱ باشد یعنی تأثیر مثبت در شکست و در صورتی که عدد کمتر از ۱ باشد یعنی تأثیر منفی در شکست خواهد داشت.

$$\text{Specificity} = \text{True Negative Rate} = \frac{TN}{TN+FP} \quad (۳)$$

$$\text{Precision} = \text{Positive Predictive Value} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (۴)$$

$$\text{F-Score} = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (۵)$$

که TP : مثبت صحیح، TN : منفی صحیح، FP : مثبت نادرست و FN : منفی نادرست هستند.

۳- نتایج و بحث

در این بخش، یافته‌های حاصل از فرآیند توسعه و ارزیابی مدل رگرسیون لجستیک وزن‌دار برای پیش‌بینی شکست لوله ارائه شده است. نتایج در شش زیربخش اصلی ارائه می‌شود.

۳-۱- فرآیند توسعه و انتخاب مدل نهایی

در مرحله اولیه مدل‌سازی، تمام متغیرهای بالقوه مهندسی و فیزیکی شامل طول، سن، جنس، قطر، فشار و عمق نصب لوله در مدل رگرسیون لجستیک گنجانده شد. این رویکرد مبتنی بر این فرضیه بود که عمق نصب می‌تواند از طریق تأثیرگذاری بر بار خاک و تنش‌های محیطی، بر پایداری لوله مؤثر باشد. با این حال، نتایج اولیه مدل نشان داد که متغیر عمق نصب هیچ‌گونه تأثیر آماری معناداری بر احتمال شکست ندارد ($P\text{-Value} = 0.79$, $\text{LogWorth} = 0.101$). لازم به ذکر است برای معنادار بودن یک متغیر مقدار P-Value باید کمتر از ۰/۰۵ باشد و هرچه به صفر نزدیکتر که در نتیجه LogWorth عددی بزرگتر خواهد بود، نشان دهنده معناداری بیشتر متغیر است. به‌منظور رعایت اصل سادگی مدل و توسعه یک مدل بهینه و قابل تفسیر، این متغیر غیرمعنادار از مدل نهایی حذف شد. اصل سادگی، بیان می‌کند که در میان مدل‌هایی با عملکرد مشابه، مدل ساده‌تر (با متغیرهای کمتر) ترجیح داده می‌شود. حذف متغیرهای بی‌اثر نه تنها مدل را ساده‌تر می‌کند، بلکه با کاهش پارامترهای غیرضروری، خطر بیش‌برازش را نیز کاهش می‌دهد (Burnham and Anderson, 2002).

جدول ۵- اهمیت آماری متغیرهای پیش‌بینی‌کننده در مدل نهایی

متغیر	LogWorth	P-Value
Len. (m)	407.191	< 0.0001
Age (year)	99.784	< 0.0001
Material	29.615	< 0.0001
Pr. (m H ₂ O)	5.77	< 0.0001
Dia. (mm)	4.778	< 0.0001

جدول ۶- ضرایب تخمین زده شده مدل نهایی

متغیر	ضریب (Estimate)	نسبت شانس (Odds Ratio)	P-Value
Intercept	1.429	-	< 0.0001
Material [AC]	1.218	3.38	< 0.0001
Material [DI]	-1.306	0.27	< 0.0001
Material [PE]	-0.858	0.42	< 0.0001
Material [ST]	-0.874	0.42	0.122
Len. (m)	0.022	1.02	< 0.0001
Pr. (m H ₂ O)	0.011	1.01	< 0.0001
Dia. (mm)	-0.0024	0.998	< 0.0001
Age (year)	-0.104	0.9	< 0.0001

مطالعه نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از شکست‌ها در سنین پایین و یا تکرار شکست‌ها در مدتی کوتاه (به‌عنوان مثال برای یکی از لوله‌ها در مدت یک ماه، ۳ شکست ثبت شد) رخ می‌دهد که این امر می‌تواند ناشی از مشکلات کیفیت ساخت یا نصب نامناسب باشد. در نتیجه، لوله‌هایی که به سنین بالاتر می‌رسند، نماینده گروهی از بازماندگان مقاوم هستند که ذاتاً مستعد شکست کمتری هستند. مدل رگرسیون، این ویژگی انتخابی را به اشتباه به‌عنوان یک اثر محافظتی از افزایش سن تفسیر می‌کند. این یافته با نتایج مطالعات دیگر در زمینه قابلیت اطمینان زیرساخت‌ها مطابقت دارد که نشان می‌دهند نرخ شکست لوله‌ها اغلب یک منحنی U شکل است: در ابتدا به دلیل مشکلات اولیه بالا، سپس کاهش یافته و در نهایت به دلیل فرسودگی مجدداً افزایش می‌یابد (Kleiner and Rajani, 2001). همچنین رابطه منفی سن لوله و احتمال شکست را می‌توان با مدل نظری عمر شکست لوله که توسط Scheidegger et al. (2015) ارائه شده است، به‌خوبی توجیه کرد. شکل ۴، منحنی نظری ریسک شکست در طول عمر یک لوله را به تصویر می‌کشد. این مدل سه فاز اصلی را پیش‌بینی می‌کند: فاز اول با ریسک بالا به دلیل نقص‌های اولیه، فاز دوم با ریسک پایین و پایدار (عمر مفید)، و فاز سوم با ریسک فزاینده به دلیل فرسودگی.

جنس لوله: نتایج نشان می‌دهد که با ثابت نگه داشتن سایر شرایط، لوله‌های آریست سیمانی (AC) به‌طور قابل توجهی مستعدتر به شکست نسبت به لوله‌های UPVC هستند (شانس شکست ۳/۴ برابر). در مقابل، لوله‌های چدن داکتیل (DI) و پلی‌اتیلن (PE) به‌عنوان بادوام‌ترین گزینه‌ها شناسایی شدند که شانس شکست آن‌ها به ترتیب ۷۳٪ و ۵۸٪ کمتر از لوله‌های UPVC است.

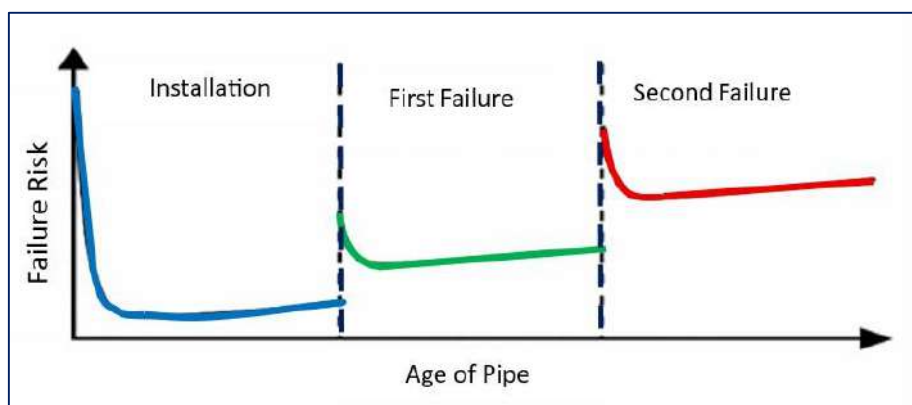
طول لوله: ضریب مثبت و معنادار (۰/۰۲۲) نشان می‌دهد که با افزایش طول لوله، احتمال شکست نیز افزایش می‌یابد.

فشار: ضریب مثبت (۰/۰۱۱) نشان‌دهنده تأثیر مثبت فشار بر احتمال شکست است.

قطر لوله: ضریب منفی (۰/۰۰۲۴-) نشان می‌دهد که لوله‌های با قطر بزرگتر، احتمال شکست کمتری دارند.

سن لوله: جالب‌ترین یافته، ضریب منفی و بسیار معنادار (۰/۱۰۴-) برای سن لوله است. این نتیجه نشان می‌دهد که با افزایش سن لوله، احتمال شکست کاهش می‌یابد.

یکی از قابل توجه‌ترین یافته‌های این پژوهش، رابطه منفی و معنادار سن لوله با احتمال شکست است. این نتیجه در تضاد با فرضیه کلاسیک فرسودگی به نظر می‌رسد، اما می‌توان آن را به خوبی با پدیده سوگیری بازماندگان^{۳۱} توجیه کرد. داده‌های این



شکل ۴- ریسک نظری شکست در طی عمر لوله (Scheidegger et al., 2015)

۳-۴- ارزیابی عملکرد پیش‌بینی‌کننده مدل

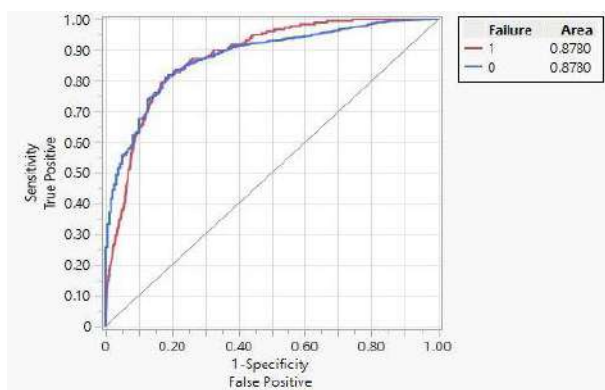
برای ارزیابی قابلیت تعمیم‌پذیری مدل، عملکرد آن بر روی مجموعه‌های آموزش و اعتبارسنجی سنجیده شد. جدول ۷ نتایج این ارزیابی را بر اساس معیارهای استخراج‌شده از ماتریس درهم‌ریختگی نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده عملکرد بسیار پایدار مدل است. تفاوت جزئی معیارها بین مجموعه آموزش و اعتبارسنجی (مثلاً کاهش حساسیت از ۰/۷۸ به ۰/۷۶۵) حاکی از عدم وجود بیش‌برازش و توانایی بالای مدل در تعمیم نتایج به داده‌های جدید است. مهم‌ترین معیار برای این کاربرد، حساسیت است که نشان می‌دهد مدل قادر به شناسایی حدود ۷۶/۵٪ از لوله‌های واقعاً در معرض خطر در مجموعه اعتبارسنجی بوده است. این معیار برای کاربردهای پیشگیرانه بسیار حیاتی است. منحنی ROC (شکل ۵) مساحت زیر منحنی (AUC) برابر با ۰/۸۸ را برای مجموعه اعتبارسنجی نشان می‌دهد که قدرت تفکیک‌کنندگی عالی مدل را تأیید می‌کند.

ضریب منفی سن در این پژوهش، مستقیماً بازتاب‌دهنده پدیده سوگیری بازماندگان است که در فاز اول رخ می‌دهد. شکست‌های زود هنگام لوله‌های ضعیف، منجر به باقی‌ماندن یک جمعیت بازمانده مقاوم‌تر در سنین بالاتر می‌شود. علاوه بر این، شکل ۴، اهمیت دو چالش دیگری را که در این پژوهش بررسی شد، برجسته می‌سازد: (۱) لزوم در نظر گرفتن شکست‌های زود هنگام که منجر به سوگیری بازماندگان می‌شود؛ و (۲) لزوم تحلیل شکست‌های تکرارشونده، زیرا همان‌طور که در شکل مشخص است، هر تعمیر، ریسک پایه لوله را به‌طور دائمی افزایش می‌دهد.

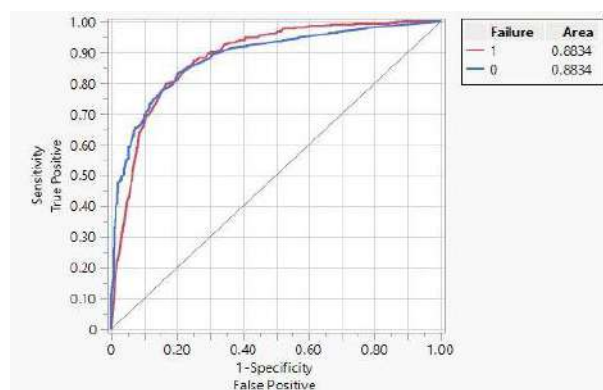
همان‌طور که در جدول ۳ آورده شد حداکثر سن لوله‌ها در شبکه مورد بررسی در این تحقیق، ۴۵ سال و میانگین آنها ۲۳/۸ سال است، لذا می‌توان نتیجه گرفت اکثر لوله‌های موجود در شبکه هنوز وارد فاز فرسودگی نشده‌اند. بنابراین، ضریب منفی سن در این مدل، نه یک خطا، بلکه یک شاخص قدرتمندی از اهمیت حیاتی کیفیت نصب و اجرای اولیه لوله و کنترل کیفیت آن در سال‌های اولیه عمر لوله است.

جدول ۷- ارزیابی قابلیت تعمیم‌پذیری مدل

معیار	مجموعه آموزشی	مجموعه اعتبارسنجی
حساسیت (Sensitivity)	۰/۷۸	۰/۷۶۵
ویژگی (Specificity)	۰/۸۴	۰/۸۳۴
دقت (Precision)	۰/۴۳۶	۰/۴۴۲
دقت کلی (Accuracy)	۰/۸۳۲	۰/۸۲۸
امتیاز-F1 (F1-Score)	۰/۵۶۹	۰/۵۶



(ب)



(الف)

شکل ۵- منحنی ROC: (الف) براساس داده‌های آموزشی؛ (ب) براساس داده‌های صحت‌سنجی

قدرت تفکیک‌کنندگی عالی از خود نشان داد و توانایی خود را در شناسایی لوله‌های در معرض خطر به اثبات رساند. تحلیل اهمیت متغیرها، طول و سن لوله را به‌ترتیب به‌عنوان مهم‌ترین عوامل پیش‌بینی‌کننده شناسایی کرد.

۳-۵- تفسیر یافته‌های کلیدی

نتایج این پژوهش، یک مدل رگرسیون لجستیک وزن‌دار با عملکرد قابل قبول برای پیش‌بینی شکست لوله ارائه داد. مدل با به‌دست آوردن AUC برابر با ۰/۸۸ در مجموعه اعتبارسنجی،

جالب‌ترین و قابل‌توجه‌ترین یافته این مطالعه، رابطه منفی و معنادار بین سن لوله و احتمال شکست بود (ضریب = $-0/104$). این نتیجه در نگاه اول با فرضیه کلاسیک فرسودگی مواد در تضاد است. با این حال، این پدیده را می‌توان به خوبی با مفهوم آماری سوگیری بازماندگان توجیه کرد. این سوگیری زمانی رخ می‌دهد که لوله‌های ضعیف‌تر، که به دلیل کمبودهای کیفی (مانند نصب نامناسب یا نقص در ساخت) مستعد شکست هستند، در سنین پایین از شبکه خارج می‌شوند. در نتیجه، جمعیت لوله‌های باقی‌مانده در سنین بالاتر، دیگر یک نمونه تصادفی نیستند، بلکه گروهی از بازماندگان مقاوم هستند که ذاتاً مستعد شکست کمتری هستند.

این یافته با مدل نظری عمر شکست لوله که توسط Scheidegger et al. (2015) ارائه شده است، کاملاً سازگار است. این مدل سه فاز را پیش‌بینی می‌کند: فاز اول با ریسک بالا به دلیل نقص‌های اولیه، فاز دوم با ریسک پایین (عمر مفید) و فاز سوم با ریسک فزاینده به دلیل فرسودگی. مدل پژوهش حاضر به احتمال زیاد، در فاز دوم یا اوایل فاز سوم در حال تحلیل داده‌ها است که در آن تأثیر بازماندگان مقاوم بر تأثیر تدریجی فرسودگی غلبه کرده است. این یافته، پیامی روشن و بسیار مهم برای مدیران شبکه دارد: کیفیت نصب و کنترل کیفیت در سال‌های اولیه عمر لوله، به اندازه کیفیت خود لوله حیاتی است.

در مورد سایر متغیرها، نتایج کاملاً با اصول مهندسی و یافته‌های مطالعات پیشین هم‌خوانی دارد. تأثیر مثبت طول و فشار و تأثیر منفی قطر بر احتمال شکست، کاملاً قابل توجیه است. لوله‌های بلندتر در معرض قرار گرفتن بیشتری دارند و فشار بالاتر تنش‌های داخلی را افزایش می‌دهد. در مقابل، لوله‌های با قطر بزرگتر معمولاً دیواره‌های ضخیم‌تری دارند که آن‌ها را در برابر شکست مقاوم‌تر می‌کند (Yamijala et al., 2009).

۳-۶- پیامدهای عملی برای مدیریت شبکه توزیع آب

نتایج این پژوهش کاربردهای عملی مستقیمی برای مدیران و بهره‌برداران شبکه‌های توزیع آب دارد که می‌توان به صورت زیر آن‌ها را بر شمرد:

الف) اولویت‌بندی مبتنی بر ریسک: مدل توسعه‌یافته، ابزاری قدرتمند برای ایجاد نقشه ریسک شکست لوله در سراسر شبکه فراهم می‌کند. مدیران می‌توانند با استفاده از خروجی احتمال مدل، لوله‌ها را براساس سطح ریسک اولویت‌بندی کرده و منابع محدود بازرسی، تعمیر و جایگزینی را به مؤثرترین شکل تخصیص دهند.

ب) تمرکز بر کیفیت نصب: با توجه به یافته کلیدی در مورد تأثیر منفی سن و اهمیت شکست‌های زودهنگام، می‌توان گفت قابل نتیجه‌گیری است که کیفیت نصب و بازرسی اولیه به اندازه کیفیت خود لوله اهمیت دارد. سرمایه‌گذاری در فرآیندهای نصب استاندارد و کنترل کیفیت، می‌تواند به طور قابل توجهی نرخ شکست را در بلندمدت کاهش دهد.

ج) مدیریت متمایز براساس جنس لوله: نتایج نشان می‌دهد که استراتژی‌های مدیریتی باید براساس جنس لوله متفاوت باشند. برای لوله‌های AC و UPVC، برنامه‌های بازرسی فشرده‌تر و زودهنگام ضروری است، درحالی‌که برای لوله‌های DI و PE می‌توان از بازرسی‌های با فاصله زمانی طولانی‌تر استفاده کرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این بخش، نتایج کلی، محدودیت‌ها و پیشنهادات برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

۴-۱- بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با درک عمیق از چالش‌های ذاتی داده‌های شبکه‌های توزیع آب و با هدف غلبه بر آن‌ها در پیش‌بینی شکست لوله‌های آب شهری، از جمله عدم تعادل کلاس‌ها و رویدادهای تکرارشونده، توسعه و ارزیابی یک مدل یادگیری ماشین جامع و تفسیرپذیر را ارائه و بررسی کرد. با بهره‌گیری از مجموعه داده‌های واقعی شبکه توزیع آب تهران، مدلی مبتنی بر رگرسیون لجستیک وزن‌دار با موفقیت توسعه یافت که توانایی بالایی در شناسایی لوله‌های در معرض خطر از خود نشان داد.

نتایج کلیدی این مطالعه نشان‌دهنده قدرت تفکیک‌کنندگی عالی مدل، با AUC برابر با $0/88$ در داده‌های اعتبارسنجی و همچنین عملکرد پایدار آن در مواجهه با داده‌های جدید است. تحلیل اهمیت متغیرها، طول لوله و سن لوله را به عنوان مهم‌ترین عوامل پیش‌بینی‌کننده معرفی شد. یافته جالب‌توجه در این تحقیق، کشف رابطه منفی بین سن لوله و احتمال شکست بود که با مفهوم سوگیری بازماندگان و کیفیت نصب و نگهداری لوله‌های قدیمی‌تر توجیه شد. این امر، اهمیت فراتر رفتن از صرف ویژگی‌های فیزیکی و در نظر گرفتن سایر عوامل مؤثر را برجسته می‌سازد.

مهم‌ترین نوآوری این تحقیق، ارائه یک چارچوب مدل‌سازی جامع است که به طور هم‌زمان سه رویکرد کلیدی را دربر می‌گیرد: مدیریت هوشمندانه داده‌های نامتعادل، مدل‌سازی شکست‌های

این مقاله از هوش مصنوعی استفاده نشده است.

۷- پی‌نوشت‌ها

- 1- Machine Learning
- 2- Regression Analysis
- 3- Decision Tree
- 4- Random Forest
- 5- Support Vector Machine
- 6- Extreme Gradient Boosting
- 7- Logistic Regression
- 8- Support Vector Classification
- 9- Overfitting
- 10- Binary Classifier
- 11- Ductile Iron
- 12- Polyethylene
- 13- Asbestos- Cement
- 14- Steel
- 15- Un Plasticized Polyvinyl Chloride
- 16- Failure
- 17- Event-Time
- 18- Re-weighting
- 19- Training
- 20- Validation
- 21- Receiver Operating Characteristic
- 22- Sensitivity
- 23- Specificity
- 24- True Positives Rate
- 25- False Positives Rate
- 26- Confusion Matrix
- 27- Area Under the Curve
- 28- Accuracy
- 29- Precision
- 30- Likelihood Ratio Test
- 31- Survivorship Bias
- 32- Real-Time

۸- مراجع

- نوذری، ن، مستوری، ر، میرحسینی، و س.م.، (۱۴۰۲)، "بررسی کج شدن ناحیه‌ای درختان و سازه‌ها ناشی از نشست خاک در اثر شکستگی لوله شبکه توزیع آب در تهران"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۸(۲)، ۳۷-۴۶، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2022.348911.1319>
- مصلحی، ا، و جلیلی قاضی‌زاده، م.ر.، (۱۳۹۵)، "مروری بر روابط فشار-شکستگی در شبکه‌های آبرسانی"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۱۱(۱)، ۱۱-۱۹، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2017.51053>
- مطیعی، ه.، و قاسم‌نژاد، س.، (۱۳۹۶)، "کاربرد و توسعه مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی میزان شکست لوله‌های شبکه توزیع آب شهری، مورد مطالعاتی ناحیه یک منطقه یک تهران"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۲(۲)، ۴۸-۵۸.

تکرار شونده و اعتبارسنجی قوی. این یکپارچگی، مدلی را ارائه داده که نه تنها از نظر علمی مستحکم است، بلکه قابلیت پیاده‌سازی عملی در مقیاس وسیع را نیز دارد. این مدل، ابزاری علمی و کاربردی برای مدیران شبکه‌های آبرسانی فراهم می‌آورد تا بتوانند از رویکردهای سنتی واکنشی به سمت نگهداری پیشگیرانه و مبتنی بر ریسک حرکت کنند. این گذار، نه تنها به کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش بهره‌وری منجر می‌شود، بلکه با ارتقای پایداری و اطمینان بخشی به سرویس‌دهی، منافع اجتماعی و اقتصادی گسترده‌ای را به همراه خواهد داشت.

۴-۲- محدودیت‌های مطالعه و پیشنهادات برای تحقیقات آتی

این پژوهش با تکیه بر داده‌های گردآوری شده از یک ناحیه مشخص در شهر تهران انجام شده است؛ بنابراین تعمیم نتایج به سایر مناطق با ویژگی‌های متفاوت اقلیمی، خصوصیات خاک و الگوهای مصرف، مستلزم بررسی و اعتبارسنجی‌های تکمیلی است. همچنین برخی عوامل اثرگذار نظیر جنس و ویژگی‌های خاک، میزان بار ترافیکی و کیفیت آب در مدل لحاظ نشده‌اند. علاوه بر این باید این نکته مهم را در نظر داشت که با توجه به این که فشار شبکه در طول زمان (سال‌های مختلف) ثابت نبوده و به دلایل مختلف دارای تغییراتی خواهد بود، برای تعیین فشار به طور دقیق در زمان شکست، نیازمند پایش و کنترل در لحظه ۳۲ شبکه خواهد بود که این پارامتر به عنوان یک داده در اختیار محققین قرار داده نشده بود. در نظر گرفتن این متغیرها در مطالعات آتی می‌تواند به بهبود دقت و کارایی مدل منجر شود. مدل پیشنهادی بر پایه داده‌های مربوط به یک دوره ۱۲ ساله توسعه یافته است. با این حال، برای دستیابی به درک جامع‌تری از چرخه عمر لوله‌ها، استفاده از داده‌های بلندمدت‌تر ضروری به نظر می‌رسد؛ چرا که این امر امکان مدل‌سازی دقیق‌تر مرحله نهایی عمر، یعنی فاز فرسودگی، را فراهم می‌کند.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان تشکر و سپاس خود را از سردبیر و داوران محترم که با ارائه نظرات خود باعث بهبود و ارتقای علمی این مقاله شدند و همچنین شرکت آب و فاضلاب منطقه یک تهران برای همکاری در تهیه داده‌های مورد نیاز تحقیق ابراز می‌دارند. این تحقیق هیچ کمک مالی خاصی از سازمان‌های تأمین مالی در بخش‌های دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است و در آماده سازی

- Statistical models", *Urban Water*, 3(3), 131-150, [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00033-4](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00033-4)
- Latifi, M., Beig Zali, R., Javadi, A.A., and Farmani, R., (2024), "Customised-sampling approach for pipe failure prediction in water distribution networks", *Scientific Reports*, 14(1), 182, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69109-9>
- Lešáková, M., Logan, K.T., Rehm, I.S., Pelz, P.F., and Friesen, J., (2024), "Do resilience metrics of water distribution systems really assess resilience? A critical review", *Water Research*, 248, 120820, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120820>
- Li, C., Chen, J., and Qin, G., (2019), "Partial Youden index and its inferences", *Journal of Biopharmaceutical Statistics*, 29(2), 385-399, <https://doi.org/10.1080/10543406.2018.1535502>
- Omar, A., Delnaz, A., and Nik-Bakht, M., (2023), "Comparative analysis of machine learning techniques for predicting water main failures in the City of Kitchener", *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, 2(3), 100044, <https://doi.org/10.1016/j.iintel.2023.100044>
- Rifaai, T.M., Abokifa, A.A., and Sela, L., (2022), "Integrated approach for pipe failure prediction and condition scoring in water infrastructure systems", *Reliability Engineering & System Safety*, 220, 108271, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108271>
- Robles-Velasco, A., Cortés, P., Muñozuri, J., and Onieva, L., (2020), "Prediction of pipe failures in water supply networks using logistic regression and support vector classification", *Reliability Engineering & System Safety*, 196, 106754, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106754>
- Salehinasab, S., and Goshtasbi Rad, E., (2025), "Enhancing pipe failure prediction using cluster-specific classification via K-means clustering", *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 1-30, <https://doi.org/10.1080/23789689.2025.2470504>
- Scheidegger, A., Leita, J.P. and Scholten, L. (2015). Statistical failure models for water distribution pipes—A review from a unified perspective. *Water research*. 83, 237-247, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.06.027>
- Shirzad, A., and Safari, M.J.S., (2019), "Pipe failure rate prediction in water distribution networks using multivariate adaptive regression splines and random forest techniques", *Urban Water Journal*, 16(9), 653-661, <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1713384>
- Snider, B., and McBean, E.A., (2020), "Improving urban water security through pipe-break prediction models: Machine learning or survival analysis", *Journal of Environmental Engineering*, 146(3), 04019129, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001657](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001657)
- Solomatine, D.P., and Ostfeld, A., (2008), "Data-driven modelling: Some past experiences and new approaches", *Journal of Hydroinformatics*, 10(1), 3-22, <https://doi.org/10.2166/hydro.2008.015>
- Wang, X., Mazumder, R.K., Salarieh, B., Salman, A.M., Shafieezadeh, A., and Li, Y., (2022), "Machine <https://doi.org/10.22112/jwwse.2017.89374.1024>
- Asadi, Y., (2024), "Employing machine learning in water infrastructure management: Predicting pipeline failures for improved maintenance and sustainable operations", *Industrial Artificial Intelligence*, 2(1), 8, <https://doi.org/10.1007/s44244-024-00022-w>
- Barton, N.A., Hallett, S.H., Jude, S.R. and Tran, T.H., (2022), "An evolution of statistical pipe failure models for drinking water networks: A targeted review", *Water Supply*, 22(4), 3784-3813, <https://doi.org/10.2166/ws.2022.019>
- Burnham, K.P., and Anderson, D.R., (2002), *Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach*, 2nd Edition, Springer-Verlag, <https://doi.org/10.1007/b97636>
- Chang, P.W., and Newman, T.B., (2024), "Receiver operating characteristic (ROC) curves: The basics and beyond", *Hospital Pediatrics*, 14(7), e330-e334, <https://doi.org/10.1542/hpeds.2023-007462>
- Chen, R., Wang, Q., and Javanmardi, A., (2025), "A review of the application of Machine Learning for pipeline integrity predictive analysis in water distribution networks", *Archives of Computational Methods in Engineering*, 32(6), 3821-3849, <https://doi.org/10.1007/s11831-025-10251-6>
- Farmani, R., Kakoudakis, K., Behzadian, K., and Butler, D., (2017), "Pipe failure prediction in water distribution systems considering static and dynamic factors", *Procedia Engineering*, 186, 117-126, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.217>
- Gross, R.E., and Harris, S.P., (2013), "Statistical performance evaluation of soft (elastomer) seat pressure relief valves", In: *Pressure Vessels and Piping Conference*, (Vol. 55706, p. V06AT06A077), American Society of Mechanical Engineers, <https://doi.org/10.1115/PVP2013-97031>
- He, H., and Garcia, E.A., (2009), "Learning from imbalanced data", *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 21(9), 1263-1284, <https://doi.org/10.1109/TKDE.2008.239>
- Hosmer, Jr., D.W., Lemeshow, S., and Sturdivant, R.X., (2013), *Applied logistic regression*, John Wiley & Sons, <https://doi.org/10.1002/0471722146>
- Kakoudakis, K., Behzadian, K., Farmani, R., and Butler, D., (2017), "Pipeline failure prediction in water distribution networks using evolutionary polynomial regression combined with K-means clustering", *Urban Water Journal*, 14(7), 737-742, <https://doi.org/10.1080/1573062X.2016.1253755>
- Karadirek, I.E., Kaya-Basar, E., and Akdeniz, T., (2024), "A study on pipe failure analysis in water distribution systems using logistic regression", *Water Supply*, 24(1), 176-186, <https://doi.org/10.2166/ws.2023.335>
- Karimian, F., Kaddoura, K., Zayed, T., Hawari, A., and Moselhi, O., (2021), "Prediction of breaks in municipal drinking water linear assets", *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 12(1), 04020060, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000511](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000511)
- Kleiner, Y., and Rajani, B., (2001), "Comprehensive review of structural deterioration of water mains:

learning for risk and resilience assessment in structural engineering, Progress and future trends", *Journal of Structural Engineering*, 148(8), 03122003, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003392](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003392)

Wu, Y., and Liu, S., (2017), "A review of data-driven approaches for burst detection in water distribution systems", *Urban Water Journal*, 14(9), 972-983, <https://doi.org/10.1080/1573062X.2017.1279191>

Yamijala, S., Guikema, S.D., and Brumbelow, K., (2009), "Statistical models for the analysis of water distribution system pipe break data", *Reliability Engineering & System Safety*, 94(2), 282-293, <https://doi.org/10.1016/j.res.2008.03.011>



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 Efficiency of Chloroferric and Polyaluminum Chloride Coagulants in Removing Arsenic from Contaminated Water in the Presence of Different Doses of Coagulant Aid

Tooran Aghaalizadeh^{1*}, behzad Koohi² and Mehdi Mirzamohammadi²

1- Ph.D., Water and Wastewater Company of Ardabil Province, Ardabil, Iran.

2- M.Sc. in Organic Chemistry, Water and Wastewater Company of Ardabil Province, Ardabil, Iran.

*Corresponding Author, Email: T.aghalizadeh@gmail.com

Received: 05/01/2026

Revised: 15/06/2026

Accepted: 19/08/2026

© IWWA

Abstract

The aim of this research is to remove total arsenic from arsenic-contaminated water. In this research, the effect of different amounts coagulant and coagulant aids (chloroferric, polyaluminum chloride, bentonite, hydrated lime, and anionic polyelectrolyte) are studied on increasing the efficiency of arsenic removal from arsenic-contaminated water. Jarrest is used to predict coagulation conditions, determine the appropriate pH, and the amount of chemicals required for flocculation. Atomic absorption spectrometry equipped with a graphite furnace and tube is used to measure arsenic. This study is conducted on surface water samples with a concentration of 86 mg/l. By examining different conditions of coagulants, coagulant aid, pH change, and perchlorine, the results were succeeded in removing arsenic by about 95% from arsenic-contaminated water and obtained the most optimal conditions (pH = 7.5, perchlorine = 7.5 ppm, ferric chloride = 21 ppm, bentonite = 2 ppm, hydrated lime = 2 mg/l, and polyelectrolyte = 0.03 ppm).

Keywords: Arsenic, Contaminated water, Chlorferric, Bentonite, Perchlorine.

بررسی کارایی منعقدکننده‌های کلروفریک و پلی آلومینیوم کلراید در حذف آرسنیک از آب آلوده در حضور غلظت‌های مختلف کمک منعقدکننده

توران آقاعلیزاده^{۱*}، بهزاد کوهی^۲ و مهدی میرزامحمدی^۲

۱- دانش‌آموخته دکتري، شرکت آب و فاضلاب استان اردبیل، اردبیل، ایران.

۲- کارشناس ارشد شیمی آلی، شرکت آب و فاضلاب استان اردبیل، اردبیل، ایران.

*نویسنده مسئول، ایمیل: T.aghalizadeh@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۸

© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

هدف از این کار تحقیقاتی حذف آرسنیک کل از آب‌های آلوده به آرسنیک است. در این مقاله، تاثیر مقدار مواد منعقدکننده و کمک منعقدکننده مختلف (کلروفریک، پلی آلومینیوم کلراید، بنتونیت، آهک هیدراته و پلی الکترولیت آنیونی) در افزایش راندمان حذف آرسنیک از آب آلوده به آرسنیک مورد مطالعه قرار گرفت. برای پیش‌بینی شرایط انعقاد، تعیین میزان مناسب pH و مقدار مواد شیمیایی مورد نیاز برای لخته‌سازی از آزمون جارتست استفاده شد. برای اندازه‌گیری مقدار آرسنیک از روش طیف‌سنجی جذب اتمی مجهز به کوره و تیوب گرافیتی استفاده شد. این مطالعه بر روی نمونه‌های آب سطحی با غلظت ۸۶ میلی‌گرم بر لیتر انجام شد. با بررسی شرایط مختلف مواد منعقدکننده، کمک منعقدکننده، تغییر pH و پرکلرین، نتایج نشان داد که آرسنیک از حدود ۹۵٪ از آب آلوده آرسنیک حذف شده و بهینه‌ترین شرایط (pH = ۷/۵، پرکلرین = ۷/۵ ppm، کلروفریک = ۲۱ ppm، بنتونیت = ۲ ppm، آهک هیدراته = ۲ میلی‌گرم بر لیتر و پلی الکترولیت = ۰/۰۳ ppm) به‌دست آمده است.

کلمات کلیدی: آرسنیک، آب آلوده، کلروفریک، بنتونیت، پرکلرین.

آب به عنوان یک جزء ویژه از خلقت و منبع حیات، مدت‌ها است چنان جزئی ناپذیر از وجود انسان شده است که حتی تصور ادامه زندگی بدون آن امکان‌پذیر نیست. با این حال، همان آبی که به انسان‌ها حیات می‌بخشد. ممکن است آن‌ها را بکشد و این امر به طور عمده به دلیل مداخله انسان و آلودگی آب اتفاق می‌افتد (Pezeshki et al., 2023; Nasiri et al., 2022b; Nasiri et al., 2022a). با افزایش نرخ رشد جمعیت جهانی، پیشرفت‌های علمی و به دنبال آن رشد فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، آلودگی آب به یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های جهانی تبدیل شده است. با این حال، در همین زمان، منابع آب شیرین کاهش یافته و تهدیدی جدی برای سلامت عمومی محسوب می‌شود (Siddique et al., 2020; Zamora-Ledezma et al., 2021; Mohammad-Razdari and Fanaee, 2021; Ahmadi, 2022). وجود فلزات سنگین بیش از حد مشخصی در آب آشامیدنی و جذب و تجمع آن‌ها در بخش‌های خوراکی و غیرخوراکی گیاهان، می‌تواند منجر به مشکلات سلامتی در حیوانات و انسان‌ها شود (Sadee et al., 2025; Sadee, 2022). آرسنیک یکی از این فلزات سنگین بسیار سمی است زیرا مصرف مقدار بالای این عنصر مخرب و خطرناک است (Pezeshki et al., 2023; Tseng et al., 2007; Hasanzadeh and Ostovar, 2020; Ahmed et al., 2022). آرسنیک چهار شکل شیمیایی اصلی با حالت‌های اکسیداسیون -3 ، 0 ، $+3$ و $+5$ دارد، اما در آب طبیعی، اشکال غالب آن اکسی‌آنیون‌های معدنی آرسنیت سه ظرفیتی (As^{+3}) یا آرسنات پنج ظرفیتی (As^{+5}) هستند (Smedley and Kinniburgh, 2002).

بر اساس استاندارد آب سازمان بهداشت جهانی (WHO) و استاندارد ملی شماره ۱۰۵۳ ایران مقدار حداکثر مجاز آرسنیک در آب آشامیدنی ۱۰ میکروگرم بر لیتر است، اما همه کشورهای در حال توسعه که تحت تأثیر آب‌های زیرزمینی آلوده قرار دارند، هنوز در تلاش هستند تا با مقدار دستورالعمل قبلی WHO یعنی ۵۰ میکروگرم در لیتر مطابقت داشته باشند (Vu et al., 2003). قرار گرفتن مزمن در معرض آرسنیک بالای ۵۰ میکروگرم در لیتر در آب آشامیدنی می‌تواند منجر به مشکلات جدی برای سلامتی شود. علائم قرار گرفتن مزمن در معرض آب‌های زیرزمینی آلوده به آرسنیک در غلظت‌های قابل توجه بالای ۵۰ میکروگرم در لیتر شامل اختلالات پوستی، قلبی عروقی، کلیوی، خونی و تنفسی است (Smedly et al., 2002). آلودگی ناشی از آرسنیک، که به عنوان یک ماده سرطان‌زای انسانی شناخته می‌شود، صدها

میلیون نفر را در سراسر جهان تحت تأثیر قرار می‌دهد. آرسنیک معدنی یکی از عوامل اصلی ایجاد سرطان در پوست، ریه‌ها، مثانه، کبد، پروستات و کلیه‌ها در انسان است (Inam et al., 2021). بسیاری از مناطق کره زمین به این ماده آلوده هستند، زیرا آرسنیک به طور طبیعی در آب و خاک وجود دارد و در اثر فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی و معدن کاری نیز به وجود می‌آید (Sadee et al., 2015, 2024; Sadee, 2022). آرسنیک یک آلاینده رایج در آب سطحی و زیرزمینی است. خطرناک‌ترین مشکل در این زمینه این است که در بسیاری از مناطق جهان، آب آشامیدنی آلوده به آرسنیک است (Rahman et al., 2024). با توجه به اهمیت سلامت آب آشامیدنی و اثرات مخرب آرسنیک بر سلامتی انسان حذف آرسنیک از آب آشامیدنی یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های جوامع بشری است. بر همین اساس روش‌های مختلفی در زمینه کاهش یا حذف آرسنیک از آب آشامیدنی مورد بررسی قرار گرفته است (کریمی و همکاران، ۱۴۰۱؛ میرشاهی و همکاران، ۱۴۰۰; Sadee et al., 2021; Inam et al., 2021; Sadee, 2022; Yin et al., 2017; et al., 2025). در حال حاضر فناوری‌های موجود برای حذف آرسنیک شامل روش‌های رسوب شیمیایی، جذب، تبادل یونی، فیلتراسیون غشایی، گیاه‌پالایی و انعقاد الکتریکی هستند (Sarkar, 2023; Pramanik, 2026; Rahidul et al., 2024; Hassan, 2023; Hamid et al., 2024). یکی از تکنیک‌های تصفیه آب که به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش انعقاد و لخته‌سازی و حذف ذرات کلوئیدی است (Sancha, 2006). برای پیاده‌سازی این روش به منظور حذف آرسنیک، از ترکیباتی هم‌چون کلرید آهن و کلرید آلومینیوم استفاده می‌شود. اضافه‌شدن این ترکیبات به آب باعث می‌شود در مدت زمان بسیار کوتاه و حدود یک دقیقه، ذرات و یون‌ها با بار منفی به هم متصل شده و در نهایت منجر به اتصال آرسنیک به این رشته‌ها خواهند شد. سرانجام لخته‌های ایجاد شده به کمک تجهیزات مختلف از قبیل فیلترها جمع‌آوری خواهند شد. در این تحقیق تأثیر مقدار برخی مواد منعقدکننده و کمک منعقدکننده مورد استفاده در تصفیه‌خانه‌های آب (کلروفریک، بنتونیت، آهک هیدراته و پرکلرین) در افزایش راندمان حذف آرسنیک کل، مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

نمونه‌های آلوده به آرسنیک با غلظت ۸۶ میلی گرم بر لیتر از آب

۳-۲- بررسی تاثیر pH بر راندمان حذف آرسنیک در حضور منعقدکننده کلروفریک

برای تعیین pH مناسب به منظور بررسی کارایی منعقدکننده کلروفریک (۱۲ و ۲۲ میلی گرم بر لیتر) در حذف آرسنیک در محدوده سه pH متفاوت (۸/۲، ۷/۵ و ۷/۱) در مجاورت غلظت بهینه آهک هیدراته (۲ میلی گرم بر لیتر)، غلظت بهینه بنتونیت (۲ میلی گرم بر لیتر) و غلظت بهینه پلی الکترولیت (۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر) جارتست زده شد.

۴-۲- بررسی غلظت‌های متفاوت آهک هیدراته

به منظور تعیین مقدار بهینه آهک هیدراته برای مقادیر مختلف آهک هیدراته (۱ تا ۶ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک (۱۲ میلی گرم بر لیتر)، غلظت بهینه بنتونیت (۲ میلی گرم بر لیتر) و غلظت بهینه پلی الکترولیت (۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر) جارتست زده شد.

۵-۲- بررسی غلظت‌های متفاوت بنتونیت

به منظور تعیین مقدار بهینه بنتونیت، برای مقادیر مختلف بنتونیت (۱ تا ۶ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک (۱۲ میلی گرم بر لیتر)، غلظت بهینه آهک هیدراته (۲ میلی گرم بر لیتر) و غلظت بهینه پلی الکترولیت (۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر) جارتست زده شد.

۶-۲- بررسی ماده اکسیدکننده (پرکلرین)

به منظور بررسی تاثیر اکسیدکننده پرکلرین در حذف آرسنیک، برای مقادیر مختلف پرکلرین (۰، ۷/۵ و ۱۵ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک (۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر لیتر)، غلظت بهینه آهک هیدراته (۲ میلی گرم بر لیتر)، غلظت بهینه بنتونیت (۲ میلی گرم بر لیتر) و غلظت بهینه پلی الکترولیت (۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر) جارتست زده شد.

۷-۲- بررسی اثر کاغذ صافی در حذف آرسنیک

برای بررسی اثر کاغذ صافی در حذف آرسنیک برای دو غلظت ۱۲ و ۲۲ میلی گرم بر لیتر کلروفریک در مجاورت غلظت بهینه آهک هیدراته (۲ میلی گرم بر لیتر)، غلظت بهینه بنتونیت (۲ میلی گرم بر لیتر) و غلظت بهینه پلی الکترولیت (۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر) جارتست زده شد. بعد از اتمام جارتست، نمونه‌ها با کاغذ صافی واتمن ۴۰ صاف شد. مقدار آرسنیک نمونه‌ها قبل و بعد از صافی با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

سطحی در آزمایشگاه تهیه شد. در این پژوهش از کلروفریک ۴۰٪، پرکلرین ۶۵٪، بنتونیت با مش ۴۰۰ میکرون، آهک هیدراته و پلی آکریل آمید آنیونی گرید خوراکی استفاده شد. برای اندازه‌گیری pH از دستگاه pH متر رومیزی مدل 780 شرکت Metrohm سوئیس استفاده شد. اندازه‌گیری کدورت براساس NTU با دستگاه کدورت‌سنج مدل 2100 از شرکت HACH انجام شد. برای کالیبراسیون این دستگاه از پنج محلول استاندارد استفاده شد. برای اندازه‌گیری میزان آرسنیک از روش طیف‌سنجی جذب اتمی مجهز به کوره و تیوب گرافیتی با نام اختصاری AAS (Atomic Absorption Spectrometric)، مورد استفاده قرار گرفت. برای پیش‌بینی شرایط انعقاد و تعیین میزان مناسب pH و مواد شیمیایی موردنیاز برای لخته‌سازی از دستگاه جارتست استفاده شد. این آزمایش مدل کوچک از واحدهای انعقاد سریع، انعقاد آهسته و همین‌طور ته‌نشینی در تصفیه‌خانه است که با افزودن مواد شیمیایی پارامترهای مورد مطالعه را در مقیاس آزمایشگاهی می‌توان ارزیابی کرد. در این آزمایش تلاش شد تا کلیه شرایط فرآیند انعقاد و لخته‌سازی که در تصفیه‌خانه‌ها (مقیاس بزرگ) اجرا می‌شود، به صورت آزمایشگاهی (مقیاس کوچک) شبیه‌سازی شود. حجم نمونه مورد استفاده برای آزمون جارتست برای هر آزمایش یک لیتر است. تعداد ۷۰ نمونه در این کار تحقیقاتی مورد آزمایش قرار گرفت.

۱-۲- بررسی غلظت‌های متفاوت منعقدکننده کلروفریک

به منظور تعیین مقدار بهینه برای منعقدکننده کلروفریک، برای مقادیر متفاوت از کلروفریک (۱۱ تا ۲۲ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت غلظت بهینه آهک هیدراته (۲ میلی گرم بر لیتر)، غلظت بهینه بنتونیت (۲ میلی گرم بر لیتر) و غلظت بهینه پلی الکترولیت از نوع پلی آکریل آمید آنیونی گرید خوراکی (۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر) جارتست زده شد.

۲-۲- بررسی غلظت‌های متفاوت منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید

به منظور تعیین مقدار بهینه منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید برای غلظت‌های متفاوت پلی آلومینیوم کلراید (۴ و ۲۶ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت غلظت بهینه آهک هیدراته (۲ میلی گرم بر لیتر)، غلظت بهینه بنتونیت (۲ میلی گرم بر لیتر) و غلظت بهینه پلی الکترولیت (۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر) جارتست زده شد.

۳- نتایج و بحث

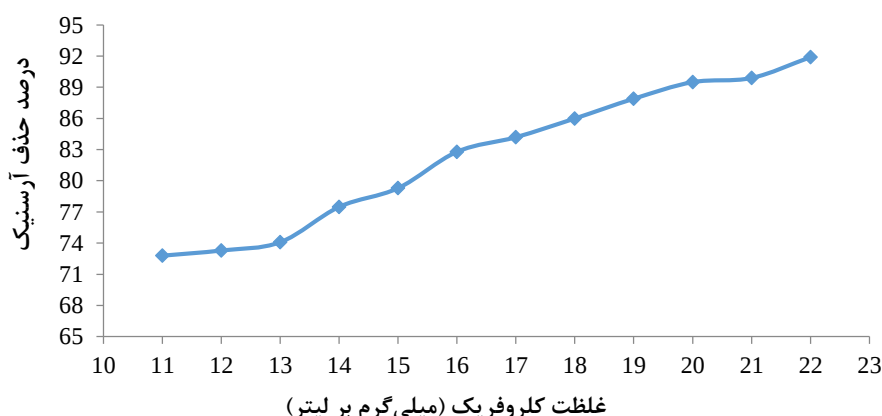
جدول ۱- مشخصات نمونه اولیه

مقدار	پارامتر
۷۸۵	هدایت الکتریکی ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
۸/۰۳	pH
۶/۶	کدورت (NTU)
۸۶	آرسنیک (ppb)

بعد از تهیه نمونه اولیه ابتدا مقدار pH، کدورت، هدایت و آرسنیک نمونه اندازه‌گیری شد (جدول ۱). مطابق این جدول، مقدار آرسنیک ۸۶ میکروگرم بر لیتر است.

جدول ۲- بررسی تاثیر غلظت‌های مختلف منعقدکننده کلروفیک در حذف آرسنیک

۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	کلروفیک (mg/l)
۷/۲۹	۹/۰۵	۹/۴۲	۱۰/۷۹	۱۲/۵۱	۱۴/۱۲	۱۵/۴	۱۸/۵	۲۰/۱۱	۲۳/۲۱	۲۳/۹	۲۴/۳	آرسنیک (ppb)
۹۱/۹	۸۹/۹	۸۹/۵	۸۷/۹	۸۶	۸۴/۲	۸۲/۸	۷۹/۳	۷۷/۵	۷۴/۱	۷۳/۳	۷۲/۸	درصد حذف آرسنیک



شکل ۱- بررسی تاثیر غلظت‌های مختلف منعقدکننده کلروفیک در حذف آرسنیک

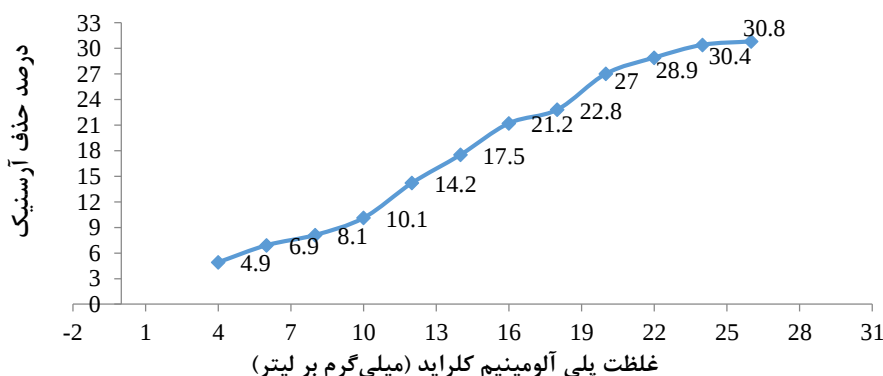
مجاورت آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب ۲، ۳ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر اضافه و جارتست زده شد. نتایج به دست آمده در جدول ۳ آمده است. با توجه به این جدول و شکل ۲، با افزایش غلظت پلی آلومینیوم کلراید، درصد حذف آرسنیک افزایش می‌یابد.

۳-۲- بررسی غلظت‌های متفاوت منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید

برای بررسی تاثیر غلظت‌های متفاوت منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید در حذف آرسنیک به نمونه غلظت‌های متفاوت از ماده منعقدکننده کلروفیک (۴ تا ۲۲ میلی گرم بر لیتر) در

جدول ۳- بررسی تاثیر غلظت‌های مختلف منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید در حذف آرسنیک

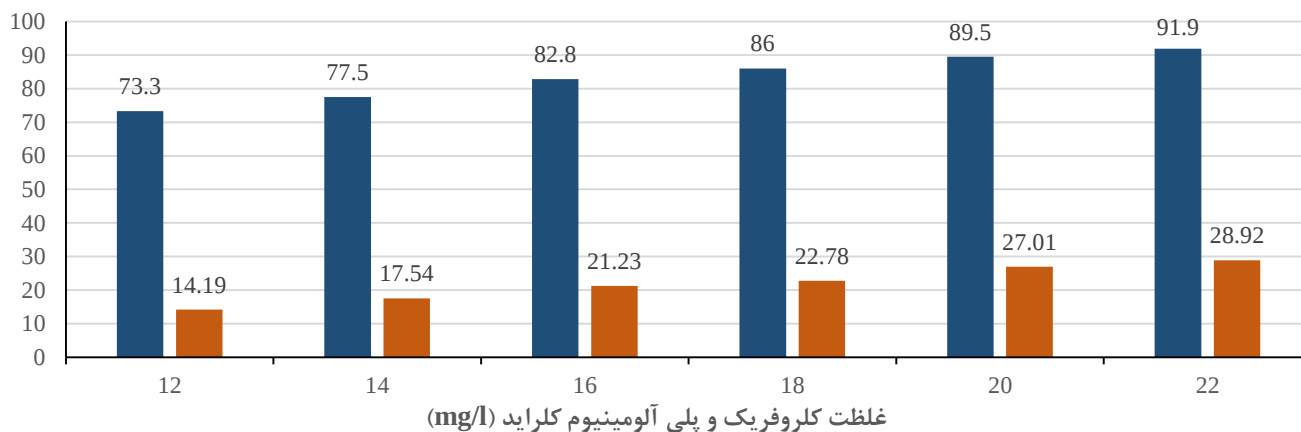
۲۶	۲۴	۲۲	۲۰	۱۸	۱۶	۱۴	۱۲	۱۰	۸	۶	۴	پلی آلومینیوم کلراید (mg/l)
۶۱/۹۵	۶۲/۲۵	۶۳/۶۲	۶۵/۳۳	۶۹/۱۱	۷۰/۵	۷۳/۸	۷۶/۸	۸۰/۵	۸۲/۲۷	۸۳/۳۲	۸۵/۱۱	آرسنیک (ppb)
۳۰/۸	۳۰/۴	۲۸/۹	۲۷	۲۲/۸	۲۱/۲	۱۷/۵	۱۴/۲	۱۰/۱	۸/۱	۶/۹	۴/۹	درصد حذف آرسنیک



شکل ۲- بررسی تاثیر غلظت‌های مختلف منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید در حذف آرسنیک

رشته‌ها راندمان حذف آرسنیک افزایش می‌یابد. استفاده از پلی آلومینیوم کلراید به عنوان منعقد کننده به دلیل تمایل بسیار کم آرسنیک به جذب سطحی در ساختارهای پلیمری تاثیر بسیار کم در حذف آرسنیک نشان می‌دهد (شکل ۳).

مقایسه کارایی حذف آرسنیک توسط کلروفریک و پلی آلومینیوم کلراید (شکل ۳) نشان می‌دهد توانایی کلروفریک در حذف آهن نسبت به پلی آلومینیوم کلراید بیشتر است. با افزایش غلظت کلروفریک تعداد ذرات و یون‌ها با بار منفی به هم متصل شده افزایش می‌یابد و در نهایت با اتصال آرسنیک به این



غلظت کلروفریک و پلی آلومینیوم کلراید (mg/l)	درصد حذف آرسنیک توسط کلروفریک (%)	درصد حذف آرسنیک توسط PAC (%)
۲۲	۹۱/۹	۲۸/۹۲
۲۰	۸۹/۵	۲۷/۰۱
۱۸	۸۶	۲۲/۷۸
۱۶	۸۲/۸	۲۱/۲۳
۱۴	۷۷/۵	۱۷/۵۴
۱۲	۷۳/۳	۱۴/۱۹

شکل ۳- مقایسه کارایی کلروفریک (FeCl_3) و پلی آلومینیوم کلراید (PAC)

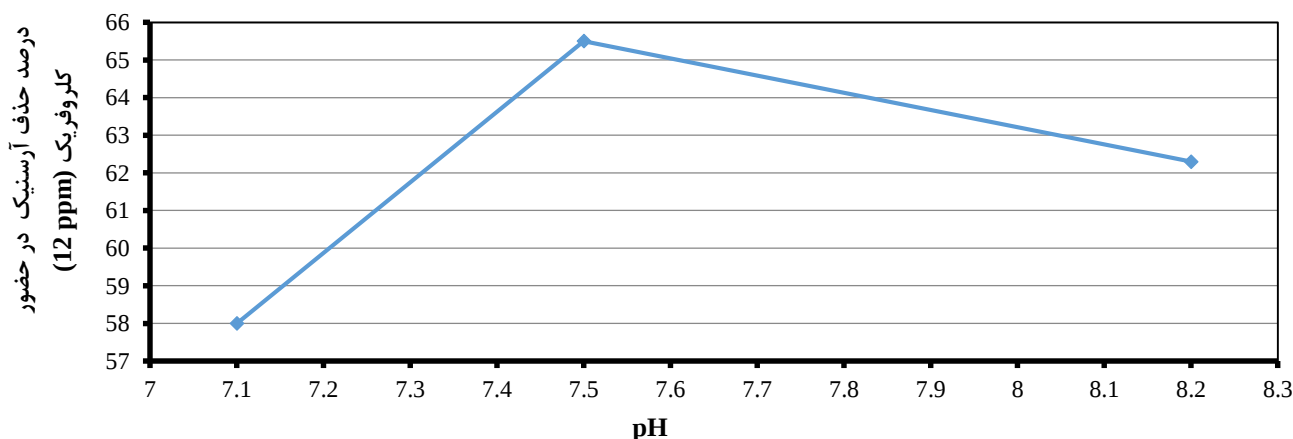
و متداول برای آب‌های سطحی استان اردبیل ($7/5$ و $7/1$) در مجاورت آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب غلظت 2 و 0.3 میلی گرم بر لیتر جارتست زده شد. نتایج به دست آمده در جدول ۴ آمده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد در هر دو غلظت کلروفریک (12 و 21 میلی گرم بر لیتر) بالاترین درصد حذف در $\text{pH} = 7/5$ به دست می‌آید (شکل ۴).

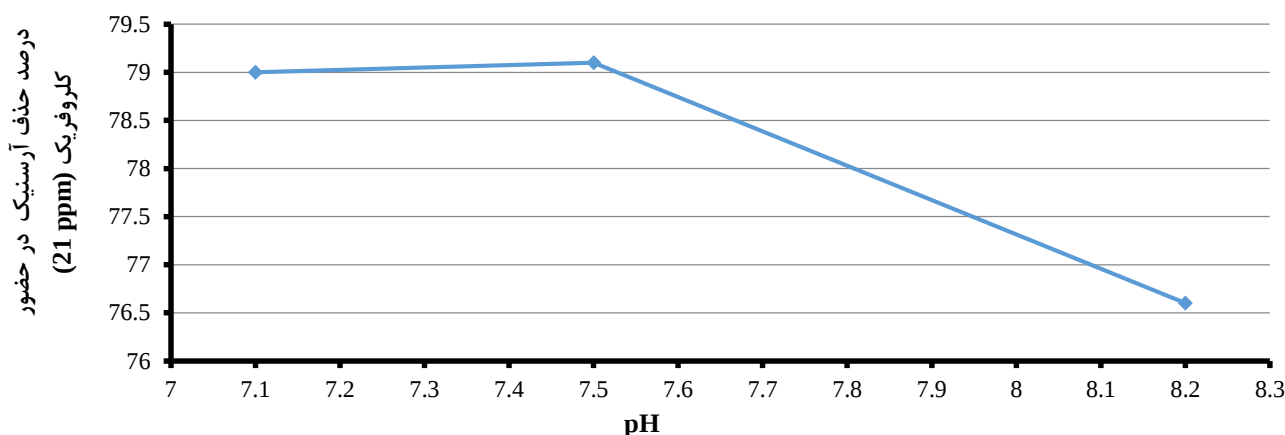
۳-۳- بررسی تاثیر pH بر راندمان حذف آرسنیک در حضور منعقدکننده کلروفریک

برای تعیین تاثیر pH مناسب بر راندمان حذف آرسنیک به منظور بررسی کارایی منعقدکننده کلروفریک (12 و 21 میلی گرم بر لیتر) در حذف آرسنیک در محدوده سه pH متفاوت

جدول ۴- تغییرات pH در حذف آرسنیک در حضور غلظت‌های 12 و 21 mg/l

FeCl_3 (mg/l)	۱۲	۱۲	۱۲	۲۱	۲۱	۲۱
pH	۷/۱	۷/۵	۸/۲	۷/۱	۷/۵	۸/۲
درصد حذف آرسنیک (%)	۵۸	۶۵/۵	۶۲/۳	۷۹	۷۹/۱	۷۹



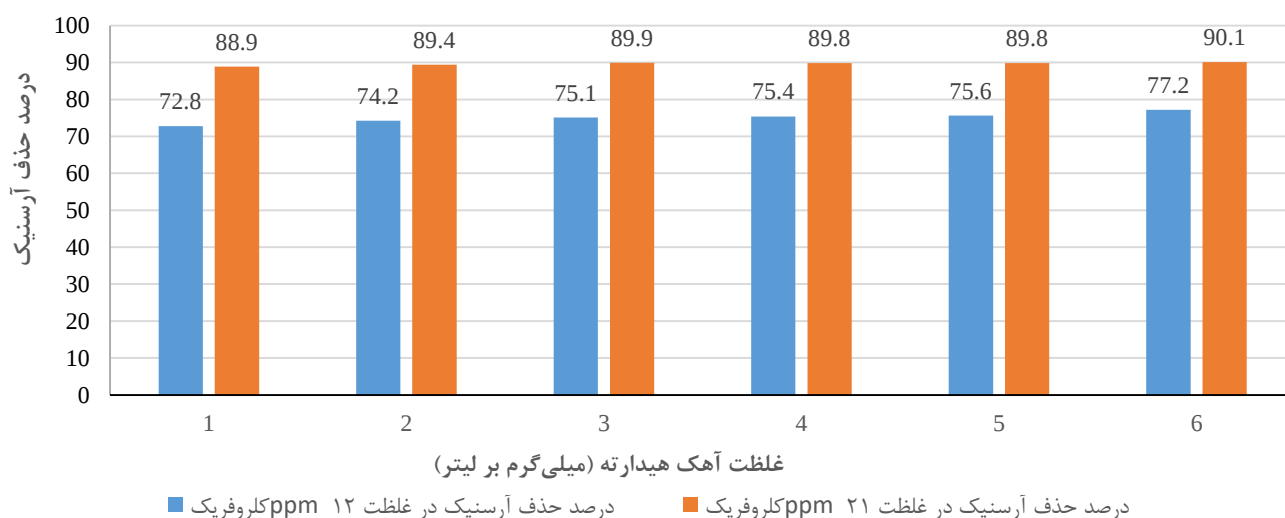


شکل ۴- تغییرات pH در حذف آرسنیک در حضور غلظت های ۱۲ و ۲۱ mg/l

آمده در شکل ۵ آمده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد در هر دو غلظت کلروفریک (۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر لیتر) افزایش غلظت کمک منعقدکننده آهک هیدراته از ۱ تا ۶ تاثیر جزئی در راندمان حذف آرسنیک دارد، ولی در صورت استفاده نکردن از آهک هیدراته میزان راندمان حذف آرسنیک کاهش زیادی نشان می‌دهد، به طوری که در آزمایش جارتست با غلظت کلروفریک ۱۲ میلی گرم بر لیتر در غیاب آهک هیدراته راندمان حذف آرسنیک ۶۶٪ رسید.

۳-۴- مقایسه غلظت‌های متفاوت آهک هیدراته در حضور منعقد کننده کلروفریک

برای تعیین مقدار مناسب آهک هیدراته بر راندمان حذف آرسنیک به منظور بررسی کارایی منعقدکننده کلروفریک (۱۲ و ۲۲ میلی گرم بر لیتر) مقادیر مختلف آهک هیدراته از (۱ تا ۶ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب غلظت ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر جارتست زده شد. نتایج بدست



شکل ۵- تاثیر مقادیر مختلف آهک (۱ تا ۶ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب (۱۲ و ۲۱)، ۰/۰۳ و ۲ میلی گرم بر لیتر

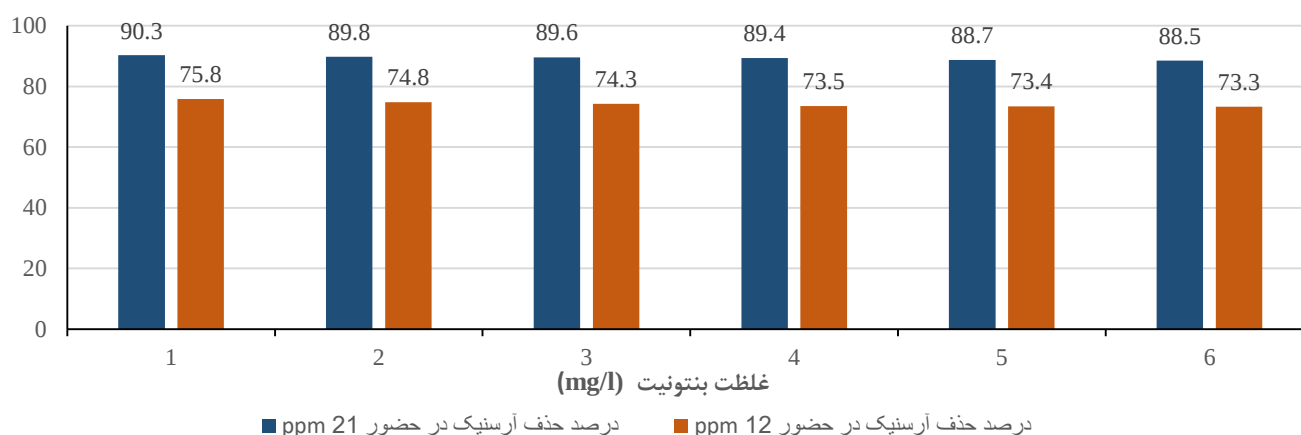
لیتر)، ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر جارتست زده شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد با افزایش بنتونیت مقدار آرسنیک به صورت جزئی افزایش می‌یابد (جدول ۵ و شکل ۶). قابل ذکر است که نتایج فوق به محلول رویی جارتست مرتبط بوده، از طرفی بنتونیت در تشکیل حجم لجن تاثیر به سزایی داشته و به احتمال زیاد بعد از عبور محلول رویی از بستر لجن، راندمان حذف افزایش خواهد یافت.

۳-۵- بررسی تاثیر غلظت‌های متفاوت بنتونیت در حضور منعقد کننده کلروفریک در حذف آرسنیک

به منظور تعیین مقدار بهینه بنتونیت بر راندمان حذف آرسنیک برای بررسی کارایی منعقدکننده کلروفریک برای مقادیر مختلف بنتونیت (۱ تا ۶ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک، آهک هیدراته و پلی الکترولیت به ترتیب (۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر

جدول ۵- مقایسه تاثیر غلظت‌های متفاوت بنتونیت ۱ تا ۶ (mg/l) در حضور منعقدکننده کلروفریک در حذف آرسنیک

بنتونیت (mg/l)	۱	۲	۳	۴	۵	۶
درصد حذف آرسنیک در حضور ۱۲ mg/l کلروفریک	۷۵/۸	۴۸/۸	۷۴/۳	۷۳/۵	۷۳/۴	۷۳/۳
درصد حذف آرسنیک در حضور ۲۱ mg/l کلروفریک	۹۰/۳	۸۹/۸	۸۹/۶	۸۹/۴	۸۸/۷	۸۸/۵



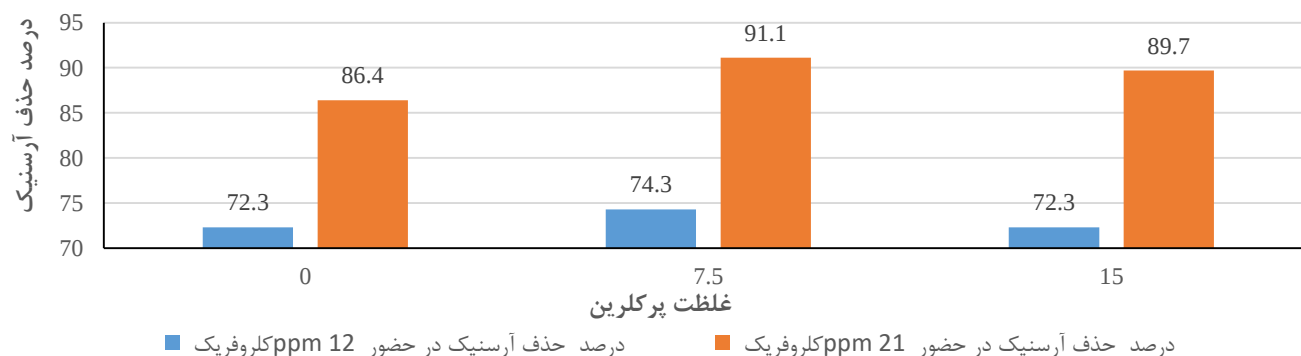
شکل ۶- مقایسه تاثیر غلظت‌های متفاوت بنتونیت ۱ تا ۶ (mg/l) در حضور منعقدکننده کلروفریک در حذف آرسنیک

۳-۶- بررسی ماده اکسیدکننده (پرکلرین) با توجه به این که کلر به عنوان یک اکسیدکننده قوی، آرسنیک سه ظرفیتی را به آرسنیک پنج ظرفیتی تبدیل می‌کند، این تغییر شیمیایی باعث می‌شود آرسنیک به راحتی از طریق روش‌هایی مانند جذب، رسوب گذاری یا فیلتراسیون حذف شود. لذا به منظور بررسی تاثیر اکسیدکننده پرکلرین در حذف آرسنیک، برای مقادیر مختلف پرکلرین (۰، ۷/۵ و ۱۵ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک (۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر لیتر)، آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب ۲، ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر (جدول ۶ و شکل ۷). با توجه به شکل ۷ بیشترین مقدار حذف آرسنیک در حضور ۷/۵ میلی گرم بر لیتر پرکلرین حاصل شده است. که می‌توان آن را به افزایش میزان اکسید شدن آرسنیک سه ظرفیتی به پنج ظرفیتی ارتباط داد (Sorlini and Gialdini, 2010). در غلظت‌های بالای کلر میزان اکسید شدن کاهش پیدا کرده است.

۳-۶- بررسی ماده اکسیدکننده (پرکلرین) با توجه به این که کلر به عنوان یک اکسیدکننده قوی، آرسنیک سه ظرفیتی را به آرسنیک پنج ظرفیتی تبدیل می‌کند، این تغییر شیمیایی باعث می‌شود آرسنیک به راحتی از طریق روش‌هایی مانند جذب، رسوب گذاری یا فیلتراسیون حذف شود. لذا به منظور بررسی تاثیر اکسیدکننده پرکلرین در حذف آرسنیک، برای مقادیر مختلف پرکلرین (۰، ۷/۵ و ۱۵ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک (۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر لیتر)، آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب ۲، ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر (جدول ۶ و شکل ۷). با توجه به شکل ۷ بیشترین مقدار حذف آرسنیک در حضور ۷/۵ میلی گرم بر لیتر پرکلرین حاصل شده است. که می‌توان آن را به افزایش میزان اکسید شدن آرسنیک سه ظرفیتی به پنج ظرفیتی ارتباط داد (Sorlini and Gialdini, 2010). در غلظت‌های بالای کلر میزان اکسید شدن کاهش پیدا کرده است.

جدول ۶- بررسی تاثیر اکسیدکننده پرکلرین در حذف آرسنیک، برای مقادیر مختلف پرکلرین (۰ و ۷/۵ و ۱۵ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک (۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر لیتر)، آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب ۲، ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر

پرکلرین (میلی گرم بر لیتر)	۰	۷/۵	۱۵
ماده کوآگولانت (میلی گرم بر لیتر)	۱۲	۱۲	۱۲
ماده کوآگولانت (میلی گرم بر لیتر)	۲۱	۲۱	۲۱
درصد حذف آرسنیک در حضور ۱۲ میلی گرم بر لیتر کلروفریک	۷۲/۳	۷۴/۳	۷۲/۳
درصد حذف آرسنیک در حضور ۲۱ میلی گرم بر لیتر کلروفریک	۸۶/۴	۹۱/۱	۸۹/۷



شکل ۷- بررسی تاثیر اکسیدکننده پرکلرین در حذف آرسنیک، برای مقادیر مختلف پرکلرین (۰، ۷/۵ و ۱۵ میلی گرم بر لیتر) در مجاورت کلروفریک (۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر لیتر)، آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب ۲، ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر

۳-۷- بررسی اثر کاغذ صافی در حذف آرسنیک

با توجه به اثر فرایند فیلتراسیون در تصفیه‌خانه‌های متعارف آب و تاثیر به‌سزای آن در کاهش غلظت آرسنیک، برای بررسی اثر فیلتراسیون از کاغذ صافی در حذف آرسنیک برای دو غلظت ۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر لیتر کلروفریک در مجاورت آهک هیدراته،

بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب ۲، ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر استفاده و جارست زده شد. بعد از اتمام جارست نمونه‌ها با کاغذ صافی واتمن ۴۰ صاف شد. مقدار آرسنیک نمونه‌ها قبل و بعد صافی با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. نتایج به‌دست آمده در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷- بررسی تاثیر کاغذ صافی در حذف آرسنیک (مقادیر تزریقی آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت به ترتیب ۲، ۲ و ۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر)

۲۱	۱۲	FeCl ₃ (mg/l)
۲۴/۳	۴۰/۲	مقدار آرسنیک باقی‌مانده قبل از صافی (ppb)
۵/۰۵	۹/۷	آرسنیک بعد از صافی (ppb)

۴- نتیجه گیری

بهینه، راندمان حذف آرسنیک از آب آلوده به این ماده حدود ۹۵٪ به‌دست آمد.

۵- قدردانی

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله از شرکت آب و فاضلاب استان اردبیل که شرایط و امکانات لازم برای پیشبرد این پروژه تحقیقاتی فراهم ساخت، مراتب قدردانی خود را اعلام می‌دارند.

۶- اظهارنامه استفاده از هوش مصنوعی

در هیچ‌یک از مراحل تهیه و نگارش این مقاله از ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.

۷- مراجع

- کریمی، س.، اعتدالی، ر.، و هادی نیا، س.، (۱۴۰۱)، "بررسی حذف آرسنیک از آب آشامیدنی با استفاده از ماده منعقدکننده کلورفریک"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۱۷(۱)، ۵۵-۶۱، <https://doi.org/10.22112/JWWSE.2021.284006.1271>
- میرشاهی، م.، و ایران‌دوست، م.، (۱۴۰۰)، "بررسی کاربرد روش رویه پاسخ در بهینه‌سازی فرایند انعقاد جهت حذف آرسنیک از آب"، نشریه آب و توسعه پایدار، ۸(۴)، ۷۷-۸۶، <https://doi.org/10.22067/jwsd.v8i4.2108.1072>
- Ahmadi, A., (2022). "Evaluation of heavy metal pollution in water resources of tabriz plain using qualitative indicators", *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(6), 1421-31, <https://doi.org/20.1001.1.20087942.1400.15.6.16.6>
- Ahmed, S.F., Kumar, P.S., Rozbu, M.R., Chowdhury, A.T., Nuzhat, S., Rafa, N., Mahlia, T., Ong, H.C., and Mofijur, M., (2022), "Heavy metal toxicity, sources,

در این تحقیق برای حذف آرسنیک از آب آلوده و بررسی تاثیر مواد منعقدکننده و کمک‌کننده (کلورفریک، پلی آلومینیوم کلراید، آهک هیدراته، بنتونیت) در pHهای مختلف، در حضور اکسیدکننده پرکلرین مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش غلظت کلورفریک از ۱۱ تا ۲۲ میلی گرم بر لیتر کاهش قابل ملاحظه‌ای در غلظت آرسنیک باقی‌مانده مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج حاصله و مقدار معمول مصرف کلورفریک در تصفیه‌خانه‌های استان برای تعیین مقدار بهینه مواد کمک منعقدکننده، غلظت کلورفریک برای ادامه پژوهش، ۱۲ و ۲۱ میلی گرم بر لیتر (غلظت بهینه) انتخاب شد. مشاهده شد که مقدار آهک هیدراته مصرفی بر روی کاهش غلظت آرسنیک به‌صورت جزئی موثر بوده به‌طوری که با افزایش مقدار آهک هیدراته مقدار آرسنیک به‌طور جزئی کاهش نشان می‌دهد.

افزایش غلظت بنتونیت تاثیر برعکس بر روی غلظت آرسنیک داشته و سبب افزایش جزئی غلظت آرسنیک می‌شود. استفاده از سیستم کلرزی اولیه به دلیل خاصیت اکسیدکنندگی کلر تاثیر به‌سزایی در کاهش مقدار آرسنیک داشته، به‌طوری که با افزایش غلظت تزریقی کلر از ۰ تا ۱۵ میلی گرم بر لیتر مقدار آرسنیک کاهش بیشتری نشان می‌دهد. به‌طور کلی با افزایش مقدار کلورفریک در حضور کلرزی اولیه و استفاده مواد کمک منعقدکننده آهک هیدراته، بنتونیت و پلی الکترولیت مقدار حذف آرسنیک قابل ملاحظه است. استفاده از منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید به جای کلورفریک با وجود کاهش محسوس کدورت ولی بر روی کاهش غلظت آرسنیک به اندازه کلورفریک موثر نبوده، به‌طوری که با افزایش مقدار پلی آلومینیوم کلراید مقدار آرسنیک کاهش کمی نشان می‌دهد. در این پژوهش با استفاده از شرایط

- Pennisetum purpureum for phytoremediation of arsenic in treatment sand: A phytotoxicity study", *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 60, 103300, <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103300>
- Sadee, B., Foulkes, M.E. and Hill, S.J., (2015), "Coupled techniques for arsenic speciation in food and drinking water: A review", *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 30(1), 102-118, <https://doi.org/10.1039/C4JA00269E>
- Sadee, B.A., (2022), "Determination of elements in indigenous vegetables using ICP-MS", *Cihan University-Erbil Scientific Journal*, 6(1), 26-31, <https://doi.org/10.24086/cuesj.v6n1y2022.pp26-31>
- Sadee, B.A., Galali, Y., and Zebari, S.M., (2024), "Recent developments in speciation and determination of arsenic in marine organisms using different analytical techniquesM A review", *RSC Advances*, 14(30), 21563-21589, <https://doi.org/10.1039/D4RA03000A>
- Sadee, B.A., Zebari, S.M., Galali, Y., and Saleem, M.F., (2025) "A review on arsenic contamination in drinking water: sources, health impacts, and remediation approaches", *RSC Advances*, 15(4), 2684-2703, <https://doi.org/10.1039/d4ra08867k>
- Sancha, A.M., (2006), "Review of coagulation technology for removal of arsenic: case of Chile", *Journal of Health, Population, and Nutrition*, 24(3), 267.
- Sarkar, S., Hazra, S., Chakraborty, K., Nayak, A., and Saha, P., (2023), "Hybrid technique for removal of arsenic from drinking water", *Chemical Engineering & Technology*, 46(2), 242-255, <https://doi.org/10.1002/ceat.202100603>
- Siddique, T.A., Dutta, N.K., and Roy Choudhury, N., (2020) "Nanofiltration for arsenic removal: challenges, recent developments, and perspectives", *Nanomaterials*, 10(7), 1323, <https://doi.org/10.3390/nano10071323>
- Smedley, P.L. and Kinniburgh, D.G., (2002), "A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters", *Applied Geochemistry*, 17(5), 517-568, [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
- Smedley, P.L., Nicolli, H.B., Macdonald, D.M.J., Barros, A.J., and Tullio, J.O., (2002) "Hydrogeochemistry of arsenic and other inorganic constituents in groundwaters from La Pampa, Argentina", *Applied Geochemistry*, 17(3), 259-284, [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00082-8)
- Sorlini, S., and Gialdini, F., (2010), "Conventional oxidation treatments for the removal of arsenic with chlorine dioxide, hypochlorite, potassium permanganate and monochloramine", *Water Research*, 44(19), 5653-5659, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.032>
- Srivastava, S., (2020), *Arsenic in drinking water and food*, Springer.
- Tseng, C.H., Chong, C.K., Tseng, C.P., and Centeno, J.A., (2007), "Blackfoot disease in Taiwan: Its link with inorganic arsenic exposure from drinking water", *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 36(1), 82-84, [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[82:bditil\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[82:bditil]2.0.co;2)
- and remediation techniques for contaminated water and soil", *Environmental Technology & Innovation*, 25, 102114, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102114>
- Hasanzadeh, M., and Ostovar, F., (2020). "A review of arsenic removal methods from water resources", *Journal of Environmental Research and Technology*, 6(6), 39, <https://doi.org/10.29252/4.6.39>
- Hamid, N.H.A., Rushdan, A.I., Nordin, A.H., Faiz Norrahim, M.N., Muhamad, S.N.H., Tahir, M.I.H.M., Rosli, N.S.B., Pakrudin, N.H.M., Roslee, A.S., Asyraf, M.R.M., and Knight, V.F., (2024), "A review: The state-of-the-art of arsenic removal in wastewater", *Water Reuse*, 14(3), 279-311, <https://doi.org/10.2166/wrd.2024.142>
- Inam, M.A., Khan, R., Lee, K.H., and Wie, Y.M., (2021), "Removal of arsenic oxyanions from water by ferric chloride, optimization of process conditions and implications for improving coagulation performance", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18), 981, <https://doi.org/10.3390/ijerph18189812>
- Mohammad-razdari, V., and Fanaee, S.A., (2021), "Comprehensive review of different types of water desalination", *Journal of Renewable and New Energy*, 8(1), 21-32, <https://doi.org/20.1001.1.24234931.1400.8.1.3.7>
- Nasiri, A., Rajabi, S., Amir, A., Fattahizade, M., Hasani, O., Lalehzari, A., and Hashemi, M., (2022), "Adsorption of tetracycline using CuCoFe₂O₄@ Chitosan as a new and green magnetic nanohybrid adsorbent from aqueous solutions: Isotherm, kinetic and thermodynamic study", *Arabian Journal of Chemistry*, 15(8), 104014, <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104014>
- Nasiri, A., Rajabi, S., Hashemi, M., and Nasab, H., (2022), "CuCoFe₂O₄@ MC/AC as a new hybrid magnetic nanocomposite for metronidazole removal from wastewater: Bioassay and toxicity of effluent", *Separation and Purification Technology*, 296, 121366, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121366>
- Pezeshki, H., Hashemi, M., and Rajabi, S., (2023), "Removal of arsenic as a potentially toxic element from drinking water by filtration: a mini review of nanofiltration and reverse osmosis techniques", *Heliyon*, 9(3), 14246, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14246>
- Pramanik, S., (2026), "A suspended adsorbent filter for arsenic removal from water to address UN 2030 agenda for sustainable development", A non-peer reviewed preprint submitted to EarthArXiv, 1-31, <https://doi.org/10.31223/X5NJ3Z>
- Rahidul Hassan, H., (2023), "A review on different arsenic removal techniques used for decontamination of drinking water", *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 35(1), 2165964, <https://doi.org/10.1080/26395940.2023.2165964>
- Rahman, M.E., Uddin, M.K., Shamsuzzaman, S.M., Mahmud, K., Abd Shukor, M.Y., Abd Ghani, S.S., Nabayi, A., Sadeq, B.M., Chompa, S.S., Akter, A., and Halmi, M.I.E.B., (2024), "Potential use of

- Vu, K.B., Kaminski, M.D., and Nuñez, L., (2003), *Review of arsenic removal technologies for contaminated groundwaters*, Chemical Engineering Division, Argonne National Laboratory, Argonn, Illinois, <https://doi.org/10.2172/815660>
- Yin, H., Kong, M., Gu, X., and Chen, H., (2017), "Removal of arsenic from water by porous charred granulated attapulgite-supported hydrated iron oxide in bath and column modes", *Journal of Cleaner Production*, 166, 88-97, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.026>
- Zamora-Ledezma, C., Negrete-Bolagay, D., Figueroa, F., Zamora-Ledezma, E., Ni, M., Alexis, F., and Guerrero, V.H., (2021), "Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods", *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101504, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101504>



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

Developing an Organizational Sustainable Development Model in the Water and Wastewater Industry: An Analytical Review Based on Mashhad Water and Wastewater Company Experiences

Mohammad Hosseini^{1*}, Mohammad Talati², Ali Salami Koocheh Bagh³, Masoud Abdollahpoor⁴, Fariba Ghanbari¹ and Samaneh Tavakoli Aminian⁵

1- M.Sc. Graduate, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

2- Ph.D. Candidate, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

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

4- Researcher, Water and Environmental Research Institute, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

5- Ph.D. Student in Urban Planning, Department of Urban Planning, Islamic Azad University, Mashhad, Iran.

*Corresponding Author, Email:

mohammad.hosseini@alumni.um.ac.ir

Received: 05/02/2026

Revised: 27/07/2026

Accepted: 19/08/2026

© IWWA

Abstract

Water, as a fundamental pillar of sustainable development, faces increasing challenges in Iran, including population growth, imbalanced urban development, unsustainable exploitation of groundwater resources, and climate change. Within this context, water and wastewater companies, as primary providers and managers of essential infrastructure services, play a decisive role in achieving organizational sustainable development. This paper adopts a review-analytical approach, examining the experience of the Mashhad Water and Wastewater Company as a case study. Relying on existing literature, it presents a framework for evaluating and localizing sustainable development strategies. Findings indicate that employing analytical approaches tailored to institutional and organizational conditions can lead to a more precise identification of capacities, improved managerial decision-making, and enhanced organizational sustainability. Furthermore, the results suggest that this framework, with appropriate adaptation and localization, is generalizable to other water and wastewater companies across the country and can serve as a basis for developing practical strategies at the national level. Ultimately, this research emphasizes the necessity of transitioning from general approaches to models suitable for local contexts.

Keywords: Sustainable water resources management, New water technologies, Innovation in water resources management, Sustainable organizational development, Organizational resilience, Water demand management.

ارائه الگوی توسعه پایدار سازمانی در صنعت آب و فاضلاب: مرور تحلیلی براساس تجارب شرکت آب و فاضلاب مشهد

محمد حسینی^{۱*}، محمد طلعتی^۲، علی سلامی کوچه‌باغ^۳، مسعود عبدالله‌پور^۴، فریبا قنبری^۱ و سمانه توکلی امینیان^۵

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

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

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

۴- پژوهشگر، پژوهشکده آب و محیط‌زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

۵- دانشجوی دکتری برنامه‌ریزی شهری، گروه آموزشی شهرسازی، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

*نویسنده مسئول، ایمیل: mohammad.hosseini@alumni.um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۶

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۸

© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

آب به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های بنیادین توسعه پایدار، در ایران با چالش‌های فزاینده‌ای هم‌چون رشد جمعیت، توسعه نامتوازن شهری، بهره‌برداری ناپایدار از منابع زیرزمینی و تغییرات اقلیمی مواجه است. در این میان، شرکت‌های آب و فاضلاب به‌عنوان نهادهای اصلی ارائه و مدیریت خدمات زیربنایی، نقشی تعیین‌کننده در تحقق توسعه پایدار سازمانی دارند. این مقاله با رویکردی مروری-تحلیلی، تجربه شرکت آب و فاضلاب مشهد را به‌عنوان مطالعه موردی بررسی می‌کند و با اتکا به ادبیات موضوع، چارچوبی برای ارزیابی و بومی‌سازی راهبردهای توسعه پایدار ارائه می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهد که به‌کارگیری رویکردهای تحلیلی متناسب با شرایط نهادی و سازمانی می‌تواند به شناسایی دقیق‌تر ظرفیت‌ها، بهبود تصمیم‌گیری مدیریتی و ارتقای کارآمدی در مسیر پایداری سازمانی منجر شود. همچنین، نتایج حاکی از آن است که این چارچوب با تعدیل و بومی‌سازی، قابلیت تعمیم به سایر شرکت‌های آب و فاضلاب کشور را دارد و می‌تواند مبنایی برای تدوین راهبردهای عملی در سطح ملی باشد. این پژوهش در نهایت، بر ضرورت گذار از رویکردهای کلی‌نگر به الگوهای متناسب با بافت محلی تأکید می‌کند.

کلمات کلیدی: مدیریت پایدار منابع آب، فناوری‌های نوین آب، نوآوری در مدیریت منابع آب، توسعه پایدار سازمانی، تاب‌آوری سازمانی، مدیریت تقاضای آب.

کردن هم‌زمان ابعاد گوناگون تصمیم‌گیری، از جمله ابعاد اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی و نهادی است (Özerol et al., 2020).

با این حال، تحقق چنین هدفی، بدون بهره‌گیری از ابزارهای ارزیابی و سنجش دقیق امکان‌پذیر نیست. برای آن‌که سیاست‌گذاران و مدیران قادر به شناخت وضعیت موجود، مقایسه عملکرد در طول زمان، و اصلاح مسیرهای ناپایدار باشند، نیازمند شاخص‌هایی معتبر، قابل اعتماد و کاربرپسند برای سنجش توسعه پایدار در حوزه منابع آب هستند. شاخص‌های توسعه پایدار در حقیقت، ابزاری برای کمی‌سازی مفاهیم پیچیده و میان‌رشته‌ای پایدار هستند که از طریق آن‌ها می‌توان ابعاد مختلف سیستم‌های انسانی و طبیعی را پیش‌برد، روند تغییرات را شناخت، و کارایی سیاست‌ها را ارزیابی نمود (Parkinson et al., 2007; Pahl-Wostl et al., 2019). این شاخص‌ها، به‌ویژه در سطوح کلان مانند حوضه‌های آبریز، می‌توانند نقش مهمی در تقویت تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد، شفافیت سیاستی و ارتقای حکمرانی منابع ایفا کنند (Kazora and Mourad, 2018).

با وجود اهمیت روزافزون این شاخص‌ها، در عمل با چالش‌های متعددی مواجه هستیم. نخست، بسیاری از شاخص‌های توسعه پایدار موجود در ادبیات علمی به‌صورت منفک، تک‌بعدی یا با تمرکز صرف بر بهره‌وری فیزیکی یا اقتصادی طراحی شده‌اند؛ درحالی‌که توسعه پایدار، ماهیتی درهم‌تنیده و بین‌رشته‌ای دارد (Hoang, 2022; Hu et al., 2010). دوم، اغلب شاخص‌ها بدون در نظر گرفتن شرایط بومی، ساختارهای نهادی، محدودیت‌های اطلاعاتی، و الگوهای فرهنگی جوامع طراحی شده‌اند. درنتیجه، استفاده از این شاخص‌ها در کشورهایی مانند ایران، که با پیچیدگی‌های نهادی، ضعف در زیرساخت‌های آماری، و نبود هماهنگی بین‌بخشی مواجه‌اند، نه تنها دشوار، بلکه در مواردی بی‌فایده یا گمراه‌کننده است (متحد و پشتون، ۱۳۹۶).

از این‌رو، لازم است به‌جای استفاده خام و تقلیدی از شاخص‌های بین‌المللی، رویکردی بومی‌شده و تطبیقی در پیش گرفته شود که هم‌راستا با نیازها، ظرفیت‌ها و چالش‌های خاص کشور باشد. مرور و تحلیل انتقادی شاخص‌های توسعه پایدار در مدیریت منابع آب، گام نخست این مسیر است. چنین مروری می‌تواند به شناسایی شاخص‌های کلیدی، تبیین نقاط قوت و ضعف آن‌ها، و طراحی چارچوبی مناسب برای ارزیابی عملکرد منابع آب در سطوح مختلف کمک کند. چارچوبی که نه تنها قابلیت اجرایی بالا داشته باشد، بلکه بتواند به‌عنوان بستری برای مشارکت ذی‌نفعان، شفافیت اطلاعاتی، و افزایش پاسخگویی در نظام حکمرانی آب نیز ایفای نقش نماید (Loucks and Gladwell, 2007).

آب، به‌عنوان عنصر حیاتی برای بقای زیستی، زیربنای اصلی حیات در سیاره زمین است. این منبع تجدیدپذیر، نه تنها در تداوم فرآیندهای اکولوژیکی نقش دارد، بلکه اساس توسعه اقتصادی، رفاه اجتماعی و امنیت غذایی در جوامع انسانی به‌شمار می‌رود (اسلامی و رحیمی، ۱۳۹۸). از تأمین آشامیدنی و بهداشت گرفته تا کشاورزی، صنعت و تولید انرژی، هیچ‌یک از اجزای ساختار تمدن انسانی بدون دسترسی پایدار به منابع آبی قابل تصور نیست (Giannetti et al., 2022). با این حال، در دهه‌های اخیر این بنیان حیاتی با چالش‌های بی‌سابقه‌ای مواجه شده و بحران آب به یکی از مهم‌ترین موانع تحقق توسعه پایدار در سطح جهانی، به‌ویژه در کشورهای خشک و نیمه‌خشکی مانند ایران، تبدیل شده است (داوری، ۱۴۰۳).

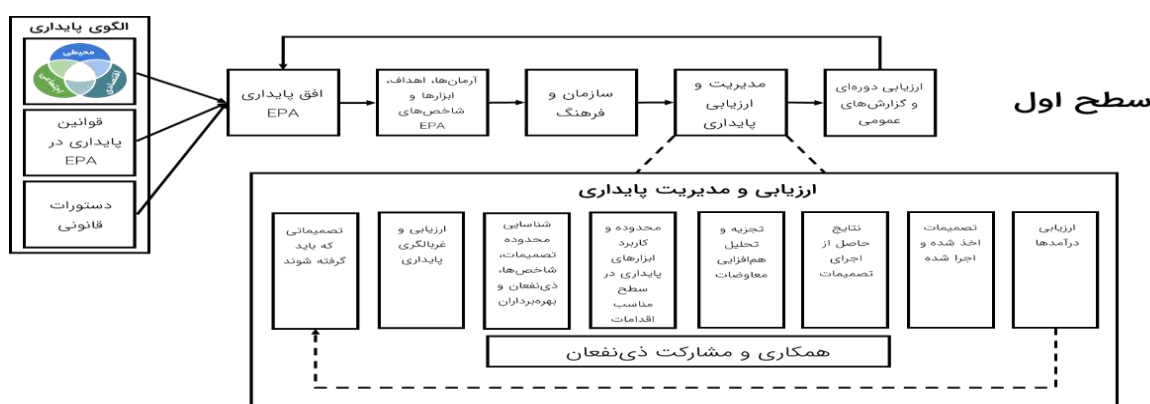
در ایران نیز شواهد متعددی از تشدید این بحران وجود دارد؛ افزایش جمعیت، تمرکزگرایی شهری، گسترش بی‌رویه کشاورزی ناپایدار، رشد صنایع آبربر، تغییرات اقلیمی، و مهم‌تر از همه، برداشت مازاد از منابع آب زیرزمینی، منجر به افت سطح سفره‌های آب، خشک شدن تالاب‌ها، بیابان‌زایی و ناپایداری منابع آب شده است. گزارش‌های رسمی، از جمله گزارش سازمان حفاظت محیط‌زیست و Simone et al. (2020)، حاکی از آن است که بسیاری از حوضه‌های آبریز کشور در وضعیت بحرانی قرار دارند. این وضعیت، امنیت غذایی، کیفیت زندگی، سلامت اکوسیستم‌ها و ثبات اقتصادی کشور را تهدید می‌کند. بحران‌های پی‌درپی خشکسالی و فرونشست زمین در دشت‌های مرکزی، تنها نمودهای آشکار این ناکارآمدی مدیریتی‌اند که ریشه در ضعف درک سیستمی، نبود رویکرد پایدار و عدم وجود ابزارهای مناسب پیش دارد (Nath, 2024).

در چنین شرایطی، دیگر نمی‌توان مدیریت منابع آب را صرفاً یک مقوله فنی یا تخصصی در نظر گرفت. بلکه باید آن را یکی از مهم‌ترین مولفه‌های راهبردی توسعه ملی و منطقه‌ای دانست که نیازمند یک نگاه جامع‌نگر، میان‌بخشی و آینده‌نگر است. این نگاه، در چارچوب مفهومی توسعه پایدار تبلور می‌یابد؛ مفهومی که تأکید دارد توسعه باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که نیازهای نسل کنونی تأمین شود، بدون آن‌که توان نسل‌های آینده در رفع نیازهای خود به‌خطر بیفتد (Omohwovo, 2024). بر این اساس، مدیریت پایدار منابع آب به معنای ایجاد تعادل میان بهره‌برداری بهینه، حفاظت اکولوژیکی، عدالت اجتماعی و کارایی اقتصادی در استفاده از منابع آبی است. این رویکرد، مستلزم شناخت و لحاظ

(1999; Poole, and Van de Ven 1989).

درنهایت، در کشورهایی مانند ایران که ساختار مدیریتی منابع آب با چالش‌های متعددی همچون تمرکزگرایی، ضعف هماهنگی بین‌بخشی، فقدان داده‌های قابل‌اتکا، و غفلت از مشارکت جامعه مدنی مواجه است، بهره‌گیری از چارچوب‌های ارزیابی مبتنی بر شاخص‌های توسعه پایدار، ضرورتی انکارناپذیر است. این چارچوب‌ها باید بتوانند ارتباط نظام‌مند بین سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی، اجرا و پایش را برقرار کرده و زمینه‌ساز افزایش بهره‌وری، حفاظت از منابع طبیعی، تحقق عدالت اجتماعی و پایداری اکولوژیکی شوند (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۸).

در این میان، تحقیقات مروری نقش مهمی در یکپارچه‌سازی



شکل ۱- چارچوب پایداری و رویکرد ارزیابی و مدیریت پایداری

و همچنین سازمان‌های بین‌المللی فعال در حوزه آب، توسعه پایدار و تغییرات اقلیمی مورد استفاده قرار گیرد. این نتایج می‌توانند در شناسایی شکاف‌های دانشی موجود، انتخاب شاخص‌های مناسب برای ارزیابی پایداری، و همچنین سازگار کردن شاخص‌ها با ویژگی‌های بومی و نهادی کشورهای نظیر ایران نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا کنند. به‌طور خاص، این مطالعه می‌تواند مبنای طراحی چارچوب‌های بومی‌شده ارزیابی در سطوح مختلف تصمیم‌گیری از سطح محلی و حوضه‌ای تا سطح ملی قرار گیرد، به‌نحوی که ارزیابی عملکرد منابع آب نه‌تنها محدود به داده‌های فنی، بلکه مبتنی بر رویکردی چندبُعدی و مشارکتی باشد (Landis, 2015; Najam, 1997).

افزون بر این، یافته‌های مرور حاضر می‌تواند در تدوین و استقرار سامانه‌های یکپارچه پایش توسعه پایدار در بخش آب مورد بهره‌برداری قرار گیرد؛ سامانه‌هایی که امکان رصد تغییرات در شاخص‌های کلیدی، مقایسه روندها در بازه‌های زمانی مختلف، و ایجاد بازخوردهای اصلاحی برای سیاست‌گذاری را فراهم می‌کنند. از سوی دیگر، یکی از کاربردهای راهبردی این نتایج، فراهم‌آوردن مبنایی برای ارتقای نظام‌های حسابداری

بر این اساس، هدف مقاله حاضر، انجام یک مطالعه مروری جامع، ساختاریافته و انتقادی درباره شاخص‌های توسعه پایدار در حوزه مدیریت منابع آب است. در این مقاله، تلاش شده است با گردآوری داده‌ها و یافته‌های پژوهش‌های معتبر داخلی و بین‌المللی، شاخص‌های توسعه پایدار براساس ابعاد چهارگانه آن (اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی و نهادی) شناسایی، طبقه‌بندی و تحلیل شوند. علاوه بر آن، با تکیه بر تجربه‌ها و چارچوب‌های بین‌المللی مانند: اهداف توسعه پایدار سازمان ملل در حوزه آب^۱ (Tortajada, 2020)، چارچوب پتانسیل گرمایش جهانی^۲ و دستورالعمل‌های فائو^۳ (Ma et al., 2015)، کارایی و قابلیت پیاده‌سازی شاخص‌ها در بستر مدیریتی کشور ارزیابی شده است. مقاله همچنین با بررسی مطالعات موردی انجام‌شده، چالش‌های اجرایی، نارسایی‌های داده‌ای، محدودیت‌های نهادی و بسترهای بهبود شاخص‌ها در سطوح منطقه‌ای و محلی را تحلیل می‌کند (Smith et al., 2011; Klassen, 1999).

نتایج این مرور می‌تواند به‌عنوان یک نقشه راه کاربردی برای طیفی وسیع از ذی‌نفعان، از جمله پژوهشگران دانشگاهی، برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران، نهادهای دولتی مرتبط با منابع آب،

این پژوهش با رویکرد مروری-تحلیلی، چارچوب مفهومی بومی‌سازی شده برای استقرار توسعه پایدار در شرکت‌های آب و فاضلاب با تأکید بر شرایط خاص این شرکت را تدوین می‌کند. فرآیند پژوهش برپایه مرور نظام‌مند ادبیات تخصصی، تحلیل اسناد بالادستی و گزارش‌های راهبردی مدیریت آب استوار است تا ضمن شناسایی مؤلفه‌های چهارگانه توسعه پایدار (محیط‌زیستی، اقتصادی، اجتماعی و حکمرانی)، ابزارهای عملیاتی متناسب برای سنجش و بهبود عملکرد سازمانی استخراج شود. شهر مشهد به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله ماهیت کلان‌شهر زیارتی، نرخ رشد جمعیت و توسعه کالبدی شتابان، اقلیم نیمه‌خشک و محدودیت شدید منابع آبی، به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. این شرایط، شبکه آب و فاضلاب این کلان‌شهر را با تنش‌های متعددی نظیر هدررفت منابع و فشارهای نهادی مواجه کرده است که آن را به بستری مناسب برای ارزیابی الزامات توسعه پایدار در شرایط واقعی و متأثر از محدودیت‌های اقلیمی بدل می‌سازد.

در گام نخست، مرور ساختارمند و تحلیلی ادبیات تخصصی به منظور شناسایی مفاهیم کلیدی، استخراج ابعاد اصلی توسعه پایدار، و بررسی رویکردهای رایج در مدیریت پایدار منابع آب انجام شد. در این مرحله، علاوه بر مقالات علمی، از اسناد مرجع و معتبر بین‌المللی نیز بهره‌گیری شد؛ از جمله گزارش‌های کمیسیون جهانی محیط‌زیست و توسعه، و نیز دستورالعمل‌های انجمن امور آبی آمریکا^۴ (Poole and Van de Ven, 1989) و سایر منابع سیاستی و اجرایی مرتبط (Nath, 2024; Luck et al., 2000). هدف از این مرحله، شفاف‌سازی تعاریف، استخراج الزامات کلیدی، و شناسایی رویکردهای قابل انطباق با شرایط سازمانی و محلی بود (فیضی کوشکی و همکاران، ۱۳۹۸).

در گام بعد، مؤلفه‌های استخراج شده براساس میزان انطباق با شرایط شرکت آب و فاضلاب مشهد تحلیل و دسته‌بندی شدند تا مبنایی برای بومی‌سازی چارچوب فراهم شود. این دسته‌بندی با تمرکز بر سه بُعد اصلی اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی انجام گرفت؛ به گونه‌ای که بُعد اجتماعی شامل رضایت ذی‌نفعان، عدالت در دسترسی و کیفیت خدمت، بُعد اقتصادی شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و نگهداری، و پایداری مالی و بُعد محیط‌زیستی شامل کاهش مصرف آب و انرژی، کاهش آلاینده‌ها و ارتقای بهره‌وری منابع در نظر گرفته شد. در این مرحله، از کارت امتیازی متوازن^۴ به عنوان ابزاری برای سامان‌دهی شاخص‌ها و ایجاد انسجام میان ابعاد مختلف پایداری بهره گرفته شد. در این مرحله، از کارت امتیازی متوازن و ماتریس خودارزیابی ویژگی‌های

محیط‌زیستی در کشور است. در شرایط کنونی که منابع طبیعی در اغلب نظام‌های حسابداری ملی مغفول واقع شده‌اند، وارد کردن شاخص‌های توسعه پایدار در نظام‌های حسابداری می‌تواند گامی بلند در جهت اندازه‌گیری «ثروت طبیعی» کشور، و لحاظ کردن ارزش اقتصادی و محیط‌زیستی منابع در فرآیند برنامه‌ریزی و بودجه‌ریزی باشد (Larsen et al., 2016; Kunjo et al., 2024). پژوهش حاضر با ارائه تصویری منسجم و نظام‌مند از شاخص‌های توسعه پایدار در مدیریت منابع آب، می‌تواند به ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری‌های آبی در کشور کمک کرده و زمینه را برای اصلاح سیاست‌ها، بازنگری در الگوهای حکمرانی و تقویت هماهنگی میان نهادهای مسئول فراهم سازد. در نهایت، هدف این پژوهش حمایت از گذار به سوی حکمرانی پایدار آب است؛ حکمرانی‌ای که بر بهره‌وری منابع، عدالت بین‌نسلی، تاب‌آوری اجتماعی و اکولوژیکی، و پایداری بلندمدت استوار باشد.

۲- مواد و روش‌ها

برای انجام مرور نظام‌مند ادبیات در این پژوهش، جستجوی ساختاریافته در پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر شامل Web of Science، Scopus، ScienceDirect، Google Scholar، SID و Magiran با استفاده از ترکیب کلیدواژه‌های «توسعه پایدار»، «مدیریت پایدار آب»، «صنعت آب و فاضلاب»، «ارزیابی عملکرد محیط‌زیستی»، «شاخص‌های پایداری»، «چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره» و «مدیریت زیرساخت‌های آبی» به دو زبان فارسی و انگلیسی انجام شد. بازه زمانی جستجو برای مقالات علمی، سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۶ در نظر گرفته شد تا هم مبانی اولیه توسعه پایدار و هم جدیدترین رویکردها و تجربیات عملی در این حوزه پوشش داده شود. معیارهای انتخاب منابع شامل: (۱) ارتباط مستقیم موضوعی با ابعاد چهارگانه توسعه پایدار در صنعت آب و فاضلاب، (۲) انتشار در مجلات دارای نمایه معتبر بین‌المللی یا نشریات علمی-پژوهشی داخلی، (۳) ارائه چارچوب‌ها، مدل‌ها یا شاخص‌های قابل استفاده در ارزیابی پایداری و (۴) دسترسی به متن کامل مقاله بود. در گام نخست، با استفاده از کلیدواژه‌های مذکور، ۲۴۷ عنوان مقاله و سند علمی شناسایی شد. پس از حذف موارد تکراری و غربالگری براساس عنوان و چکیده، ۸۹ منبع برای ارزیابی متن کامل انتخاب شدند. در نهایت، با اعمال معیارهای ورود و خروج، ۵۲ منبع شامل مقالات علمی، گزارش‌های سازمانی معتبر و اسناد راهبردی بین‌المللی، به عنوان منابع نهایی برای استخراج داده‌ها و تحلیل عمیق مورد استفاده قرار گرفتند.

فرهنگی صرفاً به‌عنوان چارچوب‌های مفهومی و الگوهای نظامی‌بخش برای سامان‌دهی شاخص‌ها استفاده‌شد و هیچ‌یک از این ابزارها به‌صورت اجرایی و عملیاتی در سازمان پیاده‌سازی نشده‌اند (Optimization and Supply Chain Management, 2025).

برای شناسایی دقیق مفاهیم کلیدی و ابعاد مختلف توسعه پایدار و به‌منظور تقویت مبانی نظری پژوهش، مرور نظام‌مند ادبیات تخصصی صورت‌گرفت. در این بخش، تأکید بر شفاف‌سازی تعاریف توسعه پایدار، استخراج الزامات کلیدی آن، و نیز مطالعه سیاست‌گذاری‌ها و دستورالعمل‌های بین‌المللی در زمینه مدیریت منابع آب بود. بدین‌منظور، از اسناد مرجع و معتبر جهانی نظیر گزارش کمیسیون جهانی محیط‌زیست و توسعه (Guillaume, 2019) که به‌عنوان یکی از اسناد پایه در تعریف توسعه پایدار شناخته می‌شود، بهره‌برداری‌شد. همچنین، دستورالعمل‌ها و رهنمودهای انجمن امور آبی آمریکا (Bolger et al., 2009) و (Oether et al., 2022) و مدل‌های سیاست‌گذاری ارائه‌شده توسط مؤسسه Aspen^۵ به‌عنوان چارچوب‌های معتبر بین‌المللی در حوزه مدیریت پایدار منابع آب مورد استفاده قرار گرفتند.

افزون بر این، مطالعات موردی شرکت‌های موفق آب و فاضلاب و پژوهش‌های تجربی در کشورهای پیشرو (Marshall et al., 2011, Mays, 2006)، به‌عنوان نمونه‌های تطبیقی تحلیل‌شدند. این مطالعات به شناسایی دقیق‌تر نقاط قوت، چالش‌ها و موانع پیاده‌سازی برنامه‌های توسعه پایدار کمک‌نموده و امکان مقایسه وضعیت موجود در ایران با الگوهای جهانی را فراهم‌ساختند. بدین‌ترتیب، یافته‌های این مرحله نه‌تنها به تبیین ابعاد مفهومی توسعه پایدار یاری‌رساند، بلکه زمینه‌ساز طراحی چارچوبی شد که با واقعیت‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی شهر مشهد هم‌راستا است.

در ادامه، برپایه نتایج حاصل از مرور نظام‌مند ادبیات و مطالعات موردی، چارچوب مفهومی توسعه پایدار برای شرکت آب و فاضلاب مشهد تدوین‌شد. این چارچوب با درنظر گرفتن اقتضائات اقلیمی، در چهار محور کلیدی تعریف شد: نخست، تعیین اهداف کلان و خرد توسعه پایدار متناسب با نیازهای بومی؛ دوم، تحلیل جایگزین‌های زیرساختی براساس ظرفیت‌های موجود و آتی؛ سوم، تدوین استراتژی مالی با هدف تأمین پایدار منابع و بهره‌وری اقتصادی؛ و نهایتاً، برنامه‌ریزی برای بهبود مستمر با رویکرد ارزیابی، یادگیری و اصلاح فرآیندها. این چارچوب به‌گونه‌ای طراحی شده است که به‌صورت هم‌زمان پاسخگوی الزامات اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی باشد. ساختار سازمانی

پیشنهادی برای دفتر توسعه پایدار (شکل ۲)، نقش محوری در پیاده‌سازی این چارچوب ایفا می‌کند. در تدوین این الگو، از مدل‌های جامع مدیریت دارایی و تجربیات شرکت‌های پیشرو از جمله: دستورالعمل‌های سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا، (National Research Council (2011)، انجمن امور آبی آمریکا و (Bolger et al., 2009) بهره‌گیری شده و متناسب با شرایط خاص اقلیمی و اقتصادی کلان‌شهر مشهد، بومی‌سازی شده است.

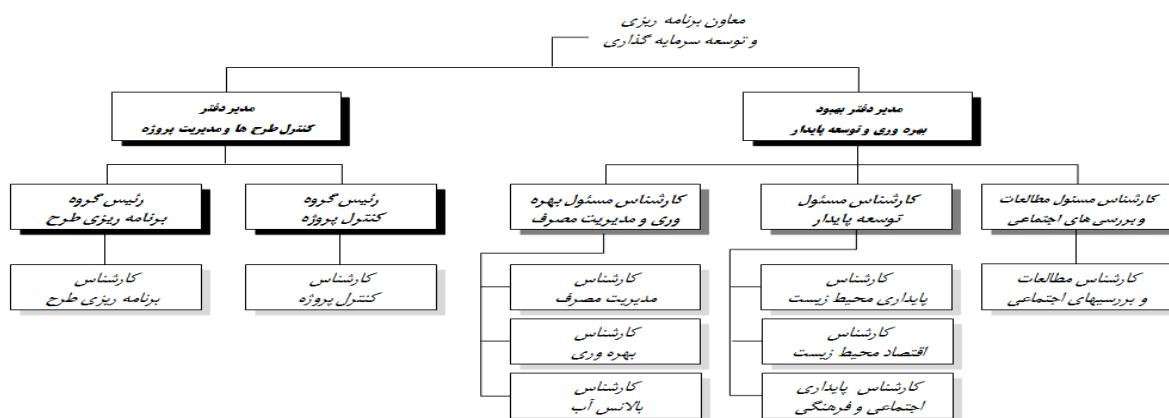
هدف از ارائه این ساختار سازمانی، ترسیم یک الگوی مفهومی برای استقرار نظام‌مند مدیریت پایدار در شرکت آب و فاضلاب مشهد است. این چارت که براساس تحلیل ادبیات موضوع و الگوهای موفق بین‌المللی تدوین شده، نشان‌دهنده جایگاه، وظایف و ارتباطات داخلی دفتر توسعه پایدار به‌عنوان هسته مرکزی تصمیم‌گیری و هماهنگی در مسیر تحقق اهداف پایداری است. به عبارت دیگر، این ساختار صرفاً یک پیشنهاد سازمانی-اجرایی برای استقرار در شرکت است و در پژوهش حاضر به‌صورت عملی پیاده‌سازی نشده است. اجزای اصلی این ساختار شامل معاونت برنامه‌ریزی و راهبری (مسئول تدوین سیاست‌ها و اولویت‌بندی اهداف)، واحد پایش و ارزیابی (مسئول اندازه‌گیری شاخص‌های پایداری و تهیه گزارش‌های عملکرد)، واحد توانمندسازی و آموزش (مسئول ارتقای سرمایه انسانی و فرهنگ‌سازی)، و واحد پژوهش و توسعه (مسئول شناسایی فناوری‌ها و راه‌کارهای نوین) است. همچنین، ارتباط این دفتر با سایر واحدهای سازمانی (ازجمله معاونت‌های بهره‌برداری، مهندسی، مالی و منابع انسانی) به‌صورت افقی ترسیم‌شده است تا هماهنگی میان‌بخشی و رویکرد مشارکتی در اجرای برنامه‌های توسعه پایدار تسهیل‌شود. این ساختار به‌گونه‌ای طراحی شده که ضمن تمرکز بر تصمیم‌گیری راهبردی، امکان انعطاف‌پذیری در مواجهه با تغییرات اقلیمی، اقتصادی و اجتماعی را نیز برای سازمان فراهم آورد.

به‌منظور تدوین چارچوب تحلیل جایگزین‌های زیرساختی و استخراج معیارهای انتخاب گزینه‌های مطلوب، از رویکرد ترکیبی کارت امتیازی متوازن و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۶ به‌عنوان الگوی نظری بهره گرفته‌شد (Herrick et al., 2013). در این پژوهش، این روش‌ها صرفاً به‌عنوان چارچوب تحلیلی برای شناسایی ابعاد ارزیابی و دسته‌بندی شاخص‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند و پیاده‌سازی عددی یا اجرایی آن‌ها در سازمان انجام نشده است. در این بخش، ابتدا شاخص‌های ارزیابی در سه بُعد اصلی شامل شاخص‌های اجتماعی (نظیر میزان رضایت‌مندی شهروندان، عدالت اجتماعی و ارتقای کیفیت خدمات)،

مفهومی به هریک از شاخص‌ها انجام‌شد و درنهایت، گزینه یا ترکیب بهینه‌ای از جایگزین‌ها متناسب با نیازهای بومی و ظرفیت‌های فنی سازمان، بر مبنای تحلیل‌های نظری صورت‌گرفته از ادبیات موضوع، تعیین‌شد (Saravanan et al., 2021).

شاخص‌های اقتصادی (شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری، نگهداری و بازسازی زیرساخت‌ها) و شاخص‌های محیط‌زیستی (نظیر کاهش مصرف منابع آب، بهبود کیفیت منابع آبی و کاهش آلاینده‌ها) شناسایی و استخراج‌شد. سپس، براساس یافته‌های مستخرج از منابع معتبر و مطالعات پیشین، وزن‌دهی

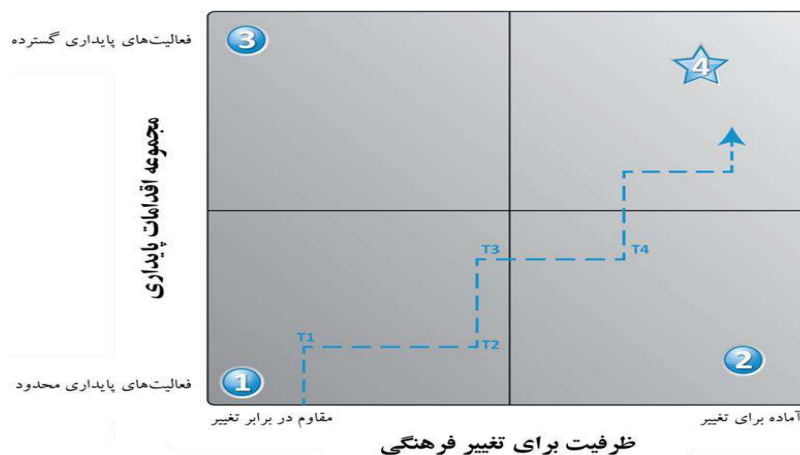
نمودار تشکیلات تفصیلی ستاد شرکت آب و فاضلاب استان گروم چهار معاونت برنامه ریزی و توسعه سرمایه گذاری



شکل ۲- ساختار سازمانی دفتر توسعه پایدار

«تسهیل کننده»، «محدودکننده» و «نامشخص» مورد واکاوی قرار گرفت. این ارزیابی ضمن شناسایی ظرفیت‌های بالفعل و بالقوه سازمان در راستای تحقق اهداف توسعه پایدار، به تبیین موانع احتمالی در مسیر اجرایی‌سازی یاری‌رساند. بدین ترتیب، نتایج این مرحله بستر لازم را برای تدوین راهبردهای اجرایی متناسب با مقتضیات سازمانی و اقلیمی شهر مشهد فراهم‌ساخت. فرآیند تدوین و پیاده‌سازی تحول فرهنگی در شرکت آب و فاضلاب مشهد، به‌منظور استقرار موفقیت‌آمیز مدل توسعه پایدار، در چهار مرحله اساسی طراحی‌شد. این مراحل در شکل ۳ به‌صورت خلاصه و گام‌به‌گام نشان‌داده شده‌اند.

در بخش ارزیابی ظرفیت‌های فرهنگی و سازمانی شرکت آب و فاضلاب مشهد، از ابزار «ماتریس خودارزیابی ویژگی‌های فرهنگی» بهره گرفته‌شد. این ماتریس با هدف تحلیل وضعیت موجود و شناسایی نقاط قوت و ضعف سازمانی در مسیر استقرار توسعه پایدار طراحی شد و شامل ۱۲ ویژگی کلیدی از جمله سبک رهبری، ساختار سازمانی، ظرفیت فنی، انگیزه کارکنان برای تغییر، سامانه مدیریت اطلاعات، وضعیت سرمایه‌گذاری، شیوه‌های مدیریت منابع انسانی، میزان مشارکت ذی‌نفعان، و ابعاد محیطی، حقوقی و سیاسی است (Schein, 1984; Siebenhuner and Arnold, 2007). هریک از این ویژگی‌ها در سه سطح



شکل ۳- فرآیند تکرارشونده برای ایجاد تعادل بین ظرفیت تغییر فرهنگی و مجموعه اقدامات پایداری

در گام نخست، «تیم پایداری» با مشارکت فعال کارشناسان و نمایندگان واحدهای مختلف سازمان تشکیل شد. هدف از این اقدام، ایجاد هماهنگی و هم‌افزایی میان بخش‌های سازمان و فراهم‌سازی بستر لازم برای اجرای اصول و راهبردهای توسعه پایدار بود. این تیم، نقش تسهیل‌گر در فرآیند تغییر و هدایت‌گر در اجرای برنامه‌های راهبردی توسعه پایدار را برعهده داشت (Permana, 2020).

در مرحله دوم، ظرفیت سازمانی شرکت با اتکا به نتایج حاصل از «ماتریس خودارزیابی ویژگی‌های فرهنگی» مورد تحلیل قرارگرفت. این تحلیل به شناسایی قابلیت‌ها، محدودیت‌ها و فرصت‌های موجود در ابعاد مختلف، از جمله سبک رهبری، ساختار سازمانی، انگیزش کارکنان و ظرفیت فنی، کمک‌کرد و زمینه را برای طراحی و انتخاب اقدامات بهینه فراهم‌ساخت (Herrick et al., 2013).

سپس، در مرحله سوم، ابزارها و اقدامات موردنیاز در سه حوزه اصلی شناسایی شد: ابزارهای سازمانی، شامل بازنگری در ساختارها و فرآیندهای کاری؛ ابزارهای ارتباطی، نظیر بهبود نظام‌های اطلاع‌رسانی، شفاف‌سازی سیاست‌ها و افزایش تعاملات درون‌سازمانی و برون‌سازمانی؛ و ابزارهای آموزشی، شامل برنامه‌های توانمندسازی و ارتقای دانش تخصصی کارکنان. این ابزارها با هدف ارتقای فرهنگ سازمانی، افزایش پذیرش توسعه پایدار و تقویت ظرفیت‌های داخلی طراحی و اولویت‌بندی شدند (Milićević et al., 2024).

در نهایت، مرحله چهارم شامل تدوین برنامه زمان‌بندی عملیاتی، تعیین شاخص‌های ارزیابی عملکرد و طراحی فرآیند بازنگری مستمر بود. این مرحله با هدف پایش، ارزیابی و اصلاح مداوم اقدامات و راهبردها طراحی شد تا سازمان بتواند در مسیر استقرار توسعه پایدار، به‌صورت پیوسته پیشرفت کند و در برابر تغییرات محیطی و درونی، انعطاف‌پذیر باقی بماند (Küçükoglu, 2018).

در تکمیل فرایند پژوهش، به‌منظور افزایش دقت تحلیل‌های نظری و دستیابی به جامع‌نگری در ارزیابی پروژه‌ها، از چارچوب‌های مفهومی و مدل‌های تحلیلی موجود در ادبیات موضوع بهره‌گیری شد. نرم‌افزار CUPSS به‌عنوان یکی از ابزارهای مرجع در حوزه ارزیابی نیازهای مالی و زیرساختی شرکت‌های آب و فاضلاب در منابع بین‌المللی معرفی شده است و در این پژوهش، مفاهیم و شاخص‌های ارائه‌شده در آن، مبنای تدوین بخش‌هایی از چارچوب پیشنهادی قرارگرفته است. هم‌چنین، نرم‌افزار ESP به‌عنوان نمونه‌ای از ابزارهای تحلیل و بهینه‌سازی مصرف انرژی

در زیرساخت‌های آبی، صرفاً به‌عنوان منبع الهام برای طراحی مؤلفه‌های مرتبط با انرژی در مدل پیشنهادی مورداستفاده قرار گرفته و هیچ‌یک از این نرم‌افزارها در پژوهش حاضر اجرا نشده‌اند (Ermilio et al., 2022).

در کنار این چارچوب‌های مفهومی، از روش تحلیل چرخه عمر (LCA) و مدل‌سازی مکانی (GIS) به‌عنوان رویکردهای تحلیلی مستخرج از ادبیات موضوع به‌منظور ارزیابی جامع ابعاد محیطی، اقتصادی و فضایی پروژه‌ها استفاده شد. این روش‌ها در پژوهش حاضر به‌صورت عملی پیاده‌سازی نشده‌اند؛ بلکه مفاهیم، شاخص‌ها و ابعاد کلیدی آن‌ها، مبنای تدوین چارچوب ارزیابی چندبعدی در مدل پیشنهادی قرارگرفته‌اند (Bolger et al., 2009).

تحلیل هزینه چرخه عمر^۷ نیز به‌عنوان یکی از ارکان اصلی روش‌شناسی پژوهش مدنظر قرارگرفت. این تحلیل با رویکرد «هزینه‌یابی کامل»^۸ انجام شد و در آن علاوه بر هزینه‌های اقتصادی، ملاحظات محیط‌زیستی و اجتماعی در کل چرخه حیات پروژه لحاظ شد. این رویکرد امکان برآورد دقیق‌تری از مزایا و چالش‌های اقتصادی و هم‌چنین پیامدهای محیط‌زیستی و اجتماعی را در فرآیند تصمیم‌گیری فراهم کرد (Akens et al., 2019).

در پژوهش (Nimjerdi et al., 2026) با تمرکز بر صنعت آب و فاضلاب ایران نشان داده شده است که نوآوری در مدیریت آب، به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در بهره‌برداری پایدار و مدیریت کارآمد منابع آبی، از ظرفیت بالایی برخوردار است؛ با این حال، نقش نوآوری در مدل کسب‌وکار تاکنون کمتر موردتوجه قرارگرفته است. در راستای پرکردن این شکاف، نویسندگان تأثیر نوآوری در مدل کسب‌وکار را بر بهره‌وری بخش آب و فاضلاب ایران موردبررسی قراردادند. نتایج حاصل از برآورد تابع تولید کاب-داگلاس و شاخص دیویتی^۹ برپایه داده‌های پانلی ۳۳ شرکت استانی طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ نشان داد که گردش خالص دارایی‌ها، در کنار نیروی کار و سرمایه، اثر مثبت و معناداری بر سطح تولید دارد. این یافته، اهمیت نوآوری در مدل کسب‌وکار را به‌عنوان یکی از پیشران‌های ارتقای بهره‌وری در خدمات عمومی مبتنی بر دارایی‌های متمرکز و منابع محدود برجسته می‌سازد (Nimjerdi et al., 2026).

با توجه به ماهیت مروری-تحلیلی پژوهش و تأکید بر تدوین چارچوب مفهومی، باید تأکیدشود که هیچ‌گونه تحلیل میدانی، مصاحبه کارشناسی یا جمع‌آوری داده‌های محلی در این پژوهش انجام‌نشده است. تمامی مؤلفه‌ها، شاخص‌ها و ابزارهای معرفی‌شده، براساس مرور نظام‌مند ادبیات تخصصی و تحلیل

خوب، شفافیت و پاسخگویی) را در بر می‌گیرد (Hart, 1999; Milman and Short, 2008).

با این حال، این پژوهش بر اهمیت تفسیر نتایج در بستر واقعی چالش‌های بخش آب ایران تأکید دارد. در شرایطی که کشور با بحران منابع آب، افت شدید آب‌های زیرزمینی، پدیده فرونشست زمین، افزایش روزافزون تقاضای شهری و فرسودگی گسترده زیرساخت‌های آبی مواجه است، مفهوم توسعه پایدار برای شرکت‌های آب و فاضلاب از یک چارچوب نظری به یک ضرورت مبرم اجرایی و نهادی بدل شده است. در این راستا، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که پیوند مستقیم شاخص‌های توسعه پایدار با مسائل عملیاتی کلیدی، نظیر کاهش میزان هدررفت آب در شبکه‌ها، افزایش نرخ بازچرخانی و استفاده مجدد از پساب، ارتقای بهره‌وری انرژی در تأسیسات و سامانه‌های توزیع، و بهبود تاب‌آوری زیرساخت‌ها در برابر تنش‌های محیطی، امری ضروری است. این پیوند، مبنایی برای ارزیابی عملکرد و تدوین استراتژی‌های مؤثر در برای دستیابی به توسعه پایدار فراهم می‌آورد.

یافته‌های این تحقیق حاکی از آن است که در شرایط کنونی، سازمان‌های آب و فاضلاب برای پاسخگویی مؤثر به نیازهای روزافزون جمعیت شهری و روستایی، نیازمند برنامه‌ریزی راهبردی بر مبنای چارچوب‌های توسعه پایدار هستند. چنین برنامه‌ریزی‌هایی باید بر پایه یک رویکرد یکپارچه استوار باشد؛ رویکردی که بتواند هم‌افزایی میان ابعاد مختلف را فراهم‌سازد و از طریق تلفیق ابزارها و فناوری‌های نوین، ضمن پاسخگویی به نیازهای مصرف‌کنندگان، پایداری بلندمدت منابع آبی و محیط‌زیست را نیز تضمین نماید (Evaristo et al., 2022; Denison et al., 1996).

در مقایسه با کشورهای اتحادیه اروپا، که در آن‌ها حکمرانی محیط‌زیستی، نظام‌های پایش داده‌محور و الزامات قانونی سخت‌گیرانه زمینه را برای اجرای مؤثرتر سیاست‌های پایداری فراهم کرده‌اند، وضعیت شرکت‌های آب و فاضلاب در ایران با محدودیت‌های بیشتری مواجه است. در بسیاری از کشورهای اروپایی، سیاست‌های محیط‌زیستی، مدیریت منابع آب و ارزیابی عملکرد خدمات عمومی در قالب چارچوب‌های شفاف و پاسخگو دنبال می‌شود، در حالی که در ایران، شکاف میان سیاست و اجرا، محدودیت منابع مالی و ضعف هماهنگی نهادی، تحقق کامل این رویکردها را با چالش مواجه می‌سازد. بنابراین، تجربه اتحادیه اروپا نشان می‌دهد که پایداری در بخش آب تنها نتیجه طراحی فنی نیست، بلکه به حکمرانی مؤثر و ظرفیت نهادی وابسته است.

اسناد معتبر بین‌المللی و ملی استخراج شده‌اند. فرآیند بومی‌سازی چارچوب پیشنهادی برای شرکت آب و فاضلاب مشهد، صرفاً از طریق انطباق مفاهیم مستخرج از ادبیات با ویژگی‌های اقلیمی، جمعیتی و زیرساختی این کلان‌شهر (براساس داده‌های موجود در گزارش‌های رسمی و منابع معتبر) انجام شده است (فیضی کوشکی و همکاران، ۱۳۹۸).

با تأکید مجدد بر ماهیت مروری-تحلیلی این پژوهش، باید تصریح شود که مدل توسعه پایدار ارائه شده، یک چارچوب مفهومی است که براساس مرور نظام‌مند ادبیات تخصصی و تحلیل اسناد معتبر تدوین شده و فاقد هرگونه اجرای عملیاتی، میدانی یا تجربی در سازمان مورد مطالعه است. این چارچوب می‌تواند مبنایی برای پژوهش‌های آتی با رویکرد اجرایی و تجربی قرارگیرد.

یکی از نقاط قوت این پژوهش، بهره‌گیری از منابع علمی معتبر و مستندات بین‌المللی در کنار تحلیل‌های بومی و نیز اقتباس از تجربه‌های موفق شرکت‌های آب و فاضلاب در کشورهای پیشرو است. این رویکرد، ضمن تقویت اعتبار علمی مطالعه، موجب افزایش تطبیق‌پذیری نتایج با شرایط اقلیمی، اجتماعی و ساختاری شهر مشهد شده و به‌منظور مواجهه نظام‌مند با چالش‌های توسعه پایدار در بخش آب و فاضلاب، راهبردهای عملی و اجرایی را ارائه می‌کند. هم‌چنین، با توجه به ویژگی‌ها و مشخصات مورد اشاره، مدل توسعه پایدار ارائه شده در این پژوهش از قابلیت انطباق و تعمیم در سطح ملی برخوردار است. بر این اساس، پژوهش حاضر می‌تواند به‌عنوان الگویی ارزشمند برای سایر مناطق دارای شرایط مشابه و نیز برای سیاست‌گذاران و مدیران صنعت آب و فاضلاب در سراسر کشور، در مسیر تحقق توسعه پایدار مورد استفاده قرارگیرد.

۳- نتایج و بحث

مرور ادبیات و ارزیابی‌های صورت‌گرفته در این پژوهش نشان می‌دهد که تحقق توسعه پایدار در شرکت‌های آب و فاضلاب، مستلزم اتخاذ رویکردی جامع، یکپارچه و چندوجهی است که به‌طور هم‌زمان به تمامی ابعاد کلیدی آن توجه نماید. بر این اساس، توسعه پایدار در این حوزه، فراتر از جنبه‌های صرفاً محیط‌زیستی (مانند حفاظت از منابع آب، کاهش آلاینده‌ها و ارتقای کیفیت محیط‌زیست)، ابعاد حیاتی اقتصادی (ازجمله بهره‌وری منابع، بهینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی)، اجتماعی (نظیر رضایت‌مندی ذی‌نفعان، تحقق عدالت اجتماعی و ارتقای کیفیت زندگی) و هم‌چنین بُعد حکمرانی (شامل حاکمیت

علاوه بر این، مطالعات موردی در مقیاس بین‌المللی، از جمله موارد مستند شده (Hua et al., 2025)، نشان می‌دهند که نادیده گرفتن هر یک از ابعاد کلیدی توسعه پایدار در بخش آب و فاضلاب، می‌تواند پیامدهای بحرانی به دنبال داشته باشد. این پیامدها شامل تنزل کیفیت منابع آبی، تعمیق شکاف‌های اجتماعی، کاهش سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های حیاتی و تضعیف سازوکارهای حکمرانی است.

لذا، طراحی و اجرای برنامه‌های توسعه پایدار در شرکت‌های آبفا باید به‌طور نظام‌مند و با بهره‌گیری از ابزارهای مدیریتی چندمعیاره، مدل‌های برنامه‌ریزی استراتژیک و شاخص‌های کلیدی عملکرد^{۱۰} صورت‌پذیرد. این رویکرد جامع، تضمین‌کننده توانایی سازمان در پاسخگویی به نیازهای پیچیده و متغیر جوامع شهری و روستایی در زمینه تأمین و مدیریت پایدار آب در بلندمدت خواهد بود (Farsari and Prastacos, 2002).

در این راستا، «نوآوری باز» می‌تواند به‌عنوان یک ساز و کار مکمل برای ارتقای عملکرد شرکت‌های آبفا مدنظر قرارگیرد. نوآوری باز، با تکیه بر تعامل پویا میان دانشگاه، صنعت، نهادهای مقررات‌گذار و جامعه محلی، فرآیند تولید و انتقال دانش و فناوری را تسریع می‌کند. شواهد اخیر از کشورهای اتحادیه اروپا نیز نشان می‌دهد که نوآوری باز، به‌ویژه هنگامی که با مقررات محیط‌زیستی مؤثر پشتیبانی شود، می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی به بهبود نرخ بازیافت منابع و ارتقای بهره‌وری منجر شود (Nimjerdi, 2026). بنابراین، به‌کارگیری این رویکرد در شرکت‌های آبفای ایران می‌تواند به کاهش شکاف میان نیازهای عملیاتی و ظرفیت‌های فناورانه موجود یاری رساند.

به‌طور خلاصه، نتایج حاصل از مرور ادبیات و مطالعات تحلیلی این پژوهش بر ضرورت اتخاذ رویکردی جامع و یکپارچه در برنامه‌ریزی و اجرای استراتژی‌های توسعه پایدار در شرکت‌های آبفا تأکید دارد. این رویکرد، با درنظر گرفتن هم‌زمان ابعاد محیط‌زیستی، اقتصادی، اجتماعی و حکمرانی، و از طریق تقویت ظرفیت‌های نهادی، افزایش شفافیت اطلاعات و ارتقای تعاملات بین‌بخشی، قادر به تضمین پایداری بلندمدت منابع و خدمات خواهد بود.

۳-۱- توسعه چارچوب‌های یکپارچه و ابزارهای تصمیم‌گیری

یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که توسعه و به‌کارگیری چارچوب‌های برنامه‌ریزی یکپارچه در سازمان‌های آبفا، نقشی اساسی در ارتقای بهره‌وری منابع، کاهش هزینه‌های

سرمایه‌گذاری و عملیاتی، و افزایش کیفیت خدمات‌رسانی به شهروندان ایفا می‌کند. در این راستا، استفاده از مدل‌های ارائه‌شده توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا^{۱۱} و دستورالعمل‌های انجمن امور آبی آمریکا (AWWA) به‌عنوان نمونه‌های موفق بین‌المللی، می‌تواند به‌عنوان الگوهای راهبردی برای سازمان‌های آبفا به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه مورد بهره‌برداری قرارگیرد (Miles, 2011; AWWA, 2010).

این چارچوب‌ها با فراهم‌سازی رویکردی نظام‌مند برای مدیریت دارایی‌ها، ارتقای تاب‌آوری سامانه‌ها و ادغام ابعاد مختلف پایداری، امکان برنامه‌ریزی جامع‌نگر را فراهم می‌کنند (Martin, 1997; Hartley, 2015; and Carter). با این حال، کاربست آن‌ها در ایران با چالش‌هایی هم‌چون ناهمگونی داده‌ها، محدودیت‌های بودجه‌ای، ضعف نظام‌های پایش و پراکندگی نهادی مواجه است. از این‌رو، موفقیت این چارچوب‌ها صرفاً به طراحی فنی آن‌ها وابسته نیست، بلکه مستلزم وجود زیرساخت‌های اطلاعاتی مناسب، ظرفیت اجرایی کافی و هماهنگی بین‌سازمانی مؤثر است. تجربه اتحادیه اروپا نیز نشان می‌دهد که چارچوب‌های یکپارچه زمانی کارآمد خواهند بود که با نظام‌های شفاف گزارش‌دهی، نظارت مستمر و مشارکت ذی‌نفعان همراه شوند.

یکی از ابزارهای کلیدی در این حوزه، بهره‌گیری از «کارت امتیازی متوازن» است که به سازمان‌ها این امکان را می‌دهد تا ابعاد مختلف عملکرد خود را در قالب شاخص‌های کلیدی عملکرد، ارزیابی و پایش نمایند. کارت امتیازی متوازن، علاوه بر شاخص‌های مالی، ابعاد اجتماعی، محیط‌زیستی و حاکمیتی را نیز در بر می‌گیرد و به سازمان‌ها کمک می‌کند تا در مسیر تحقق توسعه پایدار، از نگاه تک‌بعدی پرهیز کرده و به‌صورت یکپارچه به بهبود عملکرد بپردازند (Tachizawa and Wong, 2014; Sun et al., 2023).

در همین راستا، به‌کارگیری روش تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌عنوان ابزاری مؤثر برای ارزیابی و اولویت‌بندی پروژه‌ها، این امکان را به مدیران سازمان‌های آبفا می‌دهد که با تلفیق شاخص‌های کمی و کیفی، گزینه‌های مختلف زیرساختی و عملیاتی را در قالب سناریوهای مختلف تحلیل و مقایسه نمایند (van Leeuwen et al., 2012). به‌عنوان نمونه، شاخص‌هایی هم‌چون درصد هدررفت آب، نرخ بازیافت و استفاده مجدد از پساب، شدت کربن عملیات، بهره‌وری انرژی، و شاخص‌های عدالت اجتماعی، می‌توانند به‌عنوان معیارهای ارزیابی در این تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

در امتداد این رویکرد، فناوری سبز نیز باید به‌عنوان یکی از ارکان اصلی تصمیم‌گیری در بخش آب و فاضلاب مورد توجه قرار

۳-۲- شاخص‌های کلیدی عملکرد توسعه پایدار

یکی از دستاوردهای کلیدی این پژوهش، شناسایی و تدوین مجموعه‌ای از شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPIs) است که شرکت‌های آبفا می‌توانند از آن‌ها برای پایش و ارزیابی میزان پیشرفت خود در مسیر تحقق اهداف توسعه پایدار بهره‌برداری نمایند. اهمیت طراحی چنین شاخص‌هایی در این است که ارزیابی اثربخش عملکرد سازمان‌ها بدون ابزارهای سنجش دقیق و منسجم عملاً امکان‌پذیر نیست و دستیابی به اهداف بلندمدت پایداری را با چالش‌های جدی مواجه می‌کند (Walters and Javernick-Will, 2015).

این شاخص‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شوند که بتوانند ابعاد سه‌گانه توسعه پایدار - محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی - را به صورت هم‌زمان پوشش دهند. در این راستا، کاهش آب بدون درآمد به عنوان یکی از شاخص‌های اساسی در ارتقای بهره‌وری منابع آبی و کاهش اتلاف، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Wang et al., 2018; Xiang et al., 2021). این شاخص، میزان هدررفت آب در شبکه توزیع را منعکس می‌کند و کاهش آن مستقیماً به بهبود کارایی سیستم و صرفه‌جویی در هزینه‌های بهره‌برداری منجر می‌شود (Wu and Pagell, 2011; Zhang and Chen, 2010). در شرایط ایران، با توجه به فرسودگی شبکه‌های توزیع در بسیاری از شهرها و مواجهه با نشتی و اتلاف قابل توجه آب، این شاخص از اهمیت دوچندان برخوردار است. هر میزان کاهش در آب بدون درآمد می‌تواند تأثیر مستقیمی بر امنیت آبی و بهره‌وری عملیاتی شرکت‌های آب و فاضلاب داشته باشد. بنابراین، تمرکز بر این شاخص نه تنها یک اقدام مدیریتی، بلکه ضرورتی راهبردی برای مواجهه اثربخش با بحران کمبود آب محسوب می‌شود. شاخص‌های بومی توسعه پایدار در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱- شاخص‌های بومی توسعه پایدار

ردیف	عنوان شاخص
۱	درصد افرادی که از خدمات آب سالم و در دسترس بهره‌مندند به تفکیک مناطق روستایی و شهری (van Leeuwen et al., 2012)
۲	درصد افرادی که از خدمات امور بهداشتی و دفع فاضلاب بهره‌مندند به تفکیک مناطق روستایی و شهری (Tortajada, 2020)
۳	شاخص بازدهی مصرف آب و تنش آبی (Mirdashtvan et al., 2021)
۴	درصد جریان فاضلابی که در حد استانداردهای ملی تصفیه و بازچرخانی می‌شود (Saravanan et al., 2021)
۵	شاخص مشارکت جوامع محلی در مدیریت آب و امور بهداشتی (Pahl-Wostl et al., 2007)
۶	شاخص همکاری‌های بین‌المللی و ظرفیت‌سازی در فعالیتهای مرتبط با آب و امور بهداشتی (Evaristo et al., 2023)

را منعکس می‌سازد و مدیریت بهینه آن، علاوه بر کاهش هزینه‌های عملیاتی، به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز کمک شایانی می‌نماید (Villena and Gioia, 2018).

گیرد. فناوری‌های سبز، از جمله سامانه‌های کم‌مصرف انرژی، پایش هوشمند، بازچرخانی پیشرفته و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر، می‌توانند ضمن کاهش ردپای اکولوژیکی، هزینه‌های عملیاتی را نیز به طور معناداری کاهش دهند. پژوهش‌های اخیر در اتحادیه اروپا نشان داده‌اند که پیوند میان چارچوب‌های اقلیمی و نوآوری فناورانه سبز می‌تواند اثر قابل توجهی بر کاهش ردپای اکولوژیکی داشته باشد (Nimjerdi et al., 2025). از این رو، این یافته‌ها برای شرکت‌های آب و فاضلاب ایران نیز واجد دلالت‌های مهمی هستند و نشان می‌دهند که گذار به پایداری، بدون سرمایه‌گذاری هدفمند در فناوری‌های سبز، با دشواری‌های جدی مواجه خواهد بود.

علاوه بر این، نتایج مطالعات موردی انجام شده در سازمان‌های پیشرو نشان می‌دهد که به کارگیری این ابزارها، افزون بر ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری، به شفافیت در فرآیند ارزیابی، افزایش تعامل با ذی‌نفعان و تقویت اعتماد عمومی نیز منجر می‌شود (Yulistyorini et al., 2022). به‌ویژه در شرایطی که سازمان‌ها با محدودیت منابع مالی و مجموعه‌ای از چالش‌های محیط‌زیستی و اجتماعی روبه‌رو هستند، استفاده از ابزارهای ترکیبی مانند کارت امتیازی متوازن و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند نقشی کلیدی در تحقق اهداف توسعه پایدار و مدیریت بهینه پروژه‌ها ایفا کند.

در مجموع، یافته‌های این بخش بر اهمیت توسعه چارچوب‌های یکپارچه برنامه‌ریزی و بهره‌گیری از ابزارهای تصمیم‌گیری چندمعیاره در راستای ارتقای بهره‌وری، کارایی و اثربخشی برنامه‌های توسعه پایدار در سازمان‌های آبفا تأکید دارد؛ رویکردی که می‌تواند به عنوان یک راهبرد مؤثر در مسیر تحقق اهداف پایداری مورد استفاده قرار گیرد.

علاوه بر این، شاخص بهره‌وری انرژی نقشی حیاتی در ارزیابی عملکرد محیط‌زیستی و اقتصادی سازمان‌ها ایفا می‌کند. این شاخص، میزان مصرف انرژی به ازای هر واحد تولید یا توزیع آب

لزوم جلب مشارکت فعال ذی‌نفعان کلیدی در مراحل مختلف تصمیم‌گیری، از جمله تعیین اهداف، اولویت‌بندی، و ارزیابی گزینه‌ها تأکید شده است. این مشارکت می‌تواند هم در قالب رسمی مانند تشکیل کارگروه‌های مشورتی و شوراهای محلی، و هم به شکل غیررسمی از طریق دریافت بازخوردهای مردمی، نظرسنجی و مصاحبه با نمایندگان اجتماعی تحقق یابد (Han et al., 2018; Hammer, 2007).

مطالعات موردی موفق نشان داده‌اند که همکاری بین اپراتورهای آب^{۱۵}، که از سوی نهادهایی مانند برنامه اسکان بشر سازمان ملل متحد^{۱۶}، پشتیبانی می‌شود، بستر مناسبی برای تسهیم دانش فنی، ارتقاء ظرفیت و حمایت فنی میان سازمان‌های خدمات‌رسان ایجاد می‌کند. از سوی دیگر، چارچوب همبست^{۱۷} آب-انرژی-غذا-اکوسیستم نیز با نگاهی نظام‌مند و یکپارچه، فرصت‌هایی را برای شناسایی هم‌افزایی‌ها و کاهش تضادهای بین‌بخشی فراهم می‌سازد، که در مدیریت منابع محدود، بسیار حیاتی است (Giri et al., 2006; Elias, 2013). با این حال، در ایران تحقق این سطح از مشارکت با موانعی مانند ضعف اعتماد عمومی، ناهماهنگی میان نهادهای مسئول، و محدودیت در دسترسی آزاد به داده‌های عملکردی روبه‌روست. از این‌رو، نهادهای سازوکارهای مشارکتی در شرکت‌های آب و فاضلاب باید همراه با شفافیت، آموزش عمومی و اصلاح سازوکارهای ارتباطی میان دولت و جامعه صورت گیرد.

همان‌گونه که در ساختار شاخص‌های حکمرانی در مدل مفهومی فایل حاضر نیز منعکس شده، شاخص‌هایی هم‌چون میزان مشارکت ذی‌نفعان، میزان پاسخگویی به بحران‌ها و شاخص نوآوری در حکمرانی به‌عنوان مؤلفه‌های سنجش عملکرد این مشارکت‌ها در نظر گرفته می‌شوند. به‌طور خاص، هدف‌گذاری برای مشارکت حداقل ۸۵٪ از ذی‌نفعان در فرآیندهای تصمیم‌گیری، نشان از اهمیت این اصل در ساختار حکمرانی توسعه‌گرا دارد (Nicro and Markopoulos, 2008).

از منظر پایداری اجتماعی و اقتصادی نیز، همکاری‌های چندبخشی می‌توانند نقش مهمی در تاب‌آوری شهری ایفا کنند. برای مثال، مشارکت محلی در طراحی پروژه‌های سرمایه‌ای، نه تنها باعث ارتقای عدالت محیط‌زیستی و افزایش پذیرش اجتماعی طرح‌ها می‌شود، بلکه فرصت‌های اشتغال‌زایی محلی و توسعه ظرفیت‌های بومی را نیز فراهم می‌آورد (Oxtoby et al., 2002).

در مجموع، شواهد نشان می‌دهد که بدون بنیان‌گذاری فرآیندهای شفاف، مشارکت‌پذیر و نوآورانه در حکمرانی آب،

در همین راستا، نرخ بازیافت لجن نیز به‌عنوان یکی دیگر از شاخص‌های کلیدی عملکرد، اهمیت انکارناپذیری در چرخه مدیریت پسماند و حفظ سلامت محیط‌زیست دارد. استفاده مجدد از لجن تصفیه‌شده در کشاورزی یا در فرآیند تولید انرژی، می‌تواند به کاهش آلودگی‌های محیط‌زیستی، بهبود بهره‌وری اقتصادی و ایجاد فرصت‌های جدید درآمدی برای سازمان‌های آبفا منجر شود (Vogel et al., 2007; Yulistyorini et al., 2022).

علاوه بر این، میزان استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر^{۱۸} به‌عنوان شاخصی مهم در راستای کاهش وابستگی به منابع انرژی فسیلی و کاهش ردپای کربن سازمان، اهمیت فزاینده‌ای یافته است. گسترش بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر، علاوه بر مزایای اقتصادی، می‌تواند در بهبود تاب‌آوری سازمان‌ها در برابر تغییرات اقلیمی و نوسانات بازار انرژی مؤثر باشد (Wilby and Vaughan, 2010; Zheng et al., 2010).

بر این اساس، شاخص‌های کلیدی عملکرد زمانی اثربخش خواهند بود که نه تنها برای پایش درون سازمانی، بلکه برای مقایسه عملکرد شرکت‌های آبفا در سطح ملی و منطقه‌ای نیز قابل استفاده باشند. این امر به‌ویژه در شرایطی که کشور با بحران‌های شدید منابع آب مواجه است، امکان یادگیری سازمانی و اولویت‌بندی بهینه مداخلات را فراهم می‌سازد. براساس نتایج این پژوهش، طراحی و به‌کارگیری چنین شاخص‌هایی می‌تواند موجب ارتقای شفافیت در فرآیندهای ارزیابی عملکرد، تسهیل در تصمیم‌گیری‌های راهبردی، و بهبود پاسخگویی سازمان‌های آبفا در قبال ذی‌نفعان شود. هم‌چنین، این شاخص‌ها به‌عنوان ابزاری برای مقایسه عملکرد سازمان‌ها در مقیاس‌های ملی و بین‌المللی کاربرد داشته و امکان تبادل تجربیات و یادگیری بین سازمانی را فراهم می‌کنند (Shrivastava and Hart, 1995; Lienert et al., 2006).

۳-۳- نقش مشارکت و همکاری‌های چندبخشی

نتایج بررسی ادبیات نشان می‌دهد که مشارکت و همکاری‌های چندبخشی^{۱۹} از ارکان حیاتی حکمرانی مؤثر و پایدار در حوزه آب و فاضلاب به‌شمار می‌آیند. به‌ویژه، توسعه زیرساخت‌های آبی پایدار نیازمند هم‌افزایی میان نهادهای دولتی، بخش خصوصی، سازمان‌های مردم‌نهاد و جوامع محلی است؛ زیرا هیچ‌یک از این بازیگران به‌تنهایی قادر به حل چالش‌های پیچیده و چندبعدی منابع آب نیستند (Tone Tangen Haug et al., 2000).

در چارچوب‌های برنامه‌ریزی نوین مانند مدل A از EPA، بر

تحلیل چندمعیاره و سازوکارهای مشارکتی، برای ارتقای پاسخگویی، شفافیت و اجماع اجتماعی ضروری است (Boss, 2016). در مجموع، تحقق اهداف توسعه پایدار در بخش آب و فاضلاب بدون توجه هم‌زمان به ملاحظات اجرایی، نهادی و اجتماعی امکان‌پذیر نیست. از این رو، تقویت حکمرانی هوشمند، مدیریت مشارکتی و زیرساخت‌های اطلاعاتی و مالی باید در اولویت برنامه‌های اصلاحی قرار گیرد.

۳-۵- ضرورت بومی‌سازی و انعطاف‌پذیری مدل‌ها

مطالعات موردی نشان می‌دهند که موفقیت در پیاده‌سازی مدل‌های توسعه پایدار در بخش آب و فاضلاب، به شدت به قابلیت انطباق و بومی‌سازی ساختار این مدل‌ها با شرایط اقلیمی، اجتماعی و نهادی خاص هر منطقه بستگی دارد. در حالی که یک مدل مفهومی ممکن است از نظر تئوریک جامع باشد، اما بدون در نظر گرفتن واقعیت‌های میدانی، تحقق‌پذیری و اثربخشی آن محدود خواهد شد.

ادبیات بین‌المللی نیز بر این نکته تأکید دارد که مدل‌های پایدارسازی نباید به صورت «نسخه‌ای واحد برای همه»^{۱۸} تجویز شوند؛ بلکه باید با سطوح متفاوتی از انعطاف‌پذیری و پاسخ‌گویی به اولویت‌های محلی طراحی و اجرا شوند (Chang et al., 2014; Capra, 2007). برای مثال، در مناطقی که با تنش آبی مزمن مواجه‌اند (مانند نواحی خشک و نیمه‌خشک)، شاخص‌هایی چون بهره‌وری مصرف آب، استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده، و کاهش آب بدون درآمد باید در کانون توجه برنامه‌های راهبردی قرار گیرند. در مقابل، در مناطقی با آسیب‌پذیری اجتماعی یا محیط‌زیستی بالا، اولویت با شاخص‌هایی چون عدالت در توزیع منابع، تاب‌آوری اجتماعی، و شاخص‌های شمول اجتماعی خواهد بود (Bruzoniti et al., 2024).

مدل مفهومی ارائه‌شده در این پژوهش، به‌ویژه در بخش تعیین شاخص‌ها و اهداف، امکان انتخاب اهداف متناسب با شرایط بومی را فراهم می‌آورد. جدول ۲ (تعیین اهداف) و جدول ۳ (وزن‌دهی اهداف) چگونگی اولویت‌بندی اهدافی چون سلامت عمومی، بهبود محیط‌زیست یا زیست‌پذیری شهری را، براساس چالش‌های منحصربه‌فرد هر سازمان، نشان می‌دهند. همچنین، الگوی انعطاف‌پذیر در تعیین معیارها و سنج‌ها (کیفی یا کمی، مستقیم یا تبدیل‌شده) امکان سازگاری با ظرفیت‌های داده‌ای و مدیریتی موجود در هر سازمان را تسهیل می‌نماید (Chen et al., 2022).

دستیابی به اهداف توسعه پایدار در این بخش امکان‌پذیر نخواهد بود. توصیه می‌شود که برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، توجه ویژه‌ای به نهادینه‌سازی سازوکارهای مشارکتی و تقویت همکاری‌های افقی و عمودی در سیاست‌گذاری آب داشته باشند.

۳-۴- چالش‌ها و ملاحظات اجرایی

مرور ادبیات نشان می‌دهد که اجرای مدل‌های توسعه پایدار در سازمان‌های آب و فاضلاب با چالش‌های ساختاری، نهادی و اجتماعی متعددی مواجه است. مهم‌ترین مانع، ضعف حکمرانی آب است که در قالب نبود پاسخگویی مؤثر، پراکندگی نهادی و ناهماهنگی سیاستی میان دستگاه‌های مسئول بروز می‌یابد. همچنین، محدودیت در شفافیت داده‌ها و دسترسی عمومی به اطلاعات عملکردی، اعتماد اجتماعی را کاهش داده و مقاومت در برابر پروژه‌های سرمایه‌گذاری را افزایش می‌دهد. از این رو، شاخص‌هایی مانند شفافیت داده‌ها، دسترسی عمومی و میزان مشارکت ذی‌نفعان می‌توانند ابزار مناسبی برای ارزیابی حکمرانی توسعه‌گرا باشند (Han, 2015).

از منظر اقتصادی و نهادی، کمبود منابع مالی و ظرفیت فنی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، پایداری اجرای این مدل‌ها را با مشکل مواجه می‌سازد. نرخ پایین بازیابی هزینه و محدودیت در جذب سرمایه‌گذاری بخش خصوصی، از جمله عوامل تهدیدکننده پایداری مالی هستند. در این چارچوب، شاخص‌های نرخ بازیابی هزینه و بهره‌وری هزینه می‌توانند برای سنجش کارایی اقتصادی پروژه‌ها به کار روند (Pralhad, 1990; Silva Munar et al., 2020).

علاوه بر این، ملاحظات فرهنگی و اجتماعی نیز در پذیرش راه‌کارهای نوین مانند بازیافت پساب و بازچرخانی منابع نقش تعیین‌کننده دارند. ضعف آموزش عمومی و ارتباط ناکافی با جامعه، مانع شکل‌گیری پذیرش اجتماعی و مشارکت مؤثر می‌شود. این موضوع در شاخص‌هایی مانند آگاهی عمومی درباره حفاظت از آب و نرخ شمول اجتماعی نیز منعکس شده است (Benn et al., 2006; Brix-Asala et al., 2018).

در بستر ایران، این چالش‌ها با فرسودگی زیرساخت‌ها، محدودیت‌های بودجه‌ای و دشواری هماهنگی بین‌نهادی تشدید می‌شوند. تجربه اتحادیه اروپا نشان می‌دهد که غلبه بر این موانع مستلزم پیوند میان مقررات محیط‌زیستی، شفافیت عملکرد و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نو است. بنابراین، اتخاذ رویکردی سیستمی و بین‌بخشی، همراه با بهره‌گیری از برنامه‌ریزی یکپارچه،

جدول ۲- اهداف و مقصود اهداف چارچوب پیشنهادی (Chen et al., 2022; Brown, 2006)

هدف	مقصود
بهداشت عمومی؛ بهبود سلامت و بهداشت انسان	کاهش سموم و رشد باکتری‌ها (شکوفه‌های جلبکی آب)
نظارت بر منابع عمومی؛ دستیابی به کمترین هزینه چرخه عمر امکان‌پذیر	بهینه‌سازی مقرون‌به‌صرفه استفاده از منابع (کاهش تقاضای انرژی و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر) دستیابی به نتایج عملکردی مناسب با کمترین هزینه ممکن
بهبود محیط‌زیست؛ بهبود شرایط محیطی در جامعه	افزایش فضای سبز طبیعی
زیست‌پذیری؛ تقویت کیفیت زندگی	بهبود زیبایی‌شناسی بهبود دسترسی به فضای سبز و فرصت‌های تفریحی برای ساکنان کم‌درآمد

جدول ۳- تکمیل وزن اهداف

وزن	هدف
۱۰	بهداشت عمومی؛ بهبود سلامت و بهداشت انسان
۸	نظارت بر منابع عمومی؛ دستیابی به کمترین هزینه چرخه عمر امکان‌پذیر
۶	بهبود محیط‌زیست؛ بهبود شرایط محیطی در جامعه
۵	زیست‌پذیری؛ تقویت کیفیت زندگی

خدمات و افزایش بهره‌وری عملیاتی در این نهادها، ظرفیت تقویت تاب‌آوری در سطح نهادی و اجتماعی را از طریق کاهش هزینه‌های چرخه عمر پروژه‌ها، بهبود عملکردهای محیط‌زیستی (مانند کاهش شدت کربن و افزایش بازایافت منابع)، و افزایش رضایت و مشارکت ذی‌نفعان دارد.

مطالعات موردی حاکی از آن است که تلفیق ارزیابی‌های محیط‌زیستی، اجتماعی، اقتصادی و حکمرانی در چارچوب یک مدل امتیازدهی ساختاریافته، به سازمان‌ها این امکان را می‌دهد تا اولویت‌های استراتژیک خود را بر مبنای داده‌های واقعی و مشارکت ذی‌نفعان تعریف کنند. در این میان، استفاده از ابزارهایی نظیر تعیین وزن اهداف، تحلیل گزینه‌ها با سنجه‌های کمی و کیفی، و ارزیابی هزینه-فایده غیرپولی، سهم مهمی در هوشمندسازی فرآیندهای تصمیم‌گیری ایفا می‌کند (Swastomo and Iskandar, 2020).

با این حال، دستیابی به این مزایا، منوط به تقویت سه الزام کلیدی است: ظرفیت‌سازی نهادی و مدیریتی در درون سازمان‌ها (شامل بهبود نظام‌های پاسخگویی، آموزش نیروی انسانی و ارتقای قابلیت‌های فناورانه)؛ افزایش شفافیت اطلاعات و دسترسی عمومی به داده‌های عملکردی، که پیش‌شرط جلب اعتماد و تقویت پاسخگویی اجتماعی است؛ و اتخاذ رویکردهای ترکیبی و زمینه‌محور در تدوین و بومی‌سازی شاخص‌ها، که انعطاف‌پذیری مدل را با واقعیت‌های محلی منطبق سازد. درنهایت، می‌توان اذعان داشت که تنها از مسیر هم‌افزایی میان تحلیل داده‌محور، مشارکت جامعه‌محور، و حکمرانی شفاف و نوآورانه است که

از سوی دیگر، بومی‌سازی نه تنها به معنای ترجمه مفاهیم جهانی به زبان منطقه‌ای است، بلکه مستلزم مشارکت فعال جوامع محلی در طراحی مدل‌ها نیز هست. تعامل مستمر با ذی‌نفعان، دریافت بازخورد در مرحله تعیین اهداف و معیارها، و استفاده از ساختارهایی چون کارگروه‌های مردمی و جلسات مشورتی (مطابق با فرآیند مدل A) از جمله ابزارهایی هستند که به نهادینه‌سازی رویکرد بومی کمک می‌کنند (Cornejo et al., 2016). در مجموع، می‌توان نتیجه‌گرفت که عدم توجه به اقتضائات بومی و تفاوت‌های منطقه‌ای، منجر به ناکارآمدی مدل‌های توسعه پایدار در عمل خواهد شد. بنابراین، طراحی شاخص‌ها، انتخاب پروژه‌های سرمایه‌گذاری، و تنظیم برنامه‌های اقدام باید به‌شکلی منعطف، پویا و زمینه‌محور انجام گیرد تا هم از نظر فنی قابل اجرا و هم از نظر اجتماعی مورد پذیرش باشند. این رویکرد، نه تنها اثربخشی سیاست‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه سرمایه اجتماعی و ظرفیت سازگاری سازمانی را نیز تقویت می‌نماید.

بر مبنای یافته‌های حاصل از بررسی ادبیات و تحلیل مدل‌های مفهومی توسعه پایدار در بخش آب و فاضلاب، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که اتخاذ یک رویکرد جامع، یکپارچه و مشارکتی، متکی بر چارچوب‌های ارزیابی نظام‌مند و ابزارهای تحلیلی چندمعیاره، پیش‌شرط اساسی تحقق اهداف توسعه پایدار در سازمان‌های خدمات‌رسان آب و فاضلاب است. رویکرد مدل مفهومی ارائه شده، برگرفته از مدل «A» سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده (EPA) و با تأکید بر شاخص‌های تلفیقی در نظر گرفته شده است. این مدل، افزون بر ارتقای کیفیت

دستیابی به توسعه پایدار در حوزه حیاتی آب و فاضلاب، از یک ایده آرمانی به یک واقعیت عملی و مؤثر تبدیل خواهد شد.

۴- نتیجه گیری

مرور ادبیات نظری، مطالعات موردی و مدل‌های مفهومی بررسی شده در این پژوهش نشان داد که تحقق توسعه پایدار سازمانی در شرکت‌های آب و فاضلاب، مستلزم رویکردی سیستمی، چندبعدی و بلندمدت است که ابعاد محیط‌زیستی، اقتصادی، اجتماعی و نهادی را به صورت هم‌زمان و یکپارچه در بر گیرد. نتایج مطالعه موردی شرکت آب و فاضلاب مشهد نیز آشکار ساخت که فشارهای ناشی از تغییرات اقلیمی، فرسودگی زیرساخت‌ها، محدودیت منابع مالی و مقاومت‌های فرهنگی، اجرای توسعه پایدار را با پیچیدگی‌های جدی مواجه کرده‌اند؛ از این رو، بدون بازنگری در سیاست‌گذاری، ساختار حکمرانی و فرهنگ سازمانی، دستیابی به پایداری در عمل دشوار خواهد بود. یافته‌های پژوهش بر ضرورت طراحی مدل‌های بومی‌سازی شده و انعطاف‌پذیر تأکید دارد؛ مدلهایی که علاوه بر ملاحظات اقلیمی و اقتصادی، قابلیت تطبیق با شرایط نهادی و مدیریتی هر سازمان را نیز داشته باشند. در این راستا، چارچوب مفهومی ارائه شده در این مطالعه با تأکید بر اهداف چندمعیاره، مشارکت ذی‌نفعان، سنجش‌پذیری شاخص‌ها و بهره‌گیری از ابزارهای تحلیل تصمیم، نسبت به رویکردهای کلی و نسخه‌محور، از ظرفیت بیشتری برای کاربرد در بسترهای محلی برخوردار است. مزیت اصلی این چارچوب، امکان اولویت‌بندی اقدامات براساس شرایط خاص هر سازمان و فراهم کردن مسیر تدریجی اما پایدار برای گذار به وضعیت مطلوب است.

از منظر اجرایی، نتایج پژوهش نشان داد که نهادینه‌سازی توسعه پایدار در شرکت‌های آب و فاضلاب، بدون تحول در فرهنگ سازمانی و الگوهای رهبری، امکان‌پذیر نخواهد بود. تداوم رویکردهای محافظه‌کارانه و سلسله‌مراتبی، یکی از موانع اصلی در مسیر تغییر محسوب می‌شود؛ بنابراین، تقویت رهبری تحول‌گرا، توسعه یادگیری سازمانی، اصلاح سیاست‌های منابع انسانی و گسترش تعاملات میان‌سازمانی از الزامات تحقق پایداری است. تجربه برخی سازمان‌های موفق بین‌المللی نیز نشان می‌دهد که این تحول، هرچند تدریجی و پیچیده، در صورت وجود حمایت مدیریتی، مشارکت ذی‌نفعان و پایش مستمر، دست‌یافتنی است. در مقایسه با مدل‌های متداول موجود، از جمله الگوهای بین‌المللی نظیر EPA و AWWA، چارچوب پیشنهادی این

پژوهش با تأکید بر بومی‌سازی، انعطاف‌پذیری و انطباق با محدودیت‌های واقعی سازمان‌های ایرانی، قابلیت بیشتری برای استفاده در شرایط کشور دارد. این چارچوب می‌تواند به عنوان مبنایی برای تدوین نقشه‌راه توسعه پایدار در شرکت آب و فاضلاب مشهد و دیگر شرکت‌های مشابه در کشور مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی نیز همراه بوده است. اتکای بخشی از تحلیل‌ها به داده‌های در دسترس سازمانی، محدود بودن شواهد کمی در برخی ابعاد، و عدم اجرای میدانی گسترده مدل پیشنهادی از جمله این محدودیت‌ها است. از این رو، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی به آزمون تجربی این چارچوب در سایر شرکت‌های آب و فاضلاب، اعتبارسنجی کمی شاخص‌ها، و بررسی نقش مداخلات آموزشی و فرهنگی در افزایش پذیرش سازمانی آن بپردازند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که توسعه پایدار در صنعت آب و فاضلاب، صرفاً یک مسئله فنی یا مدیریتی نیست، بلکه یک تحول نهادی و فرهنگی است که نیازمند برنامه‌ریزی بومی، حکمرانی مؤثر و مشارکت چندبخشی است. بر این اساس، چارچوب پیشنهادی می‌تواند مبنای مناسبی برای ارتقای عملکرد پایدار شرکت‌های آب و فاضلاب در مشهد و سایر شهرها و استان‌های کشور باشد.

۵- تشکر و قدردانی

بدین وسیله از دفتر توسعه پایدار شرکت آب و فاضلاب مشهد که تأمین مالی و حمایت‌های لازم برای انجام این پژوهش و نگارش مقاله را بر عهده داشتند، صمیمانه قدردانی می‌شود. شایان ذکر است که در مطالعه حاضر از ابزارهای هوش مصنوعی صرفاً در برای بررسی نگارش و روان‌سازی جملات استفاده شده است و تمامی محتوای علمی، تحلیلی و استنتاجی این مقاله برعهده نویسندگان بوده و تحت نظارت و تأیید نهایی ایشان انجام پذیرفته است.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Sustainable Development Goals
- 2- Global Warming Potential
- 3- Food and Agriculture Organization
- 4- Balanced Scorecard
- 5- American Water Works Association
- 6- Aspen
- 7- Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA
- 8- Life Cycle Cost Analysis
- 9- Full Cost Accounting
- 10- Divisia
- 11- Key Performance Indicator

- College Cork, Cork, 6-8 April 2011, University College Cork, Environmental Protection Agency, and Environmental Sciences Association of Ireland, <https://hdl.handle.net/10468/1981>
- Brix-Asala, C., Geisbüsch, A.K., Sauer, P.C., Schöpflin, P., and Zehendner, A., (2018), "Sustainability tensions in supply chains: A case study of paradoxes and their management", *Sustainability*, 10(2), 424, <https://doi.org/10.3390/su10020424>
- Brown, B., (2006), "Sustainability", In: *What Drives Global Capital Flows? Myth, Speculation and Currency Diplomacy*, Palgrave Macmillan, London, 120-145, https://doi.org/10.1057/9780230627291_5
- Bruzzoniti, M.C., Del Bubba, M., Giordani, E., Fibbi, D., Beldean-Galea, M.S., Piesik, D., and Rivoira, L., (2024), "Organic micropollutants in the agricultural chain of production of strawberries by irrigation with treated wastewater and assessment of human health implications", *Water*, 16(6), 830, <https://doi.org/10.3390/w16060830>
- Bui, H., (2022), "Determinant factors of information disclosure on sustainability reporting in Vietnam", In: *No Question: Sustainability is Everyone's Business V. BBS International Sustainability Student Conference Proceedings*, Budapesti Gazdasági Egyetem, Budapest, Magyarország, 58-69, https://doi.org/10.29180/9786156342386_4
- Capra, F., (2007), "Sustainable living, ecological literacy, and the breath of life", *Canadian Journal of Environmental Education*, 12(1), 9-18, <https://cjee.lakeheadu.ca/article/view/624/507>
- Chang, C., Meng, H., DiGiovanni, K., Yang, X., Peng, Y., and Zhao, W., (2014), "Sustainability", *Water Environment Research*, WEF, 86(10), 1354-1386, https://doi.org/10.2175/106143014X1403128066789_5
- Chen, S., Zhang, L., Liu, B., Yi, H., Su, H., Kharrazi, A., Jiang, F., Lu, Z., Crittenden, J., and Chen, B., (2022), "Decoupling climate impact of wastewater infrastructure and water stress alleviation across 300 cities in China is challenging yet plausible by 2030", *Research Square*, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1937527/v1>
- Denison, D.R., Hart, S.L., and Kahn, J.A., (1996), "From chimneys to cross-functional teams: Developing and validating a diagnostic model", *Academy of Management Journal*, 39(4), 1005-1023, <https://doi.org/10.5465/256721>
- Elias, J., (2013), "Davos woman to the rescue of global capitalism: Postfeminist politics and competitiveness promotion at the World Economic Forum", *International Political Sociology*, 7(2), 152-169, <https://doi.org/10.1111/ips.12015>
- Ermilio, J., Pattison, I., and Sohail, M., (2022), "Performance monitoring and sustainable management of piped water supply infrastructure in developing communities", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(2), 05021030, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001470](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001470)
- Evaristo, J., Jameel, Y., Tortajada, C., Wang, R.Y., 12- Environmental Protection Agency
- 13- Renewable Energy Utilization Index
- 14- Cross-Sectoral Collaborations
- 15- WOPs: Water Operators' Partnerships
- 16- UN-Habitat
- 17- Nexus
- 18- One-Size-Fits-All
- ۷- مراجع
- اسلامی، ر.، و رحیمی، ع.، (۱۳۹۸)، "سیاست‌گذاری و بحران آب در ایران"، *سیاست‌های استراتژیک و کلان*، (۲۷)، ۴۱۰-۴۳۵، <https://doi.org/10.32598/JMSP.7.3.5>
- داوری، ک.، (۱۴۰۳)، *مدیریت آب (منابع و کاربردها)*، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد، https://jwsd.um.ac.ir/article_45437_7da4bb9a854153bc85d8b3c92ee938b2.pdf
- شفیعی، م.، مجیدی، م.، جودوی، ع.، سلیمانیها، س.، و پشتوان، ح.، (۱۳۹۸)، "پیش‌درآمدی بر سیمپوزیوم ملی مسائل حل‌نشده بیان آب کشور: لزوم مشارکت و هم‌افزایی در علاج‌بخشی مهم‌ترین مولفه برنامه‌ریزی منابع آب ایران"، *فصلنامه آب و توسعه پایدار*، (۲)۶، ۸۳-۸۶، https://jwsd.um.ac.ir/article_31752_5088383c91866b04ecbdacfdc67a36fa.pdf
- فیضی کوشکی، ف.، اکبری، م.، معاریان، ح.، و اعظمی راد، م.، (۱۳۹۸)، "شناسایی و رتبه‌بندی عوامل عمده بیابان‌زایی در استان خراسان رضوی به‌روش دلفی"، *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، (۸)۳۱، ۲۰۵-۲۲۵، <https://www.noormags.ir/view/en/articlepage/1684699>
- متحد، س. م.، و پشتوان، ح.، (۱۳۹۶)، *رهنمودهای برنامه‌ریزی و مدیریت استراتژیک منابع آب*، کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، <https://db.ketab.ir/bookview.aspx?bookid=2172809>
- Akins II, E.E., Giddens, E., Glassmeyer, D., Gruss, A., Kalamas Hedden, M., Slinger-Friedman, V., and Weand, M., (2019), "Sustainability education and organizational change: A critical case study of Barriers and Change Drivers at a higher education institution", *Sustainability*, 11(2), 501, <https://doi.org/10.3390/su11020501>
- Allègre, G., (2019), "Social sustainability: From SDGs to policies", *OFCE Policy Brief*, 50, 1-11, <https://sciencespo.hal.science/hal-03403311v1>
- Benn, S., Dunphy, D., and Griffiths, A., (2006), "Enabling change for corporate sustainability: An integrated perspective", *Australasian Journal of Environmental Management*, 13(3), 156-165, <https://doi.org/10.1080/14486563.2006.10648683>
- Bolger, P., (Ed.), (2011), *ENVIRON 2011: 21st Irish Environmental Researchers Colloquium*, University

- 393(3), 219-232, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.08.017>
- Hua, M., McCauley, K., Brew, D., Heywood, J., Siracusa, J., Stevens, M., and Paustenbach, D., (2025), "United States Environmental Protection Agency's perfluorooctanoic acid, perfluorooctane sulfonic acid, and related per- and polyfluoroalkyl substances 2024 drinking water maximum contaminant level: Part 1 – Analysis of public comments", *Critical Reviews in Toxicology*, 55(3), 321-367, <https://doi.org/10.1080/10408444.2024.2415893>
- Kazora, A.S., and Mourad, K.A., (2018), "Assessing the national sanitation policy in Rwanda", *Review of Environment and Earth Sciences*, 5(2), 55-63, <https://doi.org/10.18488/journal.80.2018.52.55.63>
- Klassen, R.D., and Whybark, D.C., (1999), "Environmental management in operations: The selection of environmental technologies", *Decision Sciences*, 30(3), 601-631, <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1999.tb00900.x>
- Küçükoğlu, M.T., and Pınar, R.İ., (2018), "The mediating role of green organizational culture between sustainability and green innovation: A research in Turkish companies", *Business and Management Studies: An International Journal*, 6(1), 64-85, <https://doi.org/10.15295/bmij.v6i1.208>
- Kunjo, I., Chan, S., and Sulaiman, S., (2024), "Examining the interplay between employment capability development, organization culture, and organizational IT adaptability in shaping organizational commitment and performance in the Gambia National Water and Electricity Company (NAWEC)", *Journal of Economics Finance and Management Studies*, 7(11), 6573-6588 <https://doi.org/10.47191/jefms/v7-i11-30>
- Landis, A.E., (2015), "The state of water/wastewater utility sustainability: A North American survey", *Journal of American Water Works Association*, 107(9), E464-E473, <https://doi.org/10.5942/jawwa.2015.107.0125>
- Larsen, T., Hoffmann, S., Lüthi, C., Truffer, B., and Maurer, M., (2016), "Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world", *Science*, 352(6288), 928-933, <https://doi.org/10.1126/science.aad8641>
- Lienert, J., Monstadt, J., and Truffer, B., (2006), "Future scenarios for a sustainable water sector: A case study from Switzerland", *Environmental Science & Technology*, 40(2), 436-442, <https://doi.org/10.1021/es051254p>
- Luck, S.J., Woodman, G.F., and Vogel, E.K., (2000), "Event-related potential studies of attention", *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 432-440, [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01545-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01545-X)
- Ma, X., Xue, X., González-Mejía, A., Garland, J., and Cashdollar, J., (2015), "Sustainable water systems for the city of tomorrow: A conceptual framework", *Sustainability*, 7(9), 12071-12105, <https://doi.org/10.3390/su70912071>
- Martin, J., and Carter, L., (2015), "Preservice teacher agency concerning education for sustainability (EfS): A discursive psychological approach", *Journal of*
- Horne, J., Neukrug, H., David, C.P., Fasnacht, A.M., Ziegler, A.D., and Biswas, A., (2023), "Water woes: The institutional challenges in achieving SDG 6", *Sustainable Earth Reviews*, 6(1), 13, <https://doi.org/10.1186/s42055-023-00067-2>
- Farsari, I., and Prastacos, P., (2002), "Sustainable development indicators: An overview", In: *Sustainable Development for the Islands of Europe: Energy, Environment and Socio-Economic Policy*, Springer, Dordrecht, 15-36, https://doi.org/10.1007/978-94-011-3246-6_1
- Giannetti, B.F., Sevegnani, F., García, R.R., Agostinho, F., Almeida, C.M., Coscieme, L., Liu, G., and Lombardi, G.V., (2022), "Enhancing the assessment of cleaner production practices for sustainable development: The five-sector sustainability model applied to water and wastewater treatment companies", *Sustainability*, 14(7), 4126, <https://doi.org/10.3390/su14074126>
- Giri, R., Ozaki, H., and Takeuchi, J., (2006), "An alternative for sustainable domestic wastewater treatment in Bangkok", *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 3(1), 77-82, https://doi.org/10.3233/AJW-2006-3_1_10
- Hammer, M., (2007), "The process audit", *Harvard Business Review*, 85(4), 111-123, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17432158/>
- Han, H., (2015), "Travelers' pro-environmental behavior in a green lodging context: Converging value-belief-norm theory and the theory of planned behavior", *Tourism Management*, 47, 164-177, <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2014.09.014>
- Han, H., Lee, M.J., and Kim, W., (2018), "Antecedents of green loyalty in the cruise industry: Sustainable development and environmental management", *Business Strategy and the Environment*, 27(3), 323-335, <https://doi.org/10.1002/bse.2001>
- Hart, M., (1999), *Guide to Sustainable Community Indicators*, 2nd Edition, Sustainable Measures, North Andover, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:127326058>
- Hartley, J., Benington, J., and Binns, P., (1997), "Researching the roles of internal-change agents in the management of organizational change", *British Journal of Management*, 8(1), 61-73, <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00036>
- Haug, T.T., Hellström, K., Blomhoff, S., Humble, M., Madsbu, H.-P., and Wold, J.E., (2000), "The treatment of social phobia in general practice. Is exposure therapy feasible?", *Family Practice*, 17(2), 114-118, <https://doi.org/10.1093/fampra/17.2.114>
- Herrick, C., Pratt, J., Surbaugh, H., Grumbles, B., Loken, L., and Abhold, K., (2013), *Changing organizational culture to promote sustainable water operations: A guidebook for water utility sustainability champions*, Water Research Foundation, <https://doi.org/10.13140/2.1.3932.6087>
- Hu, Y., Moiwo, J.P., Yang, Y., Han, S., and Yang, Y., (2010), "Agricultural water-saving and sustainable groundwater management in Shijiazhuang Irrigation District, North China Plain", *Journal of Hydrology*,

- 102014, <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2026.102014>
- Oerther, D.B., Chin, D.A., and Vaccari, D.A., (2022), "Updating the environmental engineering body of knowledge", *Journal of Environmental Engineering*, 148(3), 02522001, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001973](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001973)
- Omohwovo, E.J., (2024), "Wastewater management in Africa: Challenges and recommendations", *Environmental Health Insights*, 18, 11786302241289681, <https://doi.org/10.1177/11786302241289681>
- Oxtoby, B., McGuinness, T., and Morgan, R.E., (2002), "Developing organizational change capability", *European Management Journal*, 20(3), 310-320, [https://doi.org/10.1016/S0263-2373\(02\)00050-4](https://doi.org/10.1016/S0263-2373(02)00050-4)
- Özerol, G., Dolman, N., Bormann, H., Bressers, H., Lulofs, K., and Böge, M., (2020), "Urban water management and climate change adaptation: A self-assessment study by seven midsize cities in the North Sea Region", *Sustainable Cities and Society*, 55, 102066, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102066>
- Pahl-Wostl, C., Craps, M., Dewulf, A., Mostert, E., Tabara, D., and Taillieu, T., (2007), "Social learning and water resources management", *Ecology and Society*, 12(2), 5, <https://doi.org/10.5751/ES-02037-120205>
- Parkinson, S., Krey, V., Huppmann, D., Kahil, T., McCollum, D., Fricko, O., Byers, E., Gidden, M., Johnson, N., Rao, N.D., Bosetti, V., and Riahi, K., (2019), "Balancing clean water-climate change mitigation trade-offs", *Environmental Research Letters*, 14(1), 014009, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf2a3>
- Permana, R., (2020), "Impact of organizational culture on organizational commitment: A study of banking companies in Indonesia", *Journal of Applied Management and Entrepreneurship*, 22(3), 59-72, <https://doi.org/10.32424/1.jame.2020.22.3.3147>
- Pizzi, S., Caputo, A., and Corvino, A., (2020), "Management research and the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs): A bibliometric investigation and systematic review", *Journal of Cleaner Production*, 276, 124033, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124033>
- Poole, M.S., and Van de Ven, A.H., (1989), "Using paradox to build management and organization theories", *Academy of Management Review*, 14(4), 562-578, <https://doi.org/10.2307/258559>
- Prahalad, C.K., and Hamel, G., (2006), "The core competence of the corporation", In: *Hahn, D., and Taylor, B. (eds), Strategische Unternehmensplanung — Strategische Unternehmensführung*, Springer, Berlin, Heidelberg, https://doi.org/10.1007/3-540-30763-X_14
- Sajadifar, S., Farajollahi, A., Mogouie, H., and Nimjerdi, A.H., (2025), "A combination of balanced scorecard, system dynamics and game theory to design performance measurement system", *Journal of Optimization and Supply Chain Management*, 2(1), 16-32, <https://doi.org/10.22034/ISS.2025.8601.1021>
- Research in Science Teaching*, 52(4), 560-573, <https://doi.org/10.1002/tea.21217>
- Mays, J.M., (2006), "Feminist disability theory: Domestic violence against women with a disability", *Disability & Society*, 21(2), 147-158, <https://doi.org/10.1080/09687590500498077>
- Miles, K., (2011), "Embedding gender in sustainability reports", *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, 2(1), 139-146, <https://doi.org/10.1108/20408021111162164>
- Miličević, D., Miličević, M., and Trajković, R., (2024), "Decentralized wastewater treatment - A sustainable solution for protecting water resources from pollution", *Journal of the Faculty of Civil Engineering and Architecture*, 39(1), 35-46, <https://doi.org/10.62683/zrgaf39.35-46>
- Milman, A., and Short, A., (2008), "Incorporating resilience into sustainability indicators: An example for the urban water sector", *Global Environmental Change*, 18(4), 758-767, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.08.002>
- Mirdashtvan, M., Najafinejad, A., Malekian, A., and Sabetraftar, K., (2021), "Sustainable water supply and demand management in semi-arid regions: Optimizing water resources allocation based on RCPs scenarios", *Water Resources Management*, 35, 5307-5324, <https://doi.org/10.1007/s11269-021-03004-0>
- Najam, A., (2005), "Developing countries and global environmental governance: From contestation to participation to engagement", *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 5(3), 303-321, <https://doi.org/10.1007/s10784-005-3807-6>
- Nath, S., (2024), "Electrochemical wastewater treatment technologies through life cycle assessment: A review", *ChemBioEng Reviews*, 11(4), e202400016, <https://doi.org/10.1002/cben.202400016>
- National Research Council, Global Affairs, Technology for Sustainability Program, and Committee on Incorporating Sustainability in the United States Environmental Protection Agency, (2011), *Sustainability and the United States Environmental Protection Agency*, National Academies Press, <https://www.nationalacademies.org/read/13152>
- Nimjerdi, A., Sajadifar, S., Toopkanloo, M., Jafari, S., Shamloei, A., and Sami, A., (2026), "The impact of business model innovation on productivity in Iranian water and wastewater companies", *World Water Policy*, 12(1), e70056, <https://doi.org/10.1002/wwp2.70056>
- Nimjerdi, A.H., (2026), "The impact of open innovation on municipal waste recycling rate and resource productivity in the European Union countries: The moderating role of environmental regulations", *Sustainable Environment*, 12(1), <https://doi.org/10.1080/27658511.2026.2655489>
- Nimjerdi, A.H., Rahsepar, M., Morshedi Ghaziani, M., and Sajadifar, S., (2026), "The impact of the European Union 2030 Climate and Energy Framework on the ecological footprint: The moderating role of green technology innovation", *Sustainable Futures*, 12,

- of lower-tier suppliers: Managing sustainability in supply networks", *Journal of Operations Management*, 64, 65-87, <https://doi.org/10.1016/j.jom.2018.09.004>
- Vogel, C., Moser, S.C., Kasperson, R.E., and Dabelko, G.D., (2007), "Linking vulnerability, adaptation, and resilience science to practice: Pathways, players, and partnerships", *Global Environmental Change*, 17(3-4), 349-364, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2007.05.002>
- Walters, J., and Javernick-Will, A., (2015), "Long-term functionality of rural water services in developing countries: A system dynamics approach to understanding the dynamic interaction of factors", *Environmental Science & Technology*, 49(8), 5035-5043, <https://doi.org/10.1021/es505975h>
- Wang, X., Daigger, G., Lee, D., Liu, J., Ren, N., Qu, J., Sloey, W., and Butler, D., (2018), "Evolving wastewater infrastructure paradigm to enhance harmony with nature", *Science Advances*, 4(8), eaq0210, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aag0210>
- Wilby, R.L., and Vaughan, K., (2011), "Hallmarks of organizations that are adapting to climate change", *Water and Environment Journal*, 25(2), 271-281, <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2010.00220.x>
- Wu, Z., and Pagell, M., (2011), "Balancing priorities: Decision-making in sustainable supply chain management", *Journal of Operations Management*, 29(6), 577-590, <https://doi.org/10.1016/j.jom.2010.10.001>
- Xiang, X., Li, Q., Khan, S., and Khalaf, O.I., (2021), "Urban water resource management for sustainable environment planning using artificial intelligence techniques", *Environmental Impact Assessment Review*, 86, 106515, <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106515>
- Yulistiyorini, A., Rosyid, H., Haratama, K., Rousseau, D., and Ansyorie, M., (2022), "Raising environmental awareness in Kampong Tridi and Kampong Warna-Warni (Malang, Indonesia) through digital-based workshop on constructed wetlands", *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 8(2), 65, <https://doi.org/10.22146/jpkm.54607>
- Zhang, B., and Chen, G.Q., (2010), "Physical sustainability assessment for the China society: Exergy-based systems account for resources use and environmental emissions", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(6), 1527-1545, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.021>
- Zheng, W., Yang, B., and McLean, G.N., (2010), "Linking organizational culture, structure, strategy, and organizational effectiveness: Mediating role of knowledge management", *Journal of Business Research*, 63(7), 763-771, <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2009.06.005>
- Saravanan, A., Kumar, P.S., Jeevanantham, S., Karishma, S., Tajsabreen, B., Yaashikaa, P.R., and Reshma, B., (2021), "Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development", *Chemosphere*, 280, 130595, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130595>
- Schein, E.H., (1984), "Coming to a new awareness of organizational culture", *Sloan Management Review*, 25(2), 3-16, <https://sloanreview.mit.edu/article/coming-to-a-new-awareness-of-organizational-culture/>
- Shrivastava, P., and Hart, S., (1995), "Creating sustainable corporations", *Business Strategy and the Environment*, 4(3), 154-165, <https://doi.org/10.1002/bse.3280040307>
- Siebenhüner, B., and Arnold, M., (2007), "Organizational learning to manage sustainable development", *Business Strategy and the Environment*, 16(5), 339-353, <https://doi.org/10.1002/bse.579>
- Silva Munar, J.L., De Juana-Espinosa, S., Martínez-Buelvas, L., Vecchiola Abarca, Y., and Orellana Tirado, J., (2020), "Organizational happiness dimensions as a contribution to Sustainable Development Goals: A prospective study in higher education institutions in Chile, Colombia and Spain", *Sustainability*, 12(24), 10502, <https://doi.org/10.3390/su122410502>
- Smith, W.K., Lewis, M.W., and Tushman, M.L., (2011), "Organizational sustainability: Organization design and senior leadership to enable strategic paradox", In: Spreitzer, G.M., and Cameron, K.S. (eds), *The Oxford Handbook of Positive Organizational Scholarship*, Oxford University Press, Oxford, <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199734610.013.0061>
- Sun, Y., Gao, P., Tian, W., and Guan, W., (2023), "Green innovation for resource efficiency and sustainability: Empirical analysis and policy", *Resources Policy*, 81, 103369, <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103369>
- Swastomo, A., and Iskandar, D., (2020), "Keberlanjutan sistem penyediaan air minum berbasis masyarakat Desa Piji dan Desa Gintungan di Kabupaten Purworejo", *Jurnal Planoearth*, 5(1), 7, <https://doi.org/10.31764/jpe.v5i1.1631>
- Tachizawa, E.M., and Wong, C.Y., (2014), "Towards a theory of multi-tier sustainable supply chains: A systematic literature review", *Supply Chain Management: An International Journal*, 19(5/6), 643-663, <https://doi.org/10.1108/SCM-02-2014-0070>
- Tortajada, C., (2020), "Contributions of recycled wastewater to clean water and sanitation Sustainable Development Goals", *NPJ Clean Water*, 3(1), 22, <https://doi.org/10.1038/s41545-020-0069-3>
- van Leeuwen, C.J., Frijns, J., van Wezel, A., and van de Ven, F.H.M., (2012), "City Blueprints: 24 indicators to assess the sustainability of the urban water cycle", *Water Resources Management*, 26(8), 2177-2197, <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0009-1>
- Villena, V.H., and Gioia, D.A., (2018), "On the riskiness



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

Content Analysis of Written Messages on Water Demand Management in Tehran: Persuasive Techniques, Framing, and Actionability

Zahra Mehri^{1*}, Bagher Sarukhani², Yousef Khojir³ and Omidali Masoudi²

1- Ph.D. Candidate in Communication Sciences, Faculty of Culture and Communication, Soore International University, Tehran, Iran.

2- Professor, Department of Communication, Faculty of Culture and Communication, Soore International University, Tehran, Iran.

3- Associate Professor, Department of Communication, Faculty of Culture and Communication, Soore International University, Tehran, Iran.

* Corresponding Author, Email: zmehri1988@gmail.com

Received: 05/06/2026

Revised: 25/07/2026

Accepted: 25/08/2026

© IWWA

Abstract

Water demand management requires not only technical and economic interventions but also communication that makes scarcity meaningful and specifies feasible actions. Using quantitative content analysis, this study examined 160 written water-management messages disseminated in Tehran from 2017 to 2026. Messages were coded by year, length, platform, content type and tone, dominant persuasive technique, framing, and actionability. Descriptive statistics, chi-square tests, Cramer's V, and binary logistic regression were used. 20% of the corpus was independently recoded, yielding 85% simple agreement. Results showed that 34.4% of messages belonged to 2026, 66.2% contained no more than ten words, and 70.6% were disseminated through outdoor media. Moreover, 29.4% lacked a clear technique and 56.9% lacked identifiable framing. Numerical evidence was the most frequent technique, followed by warning; direct practical guidance was dominant in only 4.4% of messages. The adjusted model was significant: messages from 2026 had higher odds of containing a clear technique (OR = 6.29), while an identifiable content formulation or tone was associated with lower odds (OR = 0.44); length and platform were not significant. The findings reveal a gap between message visibility and actionable behavior and concern textual persuasive capacity rather than demonstrated behavioral effects.

Keywords: Behavioral communication; Outdoor advertising; Self-efficacy; Source credibility; Social norms.

تحلیل محتوای پیام‌های نوشتاری مدیریت مصرف آب تهران: تکنیک‌های اقناعی، قاب‌بندی و راه‌کارمحوری

زهرا مهری^{۱*}، باقر ساروخانی^۲، یوسف خجیر^۳ و امیدعلی مسعودی^۲

۱- دانشجوی دکتری رشته علوم ارتباطات، دانشکده فرهنگ و ارتباطات، دانشگاه بین‌المللی سوره، تهران، ایران.

۲- استاد، گروه ارتباطات، دانشکده فرهنگ و ارتباطات، دانشگاه بین‌المللی سوره، تهران، ایران.

۳- دانشیار، گروه ارتباطات، دانشکده فرهنگ و ارتباطات، دانشگاه بین‌المللی سوره، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول، ایمیل: zmehri1988@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۵/۰۵/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۳

© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

مدیریت تقاضای آب، افزون بر مداخلات فنی و اقتصادی، به پیام‌هایی نیاز دارد که کم‌آبی را معنادار و رفتارهای قابل‌انجام را روشن کنند. این پژوهش با تحلیل محتوای کمی، معماری ۱۶۰ پیام مدیریت مصرف آب تهران طی ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴ را بررسی کرد. پیام‌ها براساس سال، طول، بستر، نوع محتوا و لحن، تکنیک اقناعی غالب، قاب‌بندی و راه‌کارمحوری کدگذاری شدند. داده‌ها با آمار توصیفی، آزمون خی‌دو، V کرامر و رگرسیون لجستیک تحلیل شدند. برای پایایی، ۲۰٪ پیکره بازکدگذاری شد و توافق بین کدگذاران ۸۵٪ بود. یافته‌ها نشان داد ۳۴/۴٪ پیام‌ها متعلق به سال ۱۴۰۴، ۶۶/۲٪ حداکثر ده‌واژه‌ای و ۷۰/۶٪ محیطی بودند. ۲۹/۴٪ فاقد تکنیک روشن و ۵۶/۹٪ فاقد قاب‌بندی قابل تشخیص بودند. عدد و داده و سپس هشدار، تکنیک‌های غالب بودند؛ راه‌کار عملی مستقیم فقط در ۴/۴٪ پیام‌ها تکنیک غالب بود. مدل تعدیل‌شده معنادار بود؛ پیام‌های سال ۱۴۰۴ شانس برخورداری از تکنیک روشن را افزایش دادند (نسبت شانس = ۶/۲۹)، صورت‌بندی محتوایی یا لحن غالب با کاهش این شانس همراه بود (نسبت شانس = ۰/۴۴) و طول و بستر معنادار نبودند. نتایج از شکاف میان دیده‌شدن پیام و صورت‌بندی رفتار حکایت دارد و ناظر بر ظرفیت درون‌متنی پیام‌ها است، نه اثبات تغییر رفتار.

کلیدواژه‌ها: ارتباطات رفتاری؛ تبلیغات محیطی؛ خودکارآمدی؛ اعتبار منبع؛ هنجار اجتماعی.

اقتصادی، ضرورت استفاده از آن‌ها در کنار مداخلات مکمل مدیریت تقاضا را برجسته می‌کند. سیاست مدیریت مصرف زمانی جامع‌تر خواهد بود که ابزارهای فنی و اقتصادی را با مداخلاتی پیوند دهد که ادراک، انگیزه، هنجار و رفتار روزمره مصرف‌کنندگان را نیز هدف قرار می‌دهند.

در بعد فنی نیز جهانگیری (۱۳۹۸) با استفاده از تصمیم‌گیری چندشاخصه رتبه‌بندی راهبردهای مدیریت مصرف در شبکه‌های توزیع آب شرب را انجام داد تا تعادلی منطقی میان عرضه و تقاضا برقرار شود. یافته‌های این پژوهش نشان داد در میان راهبردهای بررسی‌شده، به‌کارگیری ابزارهای کاهنده مصرف در مناطق روستایی استان مرکزی، بهترین راهبرد برای کاهش مصرف آب شرب است. بر همین اساس، توزیع گسترده این ابزارها همراه با آموزش‌های لازم به‌عنوان راهبردی عملی و اجراپذیر توصیه شده است.

مصرف آب خانگی حاصل مجموعه‌ای از تصمیم‌های خرد، عادت‌های تکرارشونده، برداشت‌های ذهنی، هنجارهای خانوادگی و اجتماعی، اعتماد به توصیه‌ها و ادراک فرد از امکان اثرگذاری خویش است. مدل‌های رفتار مصرف آب نشان می‌دهند که تصمیم‌خانواری فقط تابع قیمت یا درآمد نیست، بلکه نگرش، عادت، هنجار اجتماعی، ادراک عدالت و شرایط زمینه‌ای نیز در آن نقش دارند (Jorgensen et al., 2009; Russell and Fielding, 2010). نظریه رفتار برنامه‌ریزی‌شده نیز بیان می‌کند که قصد انجام رفتار از تعامل نگرش نسبت به رفتار، هنجارهای ذهنی و کنترل رفتاری ادراک‌شده شکل می‌گیرد؛ یعنی فرد باید رفتار را مطلوب بداند، همراهی یا تأیید دیگران را ادراک کند و انجام آن را در توان خود ببیند (Ajzen, 1991). بر این اساس، پیامی که فقط وجود کم‌آبی را اعلام کند، اما رفتار قابل‌انجام، امکان اثرگذاری و نسبت میان کنش فردی و نتیجه جمعی را روشن نسازد، ظرفیت محدودی برای جهت‌دهی رفتاری خواهد داشت.

پیام‌های نوشتاری مدیریت مصرف آب در این میان اهمیت ویژه‌ای دارند. پیام‌های کوتاه محیطی، شهری، دیجیتال و رسانه‌ای به‌دلیل قابلیت تکرار، هزینه نسبتاً کمتر، حضور در مسیرهای روزمره شهروندان و امکان ساده‌سازی مفاهیم پیچیده، از ابزارهای متداول روابط عمومی و مدیریت تقاضا به‌شمار می‌روند. با این حال، فراوانی یا دیده‌شدن پیام الزاماً به معنای برخورداری آن از ساختار اقناعی منسجم نیست. یک پیام ممکن است دیده‌شود، اما به‌درستی فهم نشود؛ فهمیده شود، اما جدی گرفته نشود؛ یا جدی تلقی شود، بی‌آن‌که رفتار مشخصی را پیش روی مخاطب قرار دهد. از این‌رو، میان «حضور رسانه‌ای پیام» و «ظرفیت آن برای هدایت مخاطب به کنش» باید تمایز گذاشت.

آب در مدیریت شهری معاصر صرفاً خدمتی زیربنایی نیست، بلکه با پایداری شهر، امنیت خدمات عمومی، سلامت، تاب‌آوری اجتماعی و کیفیت حکمرانی شهری پیوند دارد. در کلان‌شهری مانند تهران، تمرکز جمعیت و فعالیت‌های اداری و اقتصادی، گسترش سکونت شهری، فشار بر شبکه تأمین و توزیع و تنوع الگوهای مصرف خانگی، مدیریت آب را به مسئله‌ای چندبعدی تبدیل کرده است. از این‌رو، مواجهه با محدودیت منابع آب نمی‌تواند به توسعه منابع، اصلاح شبکه، کنترل فشار یا دیگر مداخلات فنی محدود بماند. گزارش توسعه جهانی آب سازمان ملل متحد نیز بر پیوند آب با توسعه پایدار، رفاه، همکاری اجتماعی و ظرفیت حکمرانی تأکید می‌کند و نشان می‌دهد مدیریت آب، افزون بر ابعاد فنی، به کیفیت تصمیم‌گیری و مشارکت اجتماعی وابسته است (UN-Water, 2024). شواهد داخلی نیز این پیوند را تأیید می‌کنند؛ برای نمونه، رضائی (۱۴۰۱) با روش پژوهش اسنادی نشان داد بحران آب را می‌توان بازتابی از تعارض میان منافع فردی کوتاه‌مدت و منافع جمعی بلندمدت در بهره‌برداری از منابع مشترک دانست و عواملی مانند آموزش، اعتماد، تعهد اخلاقی، برقراری ارتباطات، و مشوق‌ها و تحریم‌های اجتماعی را در شکل‌گیری رفتار همیارانه برای حفاظت از آب مؤثر معرفی کرد. این چارچوب نشان می‌دهد که تغییر رفتار مصرف‌کنندگان صرفاً از مسیر اطلاع‌رسانی صرف حاصل نمی‌شود، بلکه به طراحی پیام‌هایی نیاز دارد که اعتماد، تعهد اخلاقی و هنجار جمعی را نیز هدف قرار دهند. همچنین توحیدی و همکاران (۱۴۰۲) با مطالعه حوضه زاینده‌رود نشان دادند که کم‌آبی در ایران به شکل‌گیری نظامی از مدیریت آب انجامیده که برآمده از تعامل مشروعیت سیاسی و مقبولیت اجتماعی است در چنین شرایطی، مدیریت تقاضا بخشی اساسی از راهبرد پایداری آب شهری به شمار می‌آید.

مدیریت تقاضای آب مجموعه‌ای از ابزارهای فنی، اقتصادی، تعرفه‌ای، آموزشی و ارتباطی را در بر می‌گیرد. پژوهش‌های داخلی نیز نشان داده‌اند که ویژگی‌های خانوار، آگاهی، انگیزه مصرف، استفاده از ابزارهای کاهنده، آموزش، تبلیغات و قیمت‌گذاری در شکل‌گیری الگوی مصرف آب خانگی نقش دارند (داداشی دیوکلاپی و همکاران، ۱۴۰۰). در بعد اقتصادی، سجادی‌فر و خیابانی (۱۳۹۰) با برآورد تابع تقاضای آب خانگی در شهر اراک نشان دادند که تقاضا نسبت به قیمت و درآمد کم‌کشش است و کشش‌های بلندمدت و تابستانی از کشش‌های کوتاه‌مدت و زمستانی بیشتر است. این یافته، ضمن تأیید جایگاه ابزارهای

۱۴۰۴ با روش تحلیل محتوای کمی بررسی می‌کند. پرسش اصلی آن است که این پیام‌ها از نظر ویژگی‌های شکلی، رسانه‌ای و اقناعی چه الگویی دارند و چه روابطی میان دوره انتشار، طول، بستر، لحن، تکنیک اقناعی و قاب‌بندی آن‌ها مشاهده می‌شود. هدف، ارائه تصویری تجربی از معماری پیام‌های موجود و شناسایی فاصله میان پیامی است که صرفاً در معرض دید قرار می‌گیرد و پیامی که رفتار روشن و قابل‌انجامی را صورت‌بندی می‌کند.

دامنه استنباط پژوهش به ویژگی‌های قابل مشاهده پیام‌ها محدود است. این مقاله اثر واقعی پیام‌ها بر نگرش شهروندان، قصد رفتاری یا میزان مصرف آب را اندازه‌گیری نمی‌کند؛ زیرا اثبات چنین اثری به داده‌های مصرف، پیمایش مخاطبان یا طراحی‌های آزمایشی و مداخله‌ای نیاز دارد. آنچه بررسی می‌شود، ساختار درون‌متنی و رسانه‌ای پیام‌ها و ظرفیت بالقوه آن‌ها برای اقناع و جهت‌دهی رفتاری است. این مرزبندی، امکان می‌دهد یافته‌ها بدون نسبت‌دادن پیامدهای اثبات‌نشده به پیام‌ها، مبنایی برای ارزیابی و بهبود طراحی ارتباطات مدیریت مصرف آب فراهم آورند.

۲- پیشینه پژوهش و چارچوب مفهومی

۲-۱- ارتباطات مدیریت مصرف آب: عبور از مدل اطلاع‌رسانی ساده

یکی از خطاهای رایج در ارتباطات مدیریت مصرف آب، تقلیل مسئله به کمبود آگاهی است. در این نگاه، فرض می‌شود شهروندان به این دلیل مصرف خود را اصلاح نمی‌کنند که از محدودیت منابع، میزان مصرف یا پیامدهای کم‌آبی اطلاع کافی ندارند؛ بنابراین، افزایش اطلاعات باید به تغییر رفتار بینجامد. این منطق بخشی از واقعیت را توضیح می‌دهد، اما برای تبیین رفتار مصرفی کافی نیست. آگاهی می‌تواند شرط لازم باشد، ولی به‌تنهایی شرط کافی نیست؛ زیرا بخش مهمی از مصرف آب خانگی در قالب عادت‌ها و فعالیت‌های تکرارشونده‌ای مانند استحمام، شست‌وشو، نظافت، آبیاری و استفاده از وسایل خانگی رخ می‌دهد. در این موقعیت‌ها، فرد الزاماً هر بار تصمیمی آگاهانه و سنجیده اتخاذ نمی‌کند.

پیام ارتباطی زمانی می‌تواند فراتر از انتقال اطلاعات عمل کند که میان مسئله عمومی و رفتار روزمره مخاطب پیوند برقرار سازد. چنین پیوندی ممکن است از طریق ارائه رفتار جایگزین، ایجاد احساس توانستن، برجسته کردن منفعت، نشان دادن زبان، استفاده از هنجارهای اجتماعی یا اتکا به منبع معتبر شکل‌گیرد. بر این مبنای پرسش اصلی فقط این نیست که پیام چه اطلاعاتی ارائه

بخش مهمی از پیام‌رسانی عمومی درباره آب هم‌چنان بر این فرض استوار است که افزایش آگاهی از کمبود منابع یا پیامدهای مصرف بالا، به‌تنهایی به اصلاح رفتار منجر می‌شود. این فرض، آگاهی را معادل کنش تلقی می‌کند، درحالی‌که ادبیات ارتباطات رفتاری نشان می‌دهد اطلاع‌رسانی فقط یکی از اجزای پیام مؤثر است. ظرفیت اقناعی پیام به عواملی مانند شیوه صورت‌بندی مسئله، تکنیک اثرگذاری، قاب معنایی، لحن، اعتبار منبع، هنجار اجتماعی، خودکارآمدی و ارائه راه‌کار عملی وابسته است (Koop et al., 2019; Sánchez et al., 2024). عدد و داده می‌توانند بحران را ملموس کنند؛ هشدار می‌تواند فوریت ایجاد کند؛ قاب‌بندی می‌تواند جهت تفسیر مسئله را تغییر دهد؛ و راه‌کار عملی می‌تواند فاصله میان درک مسئله و امکان اقدام را کاهش دهد. هیچ‌یک از این عناصر به‌تنهایی تضمین‌کننده تغییر رفتار نیستند، اما فقدان یا ابهام آن‌ها ظرفیت ارتباطی پیام را محدود می‌کند.

اهمیت این مسئله در پیام‌های کوتاه محیطی بیشتر است. مخاطب در مواجهه با بلبورد، پوستر، پیام مترو یا نمایشگر شهری معمولاً فرصت محدودی برای پردازش متن دارد. کوتاهی پیام برای دیده‌شدن ضروری است، اما ایجاز بدون جهت روشن می‌تواند متن را به شعاری عمومی تبدیل کند. در مقابل، پیام کوتاهی که رفتار مشخص، قاب معنادار و سازوکار اقناعی قابل‌تشخیصی دارد، می‌تواند در همان فضای محدود، مسئله را به تجربه روزمره مخاطب پیوند دهد. بنابراین، ارزیابی پیام‌های مدیریت مصرف آب نباید فقط بر موضوع، تعداد یا محل انتشار آن‌ها متمرکز باشد، بلکه باید روشن کند پیام با چه زبانی سخن می‌گوید، از چه مسیر اقناعی استفاده می‌کند، مسئله را چگونه قاب‌بندی می‌کند و چه کنشی را پیش روی مخاطب قرار می‌دهد.

با وجود توجه گسترده به آموزش عمومی، فرهنگ‌سازی و اقناع شهروندان در زمینه مصرف آب، شناخت تجربی از ساختار پیام‌هایی که عملاً تولید و منتشر می‌شوند هم‌چنان محدود است. بخش مهمی از پژوهش‌های موجود یا بر عوامل مؤثر بر مصرف خانوار تمرکز دارند، یا راهبردهای مطلوب ارتباطی را پیشنهاد می‌کنند، یا شمار محدودی از آگهی‌ها را به‌صورت موردی تحلیل می‌کنند. در نتیجه، هنوز تصویر منظم و کمی روشنی از این موضوع وجود ندارد که مجموعه پیام‌های نوشتاری مدیریت مصرف آب تهران، طی یک دوره زمانی نسبتاً گسترده، از نظر طول، بستر انتشار، نوع محتوا و لحن، تکنیک اقناعی غالب، قاب‌بندی، راه‌کار عملی و اتکا به منابع اعتبار چه ساختاری دارند. پژوهش حاضر در پاسخ به این خلأ، ۱۶۰ پیام نوشتاری مرتبط با صرفه‌جویی و مدیریت مصرف آب تهران را در بازه ۱۳۹۶ تا

صورت‌بندی می‌کند. اگر همین رفتار با عدد یا پیامد ملموسی همراه شود، امکان درک نسبت میان عمل فردی و نتیجه مصرف نیز افزایش می‌یابد.

مرور (Koop et al. (2019 بر مطالعات تجربی صرفه‌جویی آب خانگی، هشت تاکتیک اثرگذاری رفتاری را شناسایی می‌کند: انتقال دانش، تقویت خودکارآمدی، استفاده از هنجارهای اجتماعی، قاب‌بندی، شخصی‌سازی، میان‌برهای هیجانی، آماده‌سازی ذهنی و تلنگر. این تاکتیک‌ها نشان می‌دهند پیام می‌تواند از مسیرهای متفاوتی عمل کند. برخی پیام‌ها بر استدلال و داده تکیه دارند؛ برخی رفتار فرد را با رفتار دیگران مقایسه می‌کنند؛ برخی از عاطفه یا هویت جمعی بهره می‌برند؛ و برخی با ارائه راه‌کاری کوچک، انتخاب مطلوب را ساده‌تر می‌کنند.

نظریه رفتار برنامه‌ریزی‌شده نیز برای توضیح ارتباط میان پیام و رفتار چارچوب مناسبی فراهم می‌کند. براساس این نظریه، قصد رفتاری تحت‌تأثیر نگرش فرد، هنجارهای ذهنی و کنترل رفتاری ادراک‌شده شکل می‌گیرد (Ajzen, 1991). پیام داده‌محور می‌تواند ارزیابی فرد از اهمیت یا پیامد رفتار را تغییر دهد؛ پیام هنجارمحور می‌تواند ادراک او از انتظار یا رفتار دیگران را متأثر سازد؛ و پیام راه‌کارمحور می‌تواند احساس توانایی انجام رفتار را افزایش دهد. بنابراین، تحلیل تکنیک اقناعی صرفاً طبقه‌بندی صوری متن نیست، بلکه مشخص می‌کند پیام برای فعال کردن کدام مسیر شناختی، اجتماعی یا عملی طراحی شده است.

با این حال، وجود یک تکنیک اقناعی در متن به معنای تحقق اثر رفتاری نیست. تکنیک‌ها فقط ظرفیت‌های درون‌متنی پیام‌اند و اثر آن‌ها به نحوه مواجهه، ویژگی مخاطب، زمینه اجتماعی، تکرار، اعتماد و شرایط واقعی انجام رفتار وابسته است. از این‌رو، تحلیل حاضر به شناسایی سازوکار غالب پیام محدود می‌شود و درباره پیامد نهایی آن بر مصرف دآوری نمی‌کند.

۲-۳- هشدار، ترس و ضرورت همراهی با راه‌کار

هشدار در ارتباطات بحران آب نقشی دوگانه دارد. از یک‌سو، اگر کم‌آبی بدون جدیت، فوریت و پیامدهای ملموس بازنمایی شود، ممکن است در میان انبوه پیام‌های روزمره نادیده گرفته‌شود. از سوی دیگر، تکرار هشدارهای شدید و فاقد راه‌کار می‌تواند به اضطراب، انکار، بی‌اعتنایی یا عادت‌پذیری مخاطب منجر شود. بنابراین، مسئله اصلی استفاده یا عدم استفاده از هشدار نیست، بلکه چگونگی پیوند آن با امکان عمل است.

مدل پردازش موازی بسط‌یافته توضیح می‌دهد که پیام‌های ترس‌آفرین زمانی احتمال پذیرش بیشتری دارند که مخاطب، هم تهدید را جدی بداند و هم پاسخ پیشنهادی را مؤثر و قابل انجام

می‌دهد، بلکه باید پرسید این اطلاعات چگونه صورت‌بندی شده‌اند، چه سازوکاری برای اثرگذاری دارند و مخاطب را به چه کنشی هدایت می‌کنند.

(Sánchez et al. (2024 در تحلیل ۹۵ تبلیغ صرفه‌جویی آب در آمریکای لاتین نشان‌دادند که بسیاری از پویش‌های ارتباطی هم‌چنان بر مدل «کمبود دانش» تکیه دارند و از ظرفیت تکنیک‌های اقناعی کمتر استفاده می‌کنند. آنان چهارگونه پیام را شناسایی کردند: اقناع برای عمل، انگیزش بدون ترساندن، آگاهی‌بخشی درباره مسئله آب و هشدار درباره مسئله آب. این گونه‌شناسی نشان می‌دهد همه پیام‌های مرتبط با آب از نظر کارکرد ارتباطی یکسان نیستند. پیامی ممکن است صرفاً وجود مسئله را اعلام کند، پیام دیگری خطر را برجسته سازد و پیام سوم، مخاطب را به رفتار مشخصی دعوت کند.

در پژوهش‌های داخلی نیز ضرورت آموزش، اقناع و استفاده هدفمند از رسانه‌ها موردتوجه قرار گرفته است. بابایی سارویی (۱۳۹۷) در بررسی پنج آگهی تولیدی سازمان آب و فاضلاب با محوریت صرفه‌جویی آب نشان‌داد که در برخی آگهی‌ها از فنون اقناعی استفاده‌شده است، اما برنامه‌ریزی هدفمند و منسجمی در تولید آن‌ها مشاهده نمی‌شود. مطالعه حاضر از سه جهت با آن پژوهش متفاوت است: پیکره‌ای به‌مراتب گسترده‌تر شامل ۱۶۰ پیام را بررسی می‌کند؛ دوره زمانی نه‌ساله ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴ را پوشش می‌دهد؛ و متغیرهای پیام را با روشی کمی و نظام‌مند کدگذاری و مقایسه می‌کند.

جلیوند خسروی و کریمی (۱۴۰۲) نیز راهکارهای اقناع رسانه‌ای برای مدیریت مصرف آب را در سطوح سازمانی، تولید پیام و قالب‌های توزیع استخراج کرده‌اند. تمرکز آن مطالعه بر شناسایی راهبردها و الزامات مطلوب بود، درحالی‌که مسئله پژوهش حاضر، توصیف و تحلیل ساختار پیام‌های واقعاً منتشرشده است. بنابراین، جای خالی مطالعه‌ای باقی می‌ماند که پیام را به‌عنوان واحد تحلیل مستقل در نظر گیرد و وضعیت موجود را از نظر سازوکار اقناع، قاب‌بندی، لحن، بستر و راه‌کار عملی نشان‌دهد.

۲-۲- تاکتیک‌های رفتاری در صرفه‌جویی آب

برای تحلیل پیام‌های مدیریت مصرف آب باید از سطح «موضوع پیام» فراتر رفت و به «سازوکار اثرگذاری» آن توجه کرد. دو پیام ممکن است هر دو درباره صرفه‌جویی باشند، اما از نظر ساخت ارتباطی کاملاً متفاوت عمل کنند. پیام «آب را هدر ندهیم» توصیه‌ای عمومی است؛ درحالی‌که پیام «زمان دوش را دو دقیقه کاهش دهید» رفتار مشخص و قابل انجامی را

هزینه یا مشارکت در حل مسئله عمومی تأکید کند؛ قاب زبان نیز ممکن است افت فشار، محدودیت تأمین یا تشدید بحران را برجسته سازد.

در کنار این دو، بخشی از پیام‌ها ممکن است جهت روشن اما غیرارزشی داشته باشند؛ برای مثال، صرفاً وضعیتی را توصیف یا توصیه‌ای را بدون تأکید مشخص بر سود یا زیان ارائه کنند. این پیام‌ها در قاب خنثی قرار می‌گیرند. در مقابل، پیام فاقد قاب روشن نه منفعت مشخصی را برجسته می‌کند، نه زبانی را، و نه جهت تفسیری باثباتی برای فهم مسئله فراهم می‌آورد.

تمایز میان قاب خنثی و فقدان قاب اهمیت دارد. قاب خنثی هم‌چنان دارای جهت معنایی قابل تشخیص است، اما بر سود یا زیان تأکید نمی‌کند؛ درحالی‌که در پیام فاقد قاب، حتی جهت اصلی تفسیر نیز روشن نیست. این تمایز امکان می‌دهد مشخص شود ضعف یک پیام ناشی از انتخاب قاب خنثی است یا از فقدان سازمان‌دهی معنایی منسجم.

۲-۵- نقش عاطفه، لحن و رسانه‌های دیجیتال

پیام‌های مدیریت مصرف آب اگر فقط بر عدد و اطلاعات تکیه کنند، ممکن است مخاطب را آگاه‌سازند، اما الزاماً او را درگیر نکنند. در مقابل، اتکای صرف به احساسات نیز ممکن است توجه ایجاد کند، ولی از نظر اعتبار، وضوح و راه‌کار عملی دچار ضعف باشد. ارتباطات مؤثر در حوزه آب به ترکیبی متناسب از داده، اعتبار، عاطفه و رفتار پیشنهادی نیاز دارد. Abu Bakar et al. (2024) در بررسی ارتباطات صرفه‌جویی آب در رسانه‌های اجتماعی نشان دادند که جذابیت عاطفی، خلاقیت و امکانات چندرسانه‌ای می‌توانند در کنار محتوای اطلاعاتی، نگرش و ادراک کنترل رفتاری را تقویت کنند. در ادبیات داخلی نیز فاضلی مقدم و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعه‌ای سنتزپژوهانه درباره اقتناع افکار عمومی در رسانه‌های اجتماعی، بر نقش اعتماد و صداقت، مخاطب‌محوری، ویژگی پیام و راهبردهای متقاعدسازی تأکید کردند.

لحن، چگونگی برقراری رابطه زبانی پیام با مخاطب را نشان می‌دهد. یک پیام ممکن است آموزشی، توصیه‌ای، هشداردهنده، محاوره‌ای، استعاری یا داده‌مند باشد. لحن با تکنیک اقماعی یکسان نیست: لحن مشخص می‌کند پیام چگونه سخن می‌گوید، درحالی‌که تکنیک اقماعی نشان می‌دهد پیام عمدتاً از چه سازوکاری برای اثرگذاری استفاده می‌کند. برای مثال، پیامی ممکن است با لحن آموزشی نوشته شده باشد، اما تکنیک غالب آن عدد و داده باشد؛ یا لحن هشداردهنده داشته باشد، ولی

ارزیابی کند (Witte, 1992). اگر ادراک تهدید بالا باشد اما کارآمدی پاسخ یا توانایی فرد پایین باقی بماند، مخاطب ممکن است به جای کنترل خطر، به کنترل احساس ترس روی آورد؛ یعنی پیام را نادیده بگیرد، اعتبار آن را زیر سؤال ببرد یا از مواجهه ذهنی با مسئله پرهیز کند.

فراتحلیل Tannenbaum et al. (2015) نیز نشان داد که پیام‌های ترس‌آفرین می‌توانند بر نگرش، قصد و رفتار اثر بگذارند، اما اثر آن‌ها زمانی بیشتر است که همراه با گزاره‌های کارآمدی و توصیه رفتاری روشن باشند. از این منظر، هشدار مؤثر باید دست‌کم سه عنصر را به یکدیگر پیوند دهد: خطر چیست، مخاطب چه اقدامی می‌تواند انجام دهد و این اقدام چگونه به کاهش خطر کمک می‌کند.

این مبنا برای تحلیل پیام‌های مدیریت مصرف آب دلالت روش‌شناختی مستقیمی دارد. هشدارمحوری باید از راه‌کار محوری متمایز شود؛ زیرا ممکن است پیامی بحران را به‌درستی برجسته کند، اما هیچ رفتار قابل انجامی پیشنهاد ندهد. چنین پیامی می‌تواند در آگاه‌سازی یا جلب توجه فعال باشد، ولی فاصله میان ادراک تهدید و امکان اقدام را پر نمی‌کند. به‌همین دلیل، در این پژوهش وجود هشدار به‌تنهایی معادل ارائه راه‌کار عملی تلقی نمی‌شود.

۲-۴- قاب‌بندی پیام

قاب‌بندی تعیین می‌کند یک مسئله چگونه تعریف و تفسیر شود. Entman (1993) قاب‌بندی را انتخاب و برجسته‌سازی برخی جنبه‌های واقعیت در متن ارتباطی می‌داند؛ به‌گونه‌ای که تعریف مسئله، تفسیر علت، داوری اخلاقی یا پیشنهاد راه‌حل خاصی تقویت شود. پیام‌های مدیریت مصرف آب نیز فقط اطلاعاتی درباره کمبود یا مصرف منتقل نمی‌کنند، بلکه می‌توانند مسئله را در قالب منفعت خانوار، پیشگیری از زیان، مسئولیت شهروندی، عدالت مصرف، تاب‌آوری شهر یا حفاظت از نسل آینده عرضه کنند.

تمایز قاب سود و قاب زیان در ادبیات تصمیم‌گیری و اقتناع اهمیت ویژه‌ای دارد. نظریه چشم‌انداز نشان می‌دهد افراد نسبت به سود و زیان واکنش متفاوتی ندارند و شیوه عرضه یک پیام می‌تواند ادراک تصمیم را تغییر دهد (Kahneman and Tversky, 1979). پژوهش‌های حوزه رفتارهای پیشگیرانه نیز نشان داده‌اند که اثر قاب‌بندی به نوع رفتار، زمینه تصمیم و ادراک مخاطب از خطر وابسته است (Rothman and Salovey, 1997). در زمینه مصرف آب، قاب سود می‌تواند بر حفظ پایداری تأمین، کاهش

سازوکار اصلی آن دعوت اخلاقی تلقی شود.

بستر انتشار نیز صرفاً محل نمایش پیام نیست، بلکه شرایط مواجهه و امکانات ارتباطی آن را شکل می‌دهد. پیام محیطی معمولاً باید کوتاه، سریع‌خوان و قابل‌دریافت در مواجهه‌ای لحظه‌ای باشد. در مقابل، رسانه دیجیتال می‌تواند توضیح بیشتر، روایت، بازنشر، تعامل، پیوند به محتوای تکمیلی و دریافت بازخورد را امکان‌پذیر سازد. با این حال، انتقال یک متن واحد از بیلپورد به رسانه دیجیتال، بدون بازطراحی متناسب با ظرفیت بستر، الزاماً کیفیت اقناع را افزایش نمی‌دهد.

از این رو، طول و بستر انتشار در کنار لحن، تکنیک اقناعی و قاب‌بندی بررسی می‌شوند. این ترکیب امکان می‌دهد روشن شود آیا پیام‌های کوتاه و محیطی از ساختاری متناسب با شرایط مواجهه برخوردارند و آیا بسترهای دارای ظرفیت توضیح و تعامل، واقعاً از تکنیک‌های متفاوتی بهره‌گرفته‌اند یا محتوای مشابهی را بازتولید کرده‌اند.

۲-۶- چارچوب مفهومی مقاله: معماری پیام رفتار ساز

کاربست چارچوب اقناعی در تهران مستلزم توجه به ناهمگنی زمینه‌ای این کلان‌شهر است. تفاوت‌های اقتصادی و اجتماعی، تنوع سبک‌های سکونت و ساختار خانوار و گوناگونی موقعیت‌ها و الگوهای مصرف سبب می‌شود یک پیام واحد در همه گروه‌ها و موقعیت‌ها ظرفیت اقناعی یکسانی نداشته باشد. از این رو، انتخاب لحن، قاب معنایی، گروه مرجع و رفتار پیشنهادی باید با زمینه مخاطب و موقعیت مواجهه او سازگار باشد. در برخی پیام‌ها، ارزش‌های دینی و اخلاقی، مسئولیت خانوادگی و پیوندهای محلی می‌توانند منابع معنا و اعتبار باشند؛ در برخی دیگر، داده روشن، منفعت ملموس یا راهکار عملی تناسب بیشتری دارد.

بر این اساس، «معماری پیام رفتار ساز» در این مقاله به

سازمان‌دهی درون‌متنی و رسانه‌ای عناصری اشاره دارد که ظرفیت پیام را برای جهت‌دهی به رفتار افزایش می‌دهند. تعبیر «رفتار ساز» به معنای اثبات تغییر واقعی رفتار مخاطب نیست، بلکه نشان می‌دهد متن تا چه اندازه رفتار مشخص، امکان عمل، سازوکار اقناعی و جهت معنایی روشنی را صورت‌بندی کرده است. معماری پیام مجموعه لایه‌هایی است که تعیین می‌کند پیام چگونه در معرض توجه قرار می‌گیرد، چگونه صورت‌بندی می‌شود، از چه سازوکار اقناعی بهره می‌برد و مخاطب را به چه تفسیر یا کنشی هدایت می‌کند. این چارچوب از یک سو بر ادبیات رفتار مصرف آب و تاکتیک‌های اثرگذاری رفتاری تکیه دارد (Jorgensen et al., 2009; Koop et al., 2019) و از سوی دیگر، از ادبیات اقناع، هشدار، قاب‌بندی و ارتباطات دیجیتال بهره می‌گیرد (Entman, 1993; Witte, 1992; Tannenbaum et al., 2015; Abu Bakar et al., 2024; Sánchez et al., 2024). تمایز میان پردازش عمیق استدلال‌ها و اتکا به نشانه‌های پیرامونی در مدل احتمال تشریح نیز توضیح می‌دهد که چرا پیام‌های کوتاه باید هم از نظر محتوای استدلالی و هم از نظر نشانه‌هایی مانند منبع، لحن و قاب بررسی شوند.

بر این مبنا، پیام نوشتاری مدیریت مصرف آب در چهار لایه تحلیل می‌شود. لایه نخست، تماس است و به شرایط مواجهه با پیام، از جمله بستر انتشار و طول آن، توجه دارد. لایه دوم، صورت‌بندی است و بررسی می‌کند پیام با چه نوع محتوا و لحنی با مخاطب سخن می‌گوید. لایه سوم، اقناع است و سازوکار غالب اثرگذاری، مانند عدد و داده، هشدار، توصیه، ارزش اخلاقی، اعتبار منبع یا راهکار عملی را در بر می‌گیرد. لایه چهارم، جهت‌دهی رفتاری است و مشخص می‌کند پیام مسئله را در چه قاب معنایی قرار می‌دهد و آیا رفتار مشخص و قابل‌انجامی را پیشنهاد می‌کند. جدول ۱ نسبت میان این چهار لایه و متغیرهای پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- چارچوب مفهومی تحلیل پیام‌های نوشتاری مدیریت مصرف آب

لايه تحليل	پرسش اصلي	متغيرهاي پژوهش	دالالت تحليلي
تماس	پیام در چه بستری و با چه طولی عرضه شده است؟	بستر انتشار؛ طول پیام	شرایط مواجهه، فرصت پردازش و الزامات ایجاز را نشان می‌دهد.
صورت‌بندی	پیام چگونه و با چه لحنی با مخاطب سخن می‌گوید؟	نوع محتوا و لحن	نوع رابطه زبانی و شیوه خطاب کردن مخاطب را مشخص می‌کند.
اقناع	سازوکار غالب اثرگذاری پیام چیست؟	تکنیک اقناعی غالب؛ اتکای منبع	مسیر شناختی، عاطفی، اخلاقی یا اجتماعی اثرگذاری را نشان می‌دهد.
جهت‌دهی رفتاری	پیام چه تفسیر یا کنشی را برجسته می‌کند؟	قاب‌بندی؛ راهکار محوری	میزان پیوند پیام با رفتار روشن و قابل‌انجام را مشخص می‌کند.

نشد، بلکه جست‌وجو، ثبت و غربالگری پیام‌ها به صورت هم‌زمان انجام‌شد. از این‌رو، حجم جامعه اولیه به صورت عددی مستقل از فرایند بازیابی تعریف نشده بود. حاصل این فرایند، بانک نهایی شامل ۱۶۰ پیام واجد معیار بود. از آن‌جا که همه پیام‌های واجد شرایط موجود در بانک نهایی بررسی‌شدند، نمونه‌گیری آماری انجام نشد و انتخاب داده‌ها به شیوه سرشماری کامل پیکره در دسترس صورت‌گرفت.

معیارهای ورود عبارت بودند از: ارتباط مستقیم پیام با صرفه‌جویی، کم‌آبی، مدیریت تقاضا یا رفتار مصرف آب؛ برخورداری از متن قابل خواندن و کدگذاری؛ تعلق به بازه زمانی پژوهش؛ و ارتباط با پیام‌رسانی مدیریت مصرف آب تهران. محتوای صرفاً تصویری، پیام‌های نامرتبط با مصرف آب شرب، موارد خارج از بازه زمانی، متن‌های ناقص یا غیرقابل کدگذاری و تکرارهای کاملاً یکسان حذف شدند. اگر متن مشابهی در زمان یا بستر متفاوت انتشار یافته بود، به دلیل تفاوت موقعیت مواجهه، امکان ثبت مستقل آن حفظ شد.

واحد تحلیل، هر پیام نوشتاری مستقلی بود که بتوان آن را جداگانه خواند و براساس کدنامه، لحن، تکنیک اقناعی و قاب معنایی آن را تشخیص داد. در تیزرها و محتوای چندرسانه‌ای، متن نوشتاری یا متن پیاده‌سازی‌شده حامل پیام، واحد کدگذاری قرارگرفت. عناصر تصویری فقط در حد قرائن ضروری برای فهم معنای متن در نظر گرفته‌شدند و تحلیل مستقل تصویر، رنگ، ترکیب‌بندی گرافیکی، موسیقی و کیفیت اجرای چندرسانه‌ای در قلمرو پژوهش نبود.

۳-۳- کدنامه، متغیرها و قواعد کدگذاری

کدگذاری براساس کدنامه‌ای انجام‌شد که از چارچوب مفهومی مقاله، پیشینه نظری و مشاهده مقدماتی پیکره استخراج شده بود. برای هر متغیر، تعریف عملیاتی، طبقات ممکن و قاعده تشخیص موارد مرزی تعیین شد. ابتدا بخشی از پیام‌ها به صورت آزمایشی کدگذاری شد تا ابهام‌ها و همپوشانی‌های احتمالی در تشخیص لحن، تکنیک غالب و قاب‌بندی شناسایی شود. پس از اصلاح تعاریف و تثبیت قواعد تصمیم‌گیری، همه ۱۶۰ پیام کدگذاری و موارد مبهم یا ناهم‌آهنگ با مراجعه مجدد به متن کامل پیام بازبینی شدند؛ که در جدول ۲ متغیرهای اصلی و نحوه عملیاتی‌سازی آن‌ها ارائه شده است.

لحن و تکنیک اقناعی دو متغیر متمایز بودند. لحن نشان می‌داد پیام چگونه با مخاطب سخن می‌گوید، درحالی‌که تکنیک اقناعی مشخص می‌کرد پیام عمدتاً از چه سازوکاری برای

این چارچوب اجازه می‌دهد تحلیل پیام‌ها به شمارش موضوعات یا مضامین محدود نماند. پیام‌ها نه فقط از نظر آن‌چه درباره آب می‌گویند، بلکه از نظر شرایط مواجهه، شیوه سخن گفتن، سازوکار اقناع و ظرفیت جهت‌دهی به کنش بررسی می‌شوند. بدین ترتیب، تحلیل میان پیام به مثابه متن، پیام به مثابه ابزار اقناع و پیام به مثابه مقدمه‌ای برای عمل تمایز می‌گذارد. این تمایز مبنای عملیاتی‌سازی متغیرها، تشکیل کدنامه و تحلیل پیکره در بخش روش است.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- نوع پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، تحلیل محتوای کمی است. تحلیل محتوای کمی امکان می‌دهد ویژگی‌های آشکار و تعریف‌شده محتوای ارتباطی بر اساس کدنامه‌ای مشخص به داده‌های منظم، قابل مقایسه و قابل تحلیل تبدیل شوند (Krippendorff, 2019). در این پژوهش، پیام‌های نوشتاری مدیریت مصرف آب برپایه ویژگی‌های متن و بستر انتشار، شامل طول، نوع محتوا و لحن، تکنیک اقناعی غالب و قاب‌بندی بررسی‌شدند. بنابراین، واحد سنجش «پیام» است، نه «مخاطب»؛ و نتایج، ساختار درون‌متنی و ظرفیت بالقوه پیام‌ها را برای اقناع و جهت‌دهی رفتاری توصیف می‌کنند، نه اثر واقعی آن‌ها بر نگرش، رفتار یا میزان مصرف آب.

۳-۲- جامعه، تشکیل پیکره و واحد تحلیل

جامعه در دسترس پژوهش، پیام‌های نوشتاری مرتبط با صرفه‌جویی و مدیریت مصرف آب تهران در بازه ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴ بود. پیکره با روش اسنادی و آرشیوی و از طریق جست‌وجوی منابع سازمانی و رسانه‌ای تشکیل شد. منابع بازیابی شامل تبلیغات محیطی مانند بلبورد، بنر و پوستر؛ پیام‌های نصب‌شده در مترو و فضاهای حمل‌ونقل شهری؛ پیام‌رسان بله؛ پورتال و وبسایت شرکت آب و فاضلاب استان تهران؛ کانال آبفا نیوز؛ تبلیغات دیجیتال از جمله پیام‌های نمایش داده‌شده در دستگاه‌های خودپرداز؛ نشریه «همکار»؛ و متن‌های ثبت‌شده در تیزرها و تبلیغات تلویزیونی بود. پورتال و نشریه داخلی در این فرایند صرفاً به عنوان مخزن بازیابی و مستندسازی پیام‌های عمومی تولیدشده به کار رفتند و پیام‌های مورد بررسی، پیام‌های اختصاصی کارکنان نبودند.

پیکره از یک فهرست بسته و ازپیش‌تعیین‌شده نمونه‌گیری

می‌شود» به دلیل محوریت داده، در طبقه عدد/داده و قاب خنثی قرار گرفت. پیام «با مصرف بی‌رویه آب، به روز صفر نزدیک می‌شویم» در طبقه هشدار/تهدید و قاب زیان کدگذاری شد. پیام «با استفاده از کاهنده‌ها در مصرف آب صرفه‌جویی کنید» در طبقه راه‌کار عملی مستقیم و قاب سود قرار گرفت و پیام «بزرگ‌ترین شکرانه نعمت آب، درست مصرف کردن آن است» در طبقه ارزش دینی/اخلاقی ثبت شد.

اثرگذاری استفاده می‌کند. از این‌رو، یک پیام می‌توانست لحن آموزشی داشته باشد، اما تکنیک غالب آن عدد و داده یا راه‌کار عملی باشد. خانه‌های فاقد کد در متغیرهای تفسیری نیز داده مفقود محسوب نشدند، بلکه به عنوان «فاقد لحن غالب»، «فاقد تکنیک روشن» یا «فاقد قاب‌بندی روشن» در تحلیل ثبت شدند. در پیام‌های دارای چند نشانه اقناعی، تکنیکی غالب تلقی شد که بیشترین بار معنایی و استدلالی پیام را برعهده داشت. برای نمونه، پیام «در تهران روزانه بیش از ۳ میلیارد لیتر آب مصرف

جدول ۲- متغیرهای اصلی و نحوه عملیاتی‌سازی آن‌ها

متغیر	تعریف عملیاتی	طبقات یا شیوه ثبت
سال انتشار	سال ثبت یا انتشار پیام	۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴
طول پیام	تعداد واژه‌های متن اصلی	حداکثر ۱۰ واژه؛ ۱۱ تا ۲۰ واژه؛ بیش از ۲۰ واژه
بستر انتشار	رسانه یا محل غالب انتشار	محیطی؛ ترکیبی محیطی-تلویزیونی؛ دیجیتال/پیام‌رسان؛ تلویزیونی/تیزر
نوع محتوا و لحن	شیوه غالب سخن گفتن پیام با مخاطب	فاقد لحن غالب؛ آموزشی/توصیه‌ای/فشاری؛ داده‌مند/راهکارمحور؛ اطلاع‌رسان/هشدار عمومی؛ محاوره‌ای؛ هشدار صریح؛ معادل‌سازی؛ استعاری؛ مبهم
تکنیک اقناعی غالب	اصلی‌ترین سازوکاری که بار اقناعی پیام را بر عهده دارد	فاقد تکنیک روشن؛ عدد/داده/معادل‌سازی؛ هشدار/تهدید؛ توصیه/شعار/دعوت عمومی؛ ارزش دینی/اخلاقی؛ راهکار عملی مستقیم؛ اعتبار منبع/گروه مرجع/چهره؛ کنش اجتماعی/اخلاقی
قاب‌بندی	جهت معنایی برجسته‌شده در متن	سودمحور؛ زیان‌محور؛ خنثی؛ فاقد قاب‌بندی روشن
وضوح تکنیک	قابلیت تشخیص یک تکنیک اقناعی غالب	روشن/فاقد تکنیک روشن
وضوح قاب‌بندی	قابلیت تشخیص جهت معنایی پیام	روشن/فاقد قاب‌بندی روشن
راهکارمحوری	محور بودن رفتار مشخص و قابل انجام	راه‌کار عملی مستقیم به عنوان تکنیک غالب/سایر حالات
اتکای منبع	محور بودن اعتبار منبع، چهره یا گروه مرجع	اعتبار منبع یا گروه مرجع به عنوان تکنیک غالب/سایر حالات

کدگذاری آزمایشی تقویت شد. این فرایند به‌ویژه برای تفکیک لحن از تکنیک اقناعی، تشخیص تکنیک غالب و تمایز قاب خنثی از فقدان قاب اهمیت داشت. برای سنجش پایایی بین کدگذاران، ۳۲ پیام، معادل ۲۰٪ پیکره، به‌طور مستقل توسط کدگذار دوم بازکدگذاری شد. شاخص مورد استفاده، درصد توافق ساده بین کدگذاران بود که از نسبت تصمیم‌های یکسان به کل تصمیم‌های مقایسه‌شده محاسبه شد. توافق کلی ۸۵٪ به‌دست آمد که برای ادامه تحلیل قابل قبول ارزیابی شد (Lombard et al., 2002). اختلاف‌ها پس از محاسبه توافق، با مراجعه مجدد به متن پیام، تعریف عملیاتی مقوله و قاعده تشخیص تکنیک یا قاب غالب بررسی و کد نهایی تعیین شد.

۳-۵- روش تحلیل داده‌ها

تحلیل داده‌ها در سه سطح انجام شد. در سطح نخست، فراوانی و درصد برای توصیف توزیع پیام‌ها برحسب سال، طول، بستر انتشار، لحن، تکنیک اقناعی و قاب‌بندی محاسبه شد. نسبت پیام‌های دارای تکنیک روشن، قاب قابل تشخیص، راه‌کار عملی مستقیم، اتکای غالب به منبع و انتشار محیطی نیز به عنوان

در کدگذاری قاب، پیام‌هایی که منفعت، دستاورد یا پیامد مثبت صرفه‌جویی را برجسته می‌کردند سودمحور و پیام‌هایی که خسارت، تهدید یا پیامد منفی مصرف بی‌رویه را در مرکز قرار می‌دادند زیان‌محور محسوب شدند. قاب خنثی به پیام‌هایی اختصاص یافت که جهت معنایی قابل تشخیصی داشتند، اما بر سود یا زیان تأکید نمی‌کردند. پیام‌هایی که جهت معنایی باثباتی از آن‌ها قابل استخراج نبود، فاقد قاب‌بندی روشن ثبت شدند.

توصیه‌های کلی مانند «در مصرف آب صرفه‌جویی کنیم» راه‌کار عملی مستقیم تلقی نشدند؛ راه‌کارمحوری مستلزم پیشنهاد رفتاری مشخص و قابل انجام بود. با توجه به ساختار بانک داده، راه‌کارمحوری و اتکای منبع بر پایه تکنیک غالب استخراج شدند. بنابراین، این دو شاخص نشان‌دهنده محور بودن راه‌کار عملی یا اعتبار منبع در پیام‌اند و حضور فرعی یا ضمنی آن‌ها را اندازه‌گیری نمی‌کنند.

۳-۴- اعتبار کدنامه و پایایی کدگذاری

اعتبار محتوایی کدنامه از طریق انطباق مقوله‌ها با چارچوب نظری، مشاهده مقدماتی پیکره و بازبینی تعاریف در مرحله

آزمون‌های خی‌دو، فراوانی‌های مورد انتظار خانه‌ها بررسی شد و ادغام طبقات با هدف کاهش خانه‌های کم‌فراوان و دستیابی به برآوردهای بایبات‌تر انجام گرفت.

۳-۷- محدودیت‌های روش‌شناختی

این پژوهش اثر واقعی پیام‌ها بر نگرش، قصد رفتاری یا میزان مصرف آب شهروندان را اندازه‌گیری نمی‌کند؛ بنابراین، نتایج آن باید به‌عنوان شواهدی درباره ساختار درون‌متنی و ظرفیت بالقوه اقناعی پیام‌ها تفسیر شوند. همچنین تعداد پیام‌ها در سال‌ها و بسترهای مختلف برابر نیست و این نابرابری، دامنه برخی مقایسه‌ها و دقت برآوردهای گروه‌های کم‌فراوان را محدود می‌کند. افزون بر این، تحلیل بر متن متمرکز است و عناصر دیداری و چندرسانه‌ای فقط در حد قرائن ضروری برای فهم متن در نظر گرفته شده‌اند؛ از این‌رو، یافته‌ها درباره کیفیت گرافیکی، تصویر، رنگ، موسیقی یا اجرای رسانه‌ای پیام‌ها دآوری نمی‌کنند.

۴- یافته‌ها و بحث

۴-۱- توصیف عمومی پیکره پیام‌ها

یافته‌ها در مجموع از یک شکاف ساختاری حکایت دارند: پیکره از نظر حضور محیطی و ایجاز متنی فعال است، اما در صورت‌بندی رفتار مشخص و قابل انجام، ظرفیت محدودتری نشان می‌دهد. برای روشن‌شدن زمینه این شکاف، ابتدا توزیع پیام‌ها برحسب زمان انتشار، طول و بستر انتشار بررسی شد.

از مجموع ۱۶۰ پیام، ۵۵ پیام، معادل ۳۴/۴٪، به سال ۱۴۰۴ تعلق داشت و این سال بیشترین سهم را در پیکره داشت. پس از آن، سال ۱۴۰۳ با ۲۱ پیام و سال ۱۳۹۶ با ۱۷ پیام قرار گرفتند. بنابراین، توزیع زمانی پیکره یکنواخت نبود و بیش از یک‌سوم پیام‌های بازیابی‌شده در سال پایانی دوره ثبت شده بودند. این تمرکز، افزایش سهم پیام‌های متأخر در پیکره را نشان می‌دهد، اما به‌تنهایی نباید معادل برآورد کامل حجم همه تولیدات ارتباطی هر سال تلقی شود.

از نظر طول، ۱۰۶ پیام، معادل ۶۶/۲٪، حداکثر ۱۰ واژه داشتند. پیام‌های ۱۱ تا ۲۰ واژه‌ای ۱۸/۱٪ و پیام‌های بیش از ۲۰ واژه ۱۵/۶٪ پیکره را تشکیل دادند. غلبه پیام‌های کوتاه با منطق مواجهه سریع در تبلیغات شهری سازگار است؛ با این حال، ایجاز زمانی ظرفیت ارتباطی ایجاد می‌کند که در همان فضای محدود، تکنیک اقناعی، جهت معنایی یا رفتار پیشنهادی قابل تشخیصی وجود داشته باشد. بنابراین، کوتاهی به‌خودی‌خود نقطه قوت یا

شاخص‌های توصیفی گزارش شد. این مقادیر شاخص‌های مرکب روان‌سنجی نیستند، بلکه نسبت‌های استخراج‌شده از متغیرهای کدگذاری‌شده‌اند.

در سطح دوم، برای بررسی روابط دومتغیره میان متغیرهای طبقه‌ای از آزمون خی‌دو استقلال و برای سنجش شدت رابطه از ۷ کرامر استفاده شد. روابط دوره زمانی و تکنیک اقناعی، دوره زمانی و وضوح قاب‌بندی، طول پیام و تکنیک اقناعی، بستر انتشار و تکنیک اقناعی و تکنیک اقناعی و وضوح قاب‌بندی بررسی شدند. در سطح سوم، برای بررسی هم‌زمان ارتباط طول، بستر انتشار و لحن با احتمال وجود تکنیک اقناعی روشن، رگرسیون لجستیک دوتایی اجرا شد. متغیر وابسته، وجود تکنیک اقناعی قابل تشخیص با کد یک و فقدان تکنیک روشن با کد صفر بود. طول پیام در سه طبقه، بستر انتشار در چهار طبقه و لحن به‌صورت دارای لحن غالب در برابر فاقد لحن غالب وارد مدل شد. برای کنترل تغییرات زمانی مشاهده‌شده در پیکره، دوره انتشار نیز به‌صورت سال ۱۴۰۴ در برابر سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۳ در مدل قرار گرفت. طبقات مرجع عبارت بودند از پیام‌های حداکثر ده‌واژه‌ای، تبلیغات محیطی، پیام‌های فاقد لحن غالب و دوره ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۳. نتایج مدل با نسبت شانس، فاصله اطمینان ۹۵٪ و سطح معناداری گزارش شدند و برازش کلی مدل با آزمون نسبت درست‌نمایی و شبه‌ضریب تعیین مک‌فادن ارزیابی شد. سطح معناداری آزمون‌ها ۵٪ در نظر گرفته شد.

۳-۶- ادغام طبقات و ملاحظات آماری

به‌دلیل فراوانی اندک برخی طبقات، جزئیات کامل مقوله‌ها در تحلیل توصیفی حفظ شد، اما برای آزمون‌های رابطه‌ای، طبقات هم‌معنا یا کم‌فراوان در گروه‌های بزرگ‌تر ادغام شدند. سال انتشار به دو دوره ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴ تقسیم شد. تکنیک اقناعی در آزمون‌های خی‌دو در چهار گروه فاقد تکنیک روشن، هشدار/تهدید، عدد/داده/معادل‌سازی و سایر تکنیک‌ها قرار گرفت. گروه «سایر تکنیک‌ها» توصیه و دعوت عمومی، ارزش دینی و اخلاقی، راه‌کار عملی، اعتبار منبع و گروه مرجع و کنش اجتماعی را در بر گرفت.

وضوح قاب‌بندی به دو طبقه دارای قاب قابل تشخیص و فاقد قاب روشن تبدیل شد. در آزمون رابطه بستر انتشار و تکنیک اقناعی، بسترها به محیطی و غیرمحیطی ادغام شدند؛ اما چهار طبقه اصلی بستر در تحلیل توصیفی و رگرسیون لجستیک حفظ شدند. برای ورود لحن به مدل نیز طبقات آن به دو دسته دارای لحن غالب و فاقد لحن غالب تبدیل شدند. پیش از تفسیر

ضعف نیست، بلکه ارزش آن به کیفیت سازمان‌دهی متن وابسته است.

از نظر بستر انتشار، ۱۱۳ پیام، معادل ۷۰/۶٪، در گروه محیطی قرار داشتند. بستر ترکیبی محیطی-تلویزیونی ۱۳/۸٪، بستر دیجیتال و پیام‌رسان ۸/۸٪ و تیزر یا تبلیغات تلویزیونی ۶/۹٪ پیام‌ها را شامل می‌شد. در نتیجه، لایه «تماس» در پیکره عمدتاً بر مواجهه کوتاه و محیطی استوار بود؛ الگویی که برای یادآوری گسترده مناسب است، اما درباره کیفیت اقناع، فهم یا واکنش واقعی مخاطب داوری نمی‌کند. توزیع عمومی پیام‌ها بر حسب سال، طول و بستر انتشار در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- توزیع عمومی پیام‌ها بر حسب سال، طول و بستر انتشار

بعد تحلیل	طبقه	فراوانی	درصد
سال انتشار	۱۳۹۶	۱۷	۱۰/۶
	۱۳۹۷	۱۰	۶/۲
	۱۳۹۸	۱۲	۷/۵
	۱۳۹۹	۸	۵
	۱۴۰۰	۱۶	۱۰
	۱۴۰۱	۸	۵
	۱۴۰۲	۱۳	۸/۱
	۱۴۰۳	۲۱	۱۳/۱
	۱۴۰۴	۵۵	۳۴/۴
	حداکثر ۱۰ واژه	۱۰۶	۶۶/۲
طول پیام	۱۱ تا ۲۰ واژه	۲۹	۱۸/۱
	بیش از ۲۰ واژه	۲۵	۱۵/۶
	محیطی	۱۱۳	۷۰/۶
بستر انتشار	ترکیبی محیطی-تلویزیونی	۲۲	۱۳/۸
	دیجیتال/پیام‌رسان	۱۴	۸/۸
	تلویزیونی/تیزر	۱۱	۶/۹

۴-۲- لحن و نوع محتوای پیام‌ها

در ۶۸ پیام، معادل ۴۲/۵٪، پیکره، لحن غالب قابل تشخیصی ثبت نشد. این طبقه به معنای بی‌معنابودن متن نیست، بلکه نشان می‌دهد پیام از شیوه زبانی مسلطی مانند آموزش، توصیه، هشدار، گفت‌وگو یا معادل‌سازی برخوردار نبود. در چنین پیام‌هایی، موضوع آب قابل تشخیص است، اما نوع رابطه‌ای که متن می‌کوشد با مخاطب برقرار کند، صراحت کمتری دارد.

در میان پیام‌های دارای لحن مشخص، لحن آموزشی، توصیه‌ای یا رفتاری با ۵۰ پیام و سهم ۳۱/۲ درصدی، بیشترین فراوانی را داشت. پیام‌های داده‌مند یا راه‌کارمحور ۱۰٪ و پیام‌های اطلاع‌رسان یا دارای هشدار عمومی ۶/۲٪ پیکره را تشکیل دادند. سهم لحن محاوره‌ای ۵/۶٪ بود و صورت‌هایی مانند هشدار صریح، معادل‌سازی و استعاره فراوانی محدودی داشتند.

این الگو نشان می‌دهد صورت‌بندی زبانی پیام‌ها بیشتر بر آموزش و توصیه مستقیم استوار بوده و ظرفیت‌هایی مانند گفت‌وگوی روزمره، استعاره و تنوع شخصیت ارتباطی کمتر به کار گرفته شده است. با این حال، برخورداری از لحن مشخص الزاماً به معنای وجود تکنیک اقناعی روشن نیست؛ لحن نحوه سخن گفتن پیام را نشان می‌دهد، در حالی که تکنیک اقناعی مسیر اصلی اثرگذاری آن را مشخص می‌کند. توزیع پیام‌ها بر حسب لحن، تکنیک اقناعی و قاب‌بندی در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- توزیع پیام‌ها بر حسب لحن، تکنیک اقناعی و قاب‌بندی

بعد تحلیل	طبقه	فراوانی	درصد
لحن/نوع محتوا	فاقد لحن غالب	۶۸	۴۲/۵
	آموزشی/توصیه‌ای/رفتاری	۵۰	۳۱/۲
	داده‌مند/راه‌کارمحور	۱۶	۱۰
	اطلاع‌رسان/هشدار عمومی	۱۰	۶/۲
	محاوره‌ای	۹	۵/۶
	هشدار صریح	۳	۱/۹
	معادل‌سازی	۲	۱/۲
	استعاره	۱	۰/۶
	مبهم	۱	۰/۶
تکنیک اقناعی غالب	فاقد تکنیک روشن	۴۷	۲۹/۴
	عدد/داده/معادل‌سازی	۴۱	۲۵/۶
	هشدار/تهدید	۳۳	۲۰/۶
	توصیه/شعار/دعوت عمومی	۱۷	۱۰/۶
	ارزش دینی/اخلاقی	۸	۵
	راه‌کار عملی مستقیم	۷	۴/۴
	اعتبار منبع/گروه مرجع/چهره	۵	۳/۱
	کنش اجتماعی/اخلاقی	۲	۱/۲
	فاقد قاب‌بندی روشن	۹۱	۵۶/۹
	خنثی	۲۶	۱۶/۲
قاب‌بندی	سودمحور	۲۵	۱۵/۶
	زیان‌محور	۱۸	۱۱/۲

۴-۳- تکنیک‌های اقناعی

در ۴۷ پیام، معادل ۲۹/۴٪، پیکره، تکنیک اقناعی غالب قابل تشخیصی وجود نداشت. این پیام‌ها ممکن بود صرفه‌جویی، کم‌آبی یا مسئولیت مصرف را مطرح کنند، اما متن آن‌ها بر سازوکاری روشن مانند داده، هشدار، راه‌کار، ارزش، هنجار یا اعتبار منبع استوار نبود. بنابراین، نزدیک به یک‌سوم پیکره از نظر سازوکار غالب اقناع، در سطحی عمومی یا کم‌تکنیک باقی‌مانده بود.

۴-۴- قاب‌بندی پیام‌ها

قاب‌بندی در ۹۱ پیام، معادل ۵۶/۹٪ پیکره، قابل تشخیص نبود. این یافته نشان می‌دهد مسئله اصلی فقط انتخاب میان قاب سود و قاب زیان نیست، بلکه بخش بزرگی از پیام‌ها اساساً جهت تفسیری روشنی نداشتند. در این پیام‌ها، ممکن بود کم‌آبی یا صرفه‌جویی ذکر شود، اما روشن نبود مخاطب باید مسئله را به‌عنوان منفعت، زیان، مسئولیت، فرصت مشارکت یا ضرورت رفتاری مشخصی درک کند.

در میان ۶۹ پیام دارای قاب قابل تشخیص، قاب خنثی با ۲۶ پیام بیشترین سهم را داشت. قاب سودمحور در ۲۵ پیام و قاب زیان‌محور در ۱۸ پیام ثبت شد. نزدیک‌بودن فراوانی قاب‌های سود و زیان نشان می‌دهد عدم توازن شدید میان این دو وجود ندارد؛ مسئله مهم‌تر، سهم بالای پیام‌های فاقد قاب و غلبه نسبی قاب خنثی در میان پیام‌های قاب‌دار است.

قاب خنثی الزاماً ضعف محسوب نمی‌شود؛ زیرا برخی پیام‌های اطلاع‌رسان ممکن است بدون برجسته‌کردن سود یا زیان، جهت معنایی روشنی داشته باشند. تفاوت آن با فقدان قاب در این است که پیام خنثی هم‌چنان از سازمان معنایی قابل تشخیصی برخوردار است. بنابراین، یافته اصلی این بخش نه برتری یک قاب بر قاب دیگر، بلکه محدودبودن جهت‌دهی تفسیری در بیش از نیمی از پیکره است.

۴-۵- تحلیل رابطه‌ای و چندمتغیره

برای بررسی روابط میان ویژگی‌های پیام، تحلیل در دو مرحله انجام شد. ابتدا با آزمون خی‌دو، رابطه دوره انتشار، طول و بستر پیام با تکنیک اقناعی و نیز رابطه تکنیک اقناعی با وضوح قاب‌بندی بررسی شد. سپس رگرسیون لجستیک دوتایی به‌کار رفت تا ارتباط هم‌زمان دوره انتشار، طول، بستر و لحن با احتمال وجود تکنیک اقناعی روشن‌سنجیده شود. در آزمون‌های خی‌دو، تکنیک‌ها در چهار گروه «فاقد تکنیک روشن»، «هشدار/تهدید»، «عدد/داده/معادل‌سازی» و «سایر تکنیک‌ها» ادغام شدند. نتایج در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

جدول ۵- الف- نتایج تحلیل رابطه‌ای: آزمون‌های خی‌دو و اندازه اثر و رگرسیون لجستیک

رابطه بررسی شده	آماره خی‌دو	درجه آزادی	سطح معناداری	V کرامر	نتیجه
دوره زمانی × تکنیک اقناعی	۱۵/۸۴	۳	۰/۰۰۱	۰/۳۱۵	رابطه معنادار با شدت متوسط
دوره زمانی × وضوح قاب‌بندی	۴۱/۹۹	۱	۰/۰۰۱	۰/۵۱۲	رابطه معنادار و نسبتاً قوی
طول پیام × تکنیک اقناعی	۳۴/۶۰	۶	۰/۰۰۱	۰/۳۲۹	رابطه معنادار با شدت متوسط
بستر انتشار × تکنیک اقناعی	۴/۵۹	۳	۰/۲۰۵	۰/۱۶۹	رابطه معنادار مشاهده نشد
تکنیک اقناعی × وضوح قاب‌بندی	۲۳/۱۰	۳	کمتر از ۰/۰۰۱	۰/۳۸۰	رابطه معنادار با شدت متوسط

در میان تکنیک‌های ثبت‌شده، عدد، داده و معادل‌سازی با ۴۱ پیام و سهم ۲۵/۶ درصدی، بیشترین فراوانی را داشت. هشدار و تهدید نیز با ۳۳ پیام، معادل ۲۰/۶٪، در رتبه بعد قرار گرفت. این دو تکنیک روی هم ۴۶/۲٪ پیکره را تشکیل دادند و نشان می‌دهند بخش مهمی از پیام‌رسانی موجود یا در پی ملموس‌کردن بحران با عدد و محاسبه بوده، یا فوریت آن را از طریق برجسته‌کردن تهدید و پیامد منفی صورت‌بندی کرده است.

عدد و هشدار هر دو می‌توانند اجزای مفید معماری پیام باشند، اما کارکرد آن‌ها متفاوت است. داده، ابعاد مسئله را قابل اندازه‌گیری می‌کند و هشدار توجه را به خطر جلب می‌کند؛ با این حال، هیچ‌یک لزوماً رفتار جایگزین را روشن نمی‌سازند. از منظر چارچوب هشدار و کارآمدی، هنگامی که تهدید از مسیر اقدام جدا بماند، پیوند میان ادراک خطر و احساس امکان اثرگذاری کامل نمی‌شود (Witte, 1992; Tannenbaum et al., 2015).

راه‌کار عملی مستقیم فقط در هفت پیام، معادل ۴/۴٪، تکنیک غالب بود. این مقدار، اصلی‌ترین شاهد شکاف میان برجسته‌سازی مسئله و صورت‌بندی عمل در پیکره است. پیام‌ها بیشتر توضیح می‌دهند که بحران وجود دارد، مصرف بالا است یا صرفه‌جویی ضروری است، اما کمتر یک رفتار محدود، روشن و قابل‌انجام را در مرکز متن قرار می‌دهند. هم‌چنین، اعتبار منبع، گروه مرجع یا چهره فقط در پنج پیام، معادل ۳/۱٪، تکنیک غالب بود؛ در نتیجه، ظرفیت منابع اجتماعی و واسطه‌های مورد اعتماد نیز در ساخت غالب پیام‌ها حضور محدودی داشت.

سهم اندک راه‌کار عملی نباید به معنای فقدان مطلق هر نوع توصیه در سایر پیام‌ها تفسیر شود. متغیر مورد سنجش، «تکنیک غالب» بود؛ بنابراین، ممکن است رفتاری به‌صورت فرعی در پیام وجود داشته باشد، اما اگر محور اصلی اقناع آن عدد، هشدار یا تکنیک دیگری بوده، در همان طبقه ثبت شده است. یافته ۴/۴ درصدی به‌طور مشخص نشان می‌دهد راه‌کار عملی در چه تعداد پیام، هسته اصلی معماری اقناعی بوده است.

جدول ۵-ب- نتایج تحلیل رگرسیون لجستیک: پیش‌بینی وجود تکنیک اقناعی روشن

پیش‌بین	نسبت شانس	فاصله اطمینان ۹۵ درصد	سطح معناداری
سال ۱۴۰۴ در برابر ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۳	۶/۲۹	۱۶/۷۷ تا ۲/۳۶	کمتر از ۰/۰۰۱
۱۱ تا ۲۰ واژه در برابر حداکثر ۱۰ واژه	۰/۸۷	۲/۲۸ تا ۰/۳۳	۰/۷۷۲
بیش از ۲۰ واژه در برابر حداکثر ۱۰ واژه	۲/۰۳	۶/۰۷ تا ۰/۶۸	۰/۲۰۴
ترکیبی محیطی-تلویزیونی در برابر محیطی	۱/۲۲	۳/۵۰ تا ۰/۴۳	۰/۷۱۰
دیجیتال/پیام‌رسان در برابر محیطی	۱/۸۷	۹/۷۴ تا ۰/۳۶	۰/۴۵۶
تلویزیونی/تیزر در برابر محیطی	۳/۸۲	۱۹/۹۰ تا ۰/۷۳	۰/۱۱۱
دارای لحن غالب در برابر فاقد لحن غالب	۰/۴۴	۰/۹۷ تا ۰/۲۰	۰/۰۴۳

یادداشت: در آزمون رابطه بستر و تکنیک اقناعی، بسترها به محیطی و غیرمحیطی ادغام شدند. در رگرسیون، طبقات مرجع عبارت بودند از سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۳، پیام حداکثر ده‌واژه‌ای، بستر محیطی و فقدان لحن غالب.

۴-۵-۱- تغییرات زمانی در تکنیک و قاب‌بندی

دوره انتشار هم با نوع تکنیک اقناعی و هم با وضوح قاب‌بندی رابطه معناداری داشت. در سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۳، ۳۸/۱٪ پیام‌ها فاقد تکنیک روشن بودند؛ این نسبت در سال ۱۴۰۴ به ۱۲/۷٪ کاهش یافت. در مقابل، سهم پیام‌های عدد و داده‌محور از ۱۸/۱٪ در دوره نخست به ۴۰٪ در سال ۱۴۰۴ رسید. بنابراین، تغییر دوره‌ای عمدتاً با کاهش پیام‌های فاقد تکنیک و افزایش داده‌محوری همراه بوده است. این یافته از صریح‌تر شدن سازوکار اقناع در پیام‌های متأخر حکایت دارد، نه لزوماً از افزایش راه‌کار عملی یا اثربخشی رفتاری.

وضوح قاب‌بندی نیز در دوره متأخر افزایش یافت. در سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۳، ۲۴/۸٪ پیام‌ها قاب قابل تشخیص داشتند؛ این مقدار در سال ۱۴۰۴ به ۷۸/۲٪ رسید. با این حال، از ۴۳ پیام قاب‌دار سال ۱۴۰۴، ۲۳ پیام قاب خنثی و هریک از قاب‌های سود و زیان ۱۰ پیام را شامل می‌شدند. از این‌رو، بهبود مشاهده‌شده بیش از آن که حاصل غلبه قاب سود یا زیان باشد، ناشی از کاهش پیام‌های فاقد جهت معنایی و افزایش قاب‌های خنثی بود.

۴-۵-۲- طول پیام، تکنیک اقناعی و وضوح قاب

طول پیام با نوع تکنیک اقناعی رابطه داشت. در پیام‌های بیش از ۲۰ واژه، ۶۰٪ تکنیک داده‌محور داشتند و پیام مستقلی با تکنیک غالب هشدار ثبت نشد. در پیام‌های حداکثر ده واژه‌ای، سهم داده‌محوری ۱۳/۲٪ و سهم هشدار ۲۶/۴٪ بود. این تفاوت نشان می‌دهد پیام‌های بلندتر بیشتر برای ارائه عدد و توضیح به کار رفته‌اند، درحالی‌که هشدار در قالب‌های کوتاه‌تر حضور بیشتری داشته است. این نتیجه به معنای برتری مطلق پیام بلند نیست. نسبت پیام‌های فاقد تکنیک روشن با افزایش طول، روند یکنواختی نداشت؛ بنابراین، طول بیشتر ممکن است نوع تکنیک مورد استفاده را تغییر دهد، اما به‌تنهایی وجود ساز و کار اقناعی روشن را تضمین نمی‌کند.

تکنیک اقناعی با وضوح قاب‌بندی نیز رابطه داشت. فقط ۲۱/۳٪ پیام‌های فاقد تکنیک روشن دارای قاب قابل تشخیص بودند؛ این نسبت در پیام‌های هشدارمحور به ۴۸/۵٪ و در پیام‌های داده‌محور به ۷۰/۷٪ می‌رسید. در نتیجه، پیام‌هایی که از تکنیک غالب مشخصی برخوردار بودند، به‌ویژه پیام‌های داده‌محور، بیشتر در یک جهت معنایی روشن سازمان یافته بودند. این هم‌زمانی، رابطه میان دو ویژگی ساختاری متن را نشان می‌دهد و دلالت علی ندارد.

۴-۵-۳- بستر انتشار و همسانی محتوای پیام‌ها

رابطه بستر انتشار و تکنیک اقناعی معنادار نبود. به بیان دیگر، در پیکره بررسی‌شده، توزیع تکنیک‌ها در پیام‌های محیطی و غیرمحیطی تفاوت آماری قابل اتکایی نداشت. این نتیجه به معنای یکسان بودن قابلیت‌های رسانه‌ها نیست؛ بسترهای محیطی، دیجیتال و تلویزیونی از نظر زمان مواجهه، امکان توضیح، تعامل و بازخورد ظرفیت‌های متفاوتی دارند.

یک تبیین محتمل آن است که بخشی از محتوا بدون بازطراحی متناسب، در چند بستر بازنشر یا همسان‌سازی شده باشد. در چنین شرایطی، تفاوت بالقوه رسانه‌ها به تفاوت در ساخت متن تبدیل نمی‌شود. از آن‌جا که این پژوهش فرایند تولید، اقتباس و بازنشر پیام‌ها را بررسی نکرده است، این توضیح باید به‌عنوان تفسیری محتمل و نه نتیجه‌ای اثبات‌شده در نظر گرفته شود.

۴-۵-۴- پیش‌بینی وجود تکنیک اقناعی روشن

در مرحله چندمتغیره، متغیر وابسته صرفاً نشان می‌داد پیام دارای تکنیک اقناعی روشن است یا نیست؛ بنابراین، این مدل نوع تکنیک -مانند داده، هشدار یا راه‌کار- را پیش‌بینی نمی‌کرد. این تمایز برای تفسیر تفاوت نتایج رگرسیون با برخی آزمون‌های خرد اهمیت دارد.

آزمون نسبت درست‌نمایی نشان‌داد مدل شامل دوره انتشار، طول، بستر و لحن، در مقایسه با مدل فاقد متغیرهای پیش‌بین، در مجموع معنادار بود (خی‌دو = $21/48$ ، درجه آزادی = 7 ، سطح معناداری = $0/03$). شبه‌ضریب تعیین مک‌فادن $0/111$ بود؛ بنابراین، مدل نسبت به مدل پایه بهبود معناداری داشت، هرچند قدرت تبیینی آن محدود بود. این مقدار را نمی‌توان همانند ضریب تعیین رگرسیون خطی، مستقیماً به‌صورت درصد واریانس تبیین‌شده تفسیر کرد.

با ثابت نگه‌داشتن سایر متغیرها، پیام‌های سال 1404 نسبت به پیام‌های سال‌های 1396 تا 1403 ، $6/29$ برابر شانس بیشتری برای برخورداری از تکنیک اقناعی روشن داشتند. فاصله اطمینان این برآورد نیز بالاتر از یک قرارداداشت؛ در نتیجه، دوره انتشار مهم‌ترین پیش‌بین مدل بود. این نتیجه با کاهش پیام‌های فاقد تکنیک در سال 1404 در تحلیل دومتغیره همسو است.

طول پیام در مدل چندمتغیره معنادار نبود. این یافته با رابطه معنادار طول و نوع تکنیک تعارض ندارد: آزمون خی‌دو نشان‌داد پیام‌های کوتاه و بلند از تکنیک‌های متفاوتی استفاده می‌کنند، درحالی‌که رگرسیون بررسی کرد آیا طول، اصل وجود یا فقدان تکنیک روشن را پیش‌بینی می‌کند. برپایه نتایج، طول با نوع تکنیک مرتبط بود، اما احتمال کلی برخورداری از تکنیک روشن را به‌طور مستقل توضیح نداد.

هیچ‌یک از طبقات بستر انتشار نیز در مدل پیش‌بین معناداری نبودند. فاصله‌های اطمینان گسترده، به‌ویژه برای بسترهای دیجیتال و تلویزیونی، نشان‌دهنده عدم قطعیت بیشتر برآوردها به‌دلیل فراوانی محدود این گروه‌ها است. از این‌رو، نسبت‌های شانس بالاتر از یک در این طبقات نباید نشانه قطعی برتری آن‌ها تلقی شوند.

وجود لحن غالب با کاهش شانس برخورداری از تکنیک اقناعی روشن همراه بود و این رابطه در مرز سطح متعارف معناداری

قرارداشت. این نتیجه به معنای اثر منفی لحن بر اقناع نیست. طبقه «دارای لحن غالب» مجموعه‌ای ناهمگن از لحن‌های آموزشی، توصیه‌ای، هشداردهنده، محاوره‌ای و داده‌مند را در بر می‌گرفت. یافته نشان می‌دهد مشخص‌بودن شیوه سخن‌گفتن، به‌تنهایی معادل برخورداری پیام از سازوکار اقناعی روشن نیست؛ پیام ممکن است لحن قابل تشخیصی داشته باشد، اما همچنان بر تکنیک غالب مشخصی استوار نباشد.

در مجموع، تحلیل‌های رابطه‌ای نشان دادند تغییر اصلی پیکره در دوره متأخر رخ داده است؛ پیام‌های سال 1404 از نظر تکنیک و قاب‌بندی روشن‌تر بودند. طول بیشتر با تغییر نوع تکنیک، به‌ویژه افزایش داده‌محوری، همراه بود، اما وجود تکنیک روشن را مستقلاً پیش‌بینی نکرد. بستر انتشار نیز بدون بازطراحی محتوای متناسب، عامل تمایزبخش آشکاری نبود. این نتایج زمینه لازم را برای گونه‌شناسی پیام‌ها بر اساس سازوکار غالب آن‌ها فراهم می‌کنند.

۴-۶- گونه‌شناسی تحلیلی پیام‌ها

برای جمع‌بندی الگوی تکنیک‌های غالب، طبقات تفصیلی در قالب شش گونه بازآرایی شدند. این گونه‌شناسی، بازنمایی تحلیلی داده‌های کدگذاری‌شده است و از روش خوشه‌بندی یا استخراج گونه‌های پنهان حاصل نشده است. نتایج این بازآرایی و گونه‌شناسی تحلیلی در جدول ۶ ارائه شده است.

گونه شعارگونه یا کم‌تکنیک با 64 پیام و سهم 40 درصدی، بزرگ‌ترین گونه پیکره بود. این گروه، پیام‌های فاقد تکنیک روشن و پیام‌های متکی بر توصیه، شعار یا دعوت عمومی را در بر می‌گیرد. تفکیک این گونه از پیام‌های ارزشی-هنجاری اهمیت دارد؛ زیرا توصیه عمومی فاقد سازوکار مشخص با پیامی که آگاهانه از مسئولیت اخلاقی، دینی یا اجتماعی استفاده می‌کند، از نظر معماری اقناعی یکسان نیست.

جدول ۶- گونه‌شناسی تحلیلی پیام‌های مدیریت مصرف آب تهران

گونه پیام	مبنای تشخیص	فراوانی	درصد	ویژگی اصلی
داده‌محور	عدد، آمار، محاسبه یا معادل‌سازی	۴۱	۲۵/۶	مسئله را اندازه‌پذیر و ملموس می‌کند.
هشدارمحور	تهدید، کمبود، وضعیت بحرانی یا پیامد منفی	۳۳	۲۰/۶	فوریت و جدیت مسئله را برجسته می‌کند.
رفتاری/راهنما	رفتار مشخص و قابل انجام	۷	۴/۴	مخاطب را مستقیماً به کنش معین هدایت می‌کند.
شعارگونه/کم‌تکنیک	فقدان تکنیک روشن یا توصیه و دعوت عمومی	۶۴	۴۰/۰	بر یادآوری، کلی‌گویی یا توصیه غیرعملیاتی تکیه دارد.
ارزشی - هنجاری	ارزش دینی و اخلاقی یا کنش اجتماعی و اخلاقی	۱۰	۶/۲	مصرف را به مسئولیت اخلاقی یا جمعی پیوند می‌دهد.
مرجع‌محور	اعتبار منبع، چهره یا گروه مرجع	۵	۳/۱	پذیرش پیام را بر اعتبار اجتماعی استوار می‌کند.
جمع		۱۶۰	۱۰۰	

دیده شدن، کیفیت اقناع را تضمین نمی کنند. نزدیک به یک سوم پیامها فاقد تکنیک اقناعی روشن و بیش از نیمی از آنها فاقد قاب بندی قابل تشخیص بودند. تکنیک های عدد، داده و معادل سازی و سپس هشدار و تهدید بیشترین سهم را داشتند؛ درحالی که راه کار عملی مستقیم فقط در ۴/۴٪ پیامها تکنیک غالب بود. این توزیع نشان می دهد پیامها در ملموس کردن ابعاد بحران و برجسته سازی فوریت آن فعال تر از تبدیل مسئله به رفتار روزمره بوده اند.

گونه شناسی پیامها نیز همین عدم توازن را تأیید کرد. بزرگ ترین گونه، پیامهای شعارگونه یا کم تکنیک بود و پس از آن، پیامهای داده محور و هشدارمحور قرار داشتند. پیامهای رفتاری یا راهنما، ارزشی-هنجاری و مرجع محور سهم محدودتری داشتند. بنابراین، ضعف پیکره را نباید به نبود کامل عناصر اقناعی فروکاست؛ مسئله، توزیع نامتوازن این عناصر و قرارنگرفتن رفتار مشخص، منبع معتبر و تنوع هنجاری در مرکز معماری بیشتر پیامهاست.

در عین حال، نتایج از بهبودهایی در دوره متأخر حکایت داشت. در سال ۱۴۰۴، سهم پیامهای فاقد تکنیک روشن کاهش و سهم پیامهای داده محور و دارای قاب قابل تشخیص افزایش یافت. رگرسیون لجستیک نیز نشان داد با کنترل طول، بستر و لحن، پیامهای این سال شانس بیشتری برای برخورداری از تکنیک اقناعی روشن داشتند. این تحول بیانگر حرکت به سوی صورت بندی صریح تر پیام است، اما افزایش داده محوری و وضوح قاب لزوماً به معنای افزایش راه کار عملی یا اثربخشی رفتاری نیست.

طول پیام با نوع تکنیک اقناعی رابطه داشت، ولی در مدل چندمتغیره وجود یا فقدان تکنیک روشن را به طور معنادار پیش بینی نکرد. بستر انتشار نیز با نوع تکنیک رابطه معناداری نداشت. این نتیجه نشان می دهد انتقال پیام به رسانه ای متفاوت، بدون بازطراحی متن متناسب با ظرفیت آن رسانه، الزاماً ساخت اقناعی پیام را تغییر نمی دهد. بازنشر محتوای مشابه در بیلورد، تلویزیون یا رسانه دیجیتال ممکن است تفاوت بالقوه این بسترها را در سطح متن خنثی کند.

همچنین، مشخص بودن لحن به تنهایی تضمین کننده وجود تکنیک اقناعی روشن نبود. پیام می تواند با لحنی آموزشی، توصیه ای یا هشداردهنده نوشته شود، اما هم چنان فاقد سازوکاری مشخص برای اثرگذاری باشد. از این رو، طراحی پیام باید میان شیوه سخن گفتن، تکنیک اقناعی، قاب معنایی و رفتار پیشنهادی هماهنگی ایجاد کند؛ هیچ یک از این عناصر به تنهایی جایگزین دیگری نیست.

دو گونه داده محور و هشدارمحور روی هم ۷۴٪ پیام، معادل ۴۶٪/۲ پیکره را تشکیل دادند. در مقابل، گونه رفتاری یا راهنما فقط شامل هفت پیام بود. این توزیع نشان می دهد عدم توازن اصلی پیکره میان «نمایش و توضیح بحران» و «صورت بندی رفتار» قرار دارد: پیامها در اندازه پذیر کردن کمبود، برجسته سازی خطر و یادآوری ضرورت صرفه جویی فعال ترند تا در ارائه کنش مشخص.

پیامهای ارزشی-هنجاری و مرجع محور در مجموع ۱۵٪ پیام را شامل شدند. سهم محدود این دو گونه نشان می دهد منابع اخلاقی، اجتماعی و اعتباری در مقایسه با عدد و هشدار کمتر به عنوان سازوکار غالب به کار رفته اند. این امر در زمینه نا همگن تهران اهمیت دارد؛ زیرا چارچوب مفهومی مقاله نشان می دهد گروه مرجع، ارزش مشترک و شبکه اجتماعی می توانند در برخی مخاطبان منابع مهم معنا و اعتبار باشند.

گونه شناسی حاصل با تمایز میان پیامهای آگاهی بخش، هشداردهنده و اقناع کننده برای عمل در مطالعه Sánchez et al. (2024) هم راستا است، اما الگوی تهران را با جزئیات بیشتری نشان می دهد. در این پیکره، بهبود دوره متأخر عمدتاً در افزایش تکنیک های داده محور و وضوح قاب بندی مشاهده می شود، درحالی که راه کار عملی مستقیم هم چنان سهم محدودی دارد. بنابراین، جمع بندی بخش یافته ها آن است که مسئله اصلی نه فقدان کامل عناصر اقناعی، بلکه توزیع نامتوازن آنها است: حضور محیطی، ایجاز، داده و هشدار برجسته اند، اما رفتار مشخص، اعتبار منبع و تنوع هنجاری در مرکز معماری بیشتر پیامها قرار نگرفته اند.

۵- نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه گیری

یافته های پژوهش نشان داد ارزیابی پیام رسانی مدیریت مصرف آب را نمی توان به تعداد پیامها یا گستره حضور آنها در فضای شهری محدود کرد. پیکره بررسی شده از نظر انتشار محیطی، ایجاز متنی و افزایش سهم پیامهای دوره متأخر فعال بود؛ با این حال، معماری درونی پیامها در همه موارد از وضوح اقناعی و جهت دهی رفتاری متناسب برخوردار نبود. مسئله اصلی، کمبود مطلق پیام نیست، بلکه فاصله میان پیامی است که در معرض دید قرار می گیرد و پیامی که رفتار مشخص و قابل انجामी را برای مخاطب صورت بندی می کند.

غلبه تبلیغات محیطی و پیامهای حداکثر ده واژه ای با الزامات مواجهه سریع در فضای شهری سازگار است، اما کوتاهی و

شش اصل می‌تواند مبنای طراحی و بازبینی پیام‌های آینده باشد که در جدول ۷ ارائه شده است.

اصل نخست، جایگزین کردن توصیه کلی با رفتار محدود و مشاهده‌پذیر است. عباراتی مانند «صرفه‌جویی کنیم» یا «آب را هدر ندهیم» ضرورت اخلاقی مسئله را یادآوری می‌کنند، اما تصمیم بعدی مخاطب را روشن نمی‌سازند. پیام رفتاری باید تا حد امکان مشخص کند چه کسی، چه اقدامی را، در چه موقعیتی و در چه زمانی انجام دهد. کاهش زمان استحمام، بررسی نشستی، استفاده کامل از ظرفیت ماشین لباس‌شویی و اصلاح زمان آبیاری، از رفتارهایی هستند که قابلیت صورت‌بندی روشن دارند.

اصل دوم، ایجاد تعادل میان تهدید و امکان اقدام است. هشدار زمانی به جهت‌دهی رفتاری نزدیک می‌شود که مخاطب، علاوه بر جدی‌بودن مسئله، مؤثر و امکان‌پذیر بودن پاسخ پیشنهادی را نیز درک کند. پیام‌هایی که فقط از بحران، کمبود یا پیامدهای منفی سخن می‌گویند، ممکن است توجه ایجاد کنند، اما لزوماً مسیر اقدام را نمی‌سازند. از این رو، هر هشدار باید دست‌کم با یک رفتار متناسب، کوتاه و قابل اجرا همراه شود.

برآیند یافته‌ها ضرورت گذار از منطق «اگران پیام» به منطق «طراحی رفتار» را برجسته می‌کند. در این رویکرد، تولید پیام با انتخاب شعار آغاز نمی‌شود، بلکه ابتدا رفتار هدف، مخاطب، موقعیت مواجهه و مانع احتمالی مشخص می‌شود؛ سپس لحن، تکنیک، قاب و بستر متناسب با آن انتخاب می‌شوند. پیام مطلوب لزوماً بلند یا پیچیده نیست، بلکه در محدودیت زمانی و رسانه‌ای خود روشن می‌کند مخاطب چه کاری انجام دهد، چرا آن رفتار اهمیت دارد و چگونه کنش فردی او به پیامدی قابل فهم پیوند می‌خورد.

۵-۲- پیشنهادهایی برای طراحی پیام مبتنی بر یافته‌ها

یافته‌ها نشان می‌دهند بهبود پیام‌رسانی مدیریت مصرف آب بیش از افزایش تعداد پیام‌ها، به بازطراحی منطق تولید آن‌ها وابسته است. نقطه آغاز این فرایند نباید انتخاب شعار یا رسانه باشد، بلکه باید ابتدا رفتار هدف، مخاطب، مانع انجام رفتار و نتیجه مورد انتظار مشخص شود. سپس تکنیک اقناعی، قاب معنایی، لحن و بستر انتشار در خدمت همان رفتار قرار گیرند. بر این اساس،

جدول ۷- راهنمای طراحی و بازبینی پیام‌های مدیریت مصرف آب

اصل طراحی	پرسش کنترل پیش از انتشار	نمونه پیام پیشنهادی
صورت‌بندی رفتار مشخص	آیا مخاطب پس از خواندن پیام دقیقاً می‌داند چه کاری، در چه موقعیتی و چه زمانی انجام دهد؟	چکه شیرها و نشستی فلاش‌تانک را همین امروز بررسی و برطرف کنید.
همراه کردن هشدار با کارآمدی	آیا پیام در کنار بیان خطر، پاسخی روشن، مؤثر و در توان مخاطب ارائه می‌کند؟	مصرف بالا فشار بر شبکه را بیشتر می‌کند؛ زمان دوش را دو دقیقه کاهش دهید.
پیوند داده با کنش روزمره	آیا عدد، آمار یا معادل‌سازی به رفتار قابل فهمی برای مخاطب منتهی می‌شود؟	روزانه بیش از ۳ میلیارد لیتر آب در تهران مصرف می‌شود؛ سهم شما از کاهش مصرف، از یک دوش کوتاه‌تر آغاز می‌شود.
انتخاب قاب واحد و منسجم	آیا پیام به‌روشنی بر منفعت، پیشگیری از زیان یا مسئولیت جمعی تأکید می‌کند؟	با رفع نشستی امروز، به پایداری آب ساختمان در روزهای پرمصرف کمک کنید.
تناسب پیام با مخاطب و موقعیت	آیا زبان، رفتار پیشنهادی و مرجع پیام با نقش و شرایط مخاطب سازگار است؟	مدیر ساختمان: مخزن و مشاعات را این هفته از نظر نشستی بررسی کنید.
طراحی متناسب با بستر و پیوند رسانه‌ها	آیا هر رسانه متناسب با ظرفیت خود به کار رفته و مسیر دریافت توضیح بیشتر فراهم شده است؟	دوش کوتاه‌تر: آب پایدارتر. آموزش ۳۰ ثانیه‌ای را با رمزینه (QR) (کد) پاسخ سریع ببینید.

اصل چهارم، انسجام قاب معنایی است. پیام باید از ابتدا مشخص کند که مسئله را از منظر حفظ منفعت، جلوگیری از زیان، مسئولیت اجتماعی، عدالت مصرف یا پایداری تأمین عرضه می‌کند. ترکیب هم‌زمان چند قاب نامنسجم، مانند هشدار شدید، توصیه اخلاقی و وعده منفعت شخصی، ممکن است جهت اصلی پیام را مبهم کند. انتخاب یک قاب غالب، به هماهنگی واژگان، لحن، تصویر و رفتار پیشنهادی کمک می‌کند. اصل پنجم، پرهیز از پیام یکسان برای مخاطبان متفاوت است.

اصل سوم، تبدیل داده به معنای قابل استفاده است. عدد و آمار نباید در متن به نمایش بزرگی بحران محدود شوند، بلکه باید سهم مخاطب و نسبت کنش فردی با نتیجه جمعی را روشن کنند. رقم کلان هنگامی اقناع‌کننده‌تر است که با موقعیت آشنا، زمان مشخص یا رفتار روزمره پیوند بخورد. اعداد مورد استفاده نیز باید رسمی، قابل استناد و متناسب با زمان انتشار باشند؛ در غیر این صورت، داده به جای تقویت اعتبار پیام، می‌تواند آن را تضعیف کند.

ابزارهای هوش مصنوعی به عنوان ابزار کمکی استفاده شده است. لازم به ذکر است؛ بررسی، اعتبارسنجی و انتخاب منابع برای تدوین نهایی مقاله توسط نویسندگان انجام شده است.

۸- مراجع

- بابایی سارویی، ع.، (۱۳۹۷)، "ارتباطات اقناعی آگهی های تولیدی سازمان آبفا با محوریت صرفه جویی آب: مورد مطالعه آگهی های سال ۱۳۹۶"، *نامه فرهنگ و ارتباطات*، ۳(۱)، ۱۱۷-۱۳۸، <https://doi.org/10.30497/lcc.2018.2707>
- توحیدی، م.، آزادارمکی، ت.، جلایی پور، ح.، و باقری، ع.، (۱۴۰۲)، "مسئله آب و شکل گیری تعادل سیاسی-اجتماعی در توسعه جامعه ایرانی (مورد مطالعه: نظام مدیریت آب در حوضه زاینده رود)"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۸(۲)، ۵۶-۶۵، <https://doi.org/10.22112/JWWSE.2022.360412.1327>
- جلیوند خسروی، م.، و کریمی، م.، (۱۴۰۲)، "راه کارهای اقناع رسانه ای مخاطبان به منظور مدیریت مصرف آب"، *رسانه و فرهنگ*، ۱۳(۱)، ۳۵-۶۳، <https://doi.org/10.30465/ismc.2023.43702.2661>
- جهانگیری، ع.، (۱۳۹۸)، "رتبه بندی راهبردهای مدیریت مصرف در شبکه های توزیع آب شرب با استفاده از تصمیم گیری چندشاخصه"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۴(۲)، ۱۷-۲۶، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2019.159573.1125>
- داداشی دیوکلایی، ح.، ثریایی، ع.، و نبوی چاشمی، س.، (۱۴۰۰)، "شناسایی و بررسی عوامل تأثیرگذار بر مصرف آب خانگی با رویکرد ترکیبی Delfi و Topsis فازی"، *فصلنامه آب و توسعه پایدار*، ۸(۴)، ۱۱-۲۲، <https://doi.org/10.22067/jwsd.v8i4.2107.1061>
- رضائی، م.، (۱۴۰۱)، "بحران آب: دوراهی اجتماعی"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۷(۴)، ۴-۱۶، <https://doi.org/10.22112/JWWSE.2022.330611.1311>
- سجادی فر، س. ح.، و خیابانی، ناصر.، (۱۳۹۰)، "مدل سازی تقاضای آب خانگی با استفاده از روش مدل عوامل تصادفی، مطالعه موردی: شهر اراک"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۲(۳)، ۵۹-۶۸.

فاضلی مقدم، م.، مظفری، ا.، و خانیکی، ه.، (۱۴۰۳)، "شناسایی مولفه های الگوی اقناع افکار عمومی در رسانه های اجتماعی: یک مطالعه سنتز پژوهی"، *مطالعات رسانه های نوین*، ۱۰(۳۹)، ۴۱-۶۸.

<https://doi.org/10.22054/nms.2025.74481.1591>
Abu Bakar, M.F., Wu, W., Proverbs, D., and Mavritsaki, E., (2024), "The role of emotional appeal in water conservation communication: A framework for social

خانواده ها، مدیران ساختمان، مدارس، کسب و کارها و کاربران رسانه های اجتماعی از نظر اختیار، مانع رفتاری، دانش و موقعیت مصرف یکسان نیستند. پیام مؤثر باید رفتار متناسب با نقش مخاطب را پیشنهاد کند. منابع دینی، اخلاقی، خانوادگی، حرفه ای یا محلی نیز هنگامی می توانند اعتبار پیام را افزایش دهند که با زمینه مخاطب ارتباط واقعی داشته باشند و صرفاً برای تزئین متن به کار نروند.

اصل ششم، جایگزین کردن باز نشر یکسان با طراحی متناسب با رسانه است. تبلیغ محیطی برای جلب توجه و یادآوری یک رفتار کوتاه مناسب است؛ رسانه دیجیتال می تواند شیوه انجام رفتار را نمایش دهد، توضیح تکمیلی ارائه کند و امکان بازخورد یا پیگیری فراهم آورد؛ تلویزیون نیز ظرفیت روایت و نمایش پیامد رفتار را دارد. بنابراین، یک پویش منسجم می تواند از پیام محیطی به عنوان نقطه تماس اولیه و از رسانه های تعاملی برای آموزش، تشریح و تثبیت رفتار استفاده کند.

اجرای این اصول بهتر است در قالب یک فرایند کنترل کیفیت انجام شود. پیش از انتشار، هر پیام باید از نظر وضوح رفتار پیشنهادی، فهم پذیری، اعتبار داده، تناسب لحن، برداشت های ناخواسته و سازگاری با بستر، نزد نمونه ای از مخاطبان هدف آزموده شود. مقایسه چند نسخه کوتاه، سنجش یادآوری و فهم و بررسی امکان انجام رفتار می تواند پیش از اجرای گسترده، ضعف های پیام را آشکار کند.

نمونه های جدول، الگوهایی برای نشان دادن منطق طراحی اند و اثربخشی آن ها بر پایه پژوهش حاضر اثبات نشده است. سنجش اثر واقعی مستلزم مقایسه پیام ها در طرح های آزمایشی یا شبه آزمایشی و، در صورت دسترسی، پیوند نتایج ارتباطی با داده های مصرف است. پژوهش های آینده می توانند اثربخشی قاب های سود و زیان، هشدارهای همراه و فاقد راه کار، پیام های عمومی و مخاطب محور و نیز ترکیب متن با عناصر دیداری و چندرسانه ای را مقایسه کنند.

۶- اظهارنامه مالی

این مقاله مستخرج از رساله دکتری نویسنده اول بوده و تاکنون از هیچ گونه حمایت مالی و کمک هزینه پژوهشی استفاده نشده است.

۷- اظهارنامه نحوه استفاده از هوش مصنوعی

در فرایند جست و جو و گردآوری اولیه منابع علمی این مقاله، از



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

- media engagement", *Sustainable Water Resources Management*, 10(4), 151, <https://doi.org/10.1007/s40899-024-01132-0>
- Ajzen, I., (1991), "The theory of planned behavior", *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50(2), 179-211, [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90020-T](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T)
- Entman, R.M., (1993), "Framing: Toward clarification of a fractured paradigm", *Journal of Communication*, 43(4), 51-58, <https://doi.org/10.1111/j.1460-2466.1993.tb01304.x>
- Jorgensen, B., Graymore, M., and O'Toole, K., (2009), "Household water use behavior: An integrated model", *Journal of Environmental Management*, 91(1), 227-236, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.08.009>
- Kahneman, D., and Tversky, A., (1979), "Prospect theory: An analysis of decision under risk", *Econometrica*, 47(2), 263-291, <https://doi.org/10.2307/1914185>
- Koop, S.H.A., Van Dorssen, A.J., and Brouwer, S., (2019), "Enhancing domestic water conservation behaviour: A review of empirical studies on influencing tactics", *Journal of Environmental Management*, 247, 867-876, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.126>
- Krippendorff, K., (2019), *Content analysis: An introduction to its methodology*, 4th Edition, SAGE Publications, Thousand Oaks, CA.
- Lombard, M., Snyder-Duch, J., and Bracken, C.C., (2002), "Content analysis in mass communication: Assessment and reporting of intercoder reliability", *Human Communication Research*, 28(4), 587-604, <https://doi.org/10.1111/j.1468-2958.2002.tb00826.x>
- Rothman, A.J., and Salovey, P., (1997), "Shaping perceptions to motivate healthy behavior: The role of message framing", *Psychological Bulletin*, 121(1), 3-19, <https://doi.org/10.1037/0033-2909.121.1.3>
- Russell, S., and Fielding, K., (2010), "Water demand management research: A psychological perspective", *Water Resources Research*, 46(5), W05302, <https://doi.org/10.1029/2009WR008408>
- Sánchez, C., Bianchi, E.C., Rodriguez-Sanchez, C., and Sancho-Esper, F., (2024), "Are advertising campaigns for water conservation in Latin America persuasive? A mixed-method approach", *International Review on Public and Nonprofit Marketing*, 21, 341-369, <https://doi.org/10.1007/s12208-023-00386-2>
- Tannenbaum, M.B., Hepler, J., Zimmerman, R.S., Saul, L., Jacobs, S., Wilson, K., and Albarracín, D., (2015), "Appealing to fear: A meta-analysis of fear appeal effectiveness and theories", *Psychological Bulletin*, 141(6), 1178-1204, <https://doi.org/10.1037/a0039729>
- UN-Water, (2024). *The United Nations world water development report 2024: Water for prosperity and peace*, Paris: UNESCO, <https://doi.org/10.54679/WZDQ6209>
- Witte, K., (1992), "Putting the fear back into fear appeals: The extended parallel process model", *Communication Monographs*, 59(4), 329-349, <https://doi.org/10.1080/03637759209376276>

Research Paper

مقاله پژوهشی

Evaluation of the Efficiency of Chitosan-Supported Mesoporous SBA-15 Nanocomposite for the Removal of Methyl Orange from Aqueous Solutions

Sara Mehri¹, Mohammad Saleh Shafeeyan^{2*},
Mohammad Habibi Juybari³

1- M.Sc., Department of Chemical Engineering,
Faculty of Engineering, Golestan University, Aliabad
Katoul, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Chemical
Engineering, Faculty of Engineering, Golestan
University, Aliabad Katoul, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Chemistry,
Islamic Azad University, Gorgan Branch, Gorgan,
Iran.

*Corresponding Author, Email: ms.shafeeyan@gmail.com

Received: 17/12/2025

Revised: 26/05/2026

Accepted: 14/07/2026

© IWWA

Abstract

Organic dyes released into industrial effluents are considered among the most hazardous pollutants in aquatic environments due to their chemical stability, toxicity, and resistance to biodegradation. In this study, a chitosan-supported mesoporous SBA-15 nanocomposite (CTS/SBA-15) was successfully synthesized and evaluated for the removal of methyl orange from aqueous solutions. The structural and physicochemical properties of the synthesized adsorbent were characterized using Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM) and, Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area analysis, confirming the successful formation of the nanocomposite with desirable surface characteristics. The effects of operational parameters including adsorbent dosage, initial dye concentration, pH, contact time, and temperature on the adsorption performance were systematically investigated. The results revealed that the adsorption efficiency was strongly influenced by the operating conditions, where decreasing pH, increasing adsorbent dosage, and prolonging contact time enhanced the removal efficiency, while increasing initial dye concentration and temperature reduced the adsorption performance. The maximum methyl orange removal efficiency (approximately 94%) was achieved at pH 5, adsorbent dosage of 0.16 g, contact time of 30 min, temperature of 25 °C, and initial dye concentration of 1 mg L⁻¹. Kinetic investigations demonstrated that the pseudo-second-order model provided the best agreement with the experimental data, indicating the significant role of surface interactions in the adsorption process. In addition, the equilibrium data were better fitted by the Langmuir isotherm model, with a maximum adsorption capacity of 2.39 mg g⁻¹, suggesting monolayer adsorption on the adsorbent surface. Thermodynamic analysis further confirmed the spontaneous and exothermic nature of the adsorption process. Moreover, the CTS/SBA-15 nanocomposite exhibited satisfactory stability and reusability after several adsorption-desorption cycles. Overall, the synthesized CTS/SBA-15 nanocomposite can be considered an effective and reusable adsorbent for the removal of anionic dyes from aqueous environments, offering a sustainable and environmentally friendly approach for dye-contaminated wastewater treatment.

Keywords: Methyl Orange; Chitosan; Mesoporous Nanocomposite; SBA-15; Aqueous Solutions.

بررسی کارایی نانوجاذب مزومتخلخل SBA-15 نشانداده شده بر روی کیتوسان در حذف رنگ متیل اورانژ از محلول های آبی

سارا مهری^۱، محمد صالح شفیعیان^{۲*} و محمد حبیبی جویباری^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، علی آباد کتول، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، علی آباد کتول، ایران.

۳- استادیار گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرگان، گرگان، ایران.

*نویسنده مسئول، ایمیل: ms.shafeeyan@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۵/۰۳/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۳

© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

رنگ‌زاهای آلی موجود در پساب‌های صنعتی به دلیل پایداری شیمیایی، سمیت و مقاومت در برابر تجزیه زیستی، از مهم‌ترین آلاینده‌های محیط‌های آبی محسوب می‌شوند. در این پژوهش، نانوکامپوزیت مزومتخلخل SBA-15 تثبیت‌شده بر پایه کیتوسان (CTS/SBA-15) به منظور حذف رنگ آنیونی متیل اورانژ از محلول‌های آبی سنتز و عملکرد آن در فرآیند جذب مورد بررسی قرار گرفت. ویژگی‌های ساختاری و فیزیکوشیمیایی جاذب با استفاده از آنالیزهای طیف‌سنجی مادون قرمز با تبدیل فوریه (FT-IR)، پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، اندازه‌گیری سطح ویژه برپایه مدل بروناور-امت-تالر (BET) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن تشکیل موفق ساختار و ویژگی‌های مناسب سطحی جاذب را تأیید کرد. سپس اثر پارامترهای عملیاتی شامل مقدار جاذب، غلظت اولیه رنگ، pH، زمان تماس و دما بر کارایی حذف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که راندمان حذف به شدت تحت تأثیر شرایط عملیاتی قرار دارد؛ به‌طوری‌که کاهش pH، افزایش مقدار جاذب و افزایش زمان تماس موجب افزایش راندمان حذف شدند، درحالی‌که افزایش غلظت اولیه رنگ و دما موجب کاهش راندمان حذف شدند. بیشترین راندمان حذف متیل اورانژ (حدود ۹۴٪) در pH = ۵، مقدار جاذب ۰/۱۶ g، زمان تماس ۳۰ min، دمای ۲۵ °C و غلظت اولیه ۱ mg L⁻¹ مشاهده شد. بررسی سینتیک جذب نشان داد که مدل شبه درجه دوم تطابق بهتری با داده‌های تجربی دارد که بیانگر نقش غالب برهم‌کنش‌های سطحی در کنترل فرآیند جذب است. هم‌چنین، داده‌های تعادلی با مدل لانگمویر سازگاری بیشتری داشتند و حداکثر ظرفیت جذب براساس این مدل برابر با ۲/۳۹ mg g⁻¹ به‌دست آمد که نشان‌دهنده تشکیل تک‌لایه جذب بر سطح جاذب است. نتایج ترمودینامیکی نیز نشان داد که فرآیند جذب ماهیتی گرمازا و خودبه‌خودی دارد. علاوه بر این، نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 پس از چندین سیکل جذب-واحد، پایداری و قابلیت بازیابی مناسبی از خود نشان داد. در مجموع، یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 می‌تواند به‌عنوان جاذبی مؤثر و قابل بازیابی برای حذف رنگ‌های آنیونی از محیط‌های آبی مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: متیل اورانژ، کیتوسان، نانوکامپوزیت مزومتخلخل، SBA-15، محلول‌های آبی.

زمان بر بودن، نیاز به تجهیزات پیشرفته، تولید لجن ثانویه و یا محدودیت‌های مرتبط با پایداری عملیاتی روبرو هستند. در این میان، فرآیند جذب سطحی به دلیل مزایایی نظیر بازده بالا، قابلیت بازیافت جاذب، عدم تولید لجن، سهولت بهره‌برداری و هزینه‌های عملیاتی پایین، توجه ویژه‌ای را در بین پژوهشگران به خود جلب کرده است (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۲). با وجود این، عملکرد فرآیند جذب به طور قابل توجهی تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی جاذب، pH محیط، دمای سیستم، زمان تماس و پایداری جاذب در سیکل‌های متوالی جذب-واحد قرار دارد. علاوه بر این، اشباع تدریجی سایت‌های فعال و کاهش احتمالی راندمان در استفاده مجدد از جاذب، از جمله محدودیت‌های قابل توجه این روش محسوب می‌شوند که توسعه جاذب‌های پایدار و قابل بازیابی را ضروری می‌سازد. در میان جاذب‌های متداول، موادی مانند کربن فعال، زئولیت‌های غربال مولکولی، آلومینا، سیلیس فعال شده و جاذب‌های پلیمری مختلف به کار گرفته شده‌اند (فرهادیان و همکاران، ۱۳۹۶).

در سال‌های اخیر، نانومواد مزومتخلخل سیلیسی مانند SBA-15 به دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی از جمله سطح ویژه بالا، توزیع یکنواخت و منظم حفرات، اندازه منافذ قابل کنترل، زیست‌سازگاری، پایداری شیمیایی، امکان اصلاح سطحی با گروه‌های عاملی، هزینه تولید پایین و قابلیت تجزیه‌پذیری، به طور گسترده در مطالعات حذف آلاینده‌های رنگی و فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Costa et al., 2021). در این نانوذرات، گروه‌های عاملی سیلانول (SiOH) نقش مهمی در برهم‌کنش با آلاینده‌ها و جذب آن‌ها ایفا می‌کنند. از سوی دیگر، کیتوسان (CTS) به عنوان یک پلیمر زیستی مشتق شده از کیتین، به دلیل دارا بودن گروه‌های عاملی آمین و هیدروکسیل، ظرفیت بالایی در حذف رنگ‌های آنیونی از محلول‌های آبی از خود نشان داده است. این گروه‌ها به عنوان مراکز فعال جذب عمل کرده و توانایی برهم‌کنش با ترکیبات رنگی را دارند. پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که ترکیب هیبریدی کیتوسان با ساختارهای سیلیکایی مانند SBA-15 یا سایر ساختارهای سیلوکسانی، عملکرد مطلوبی در حذف رنگ‌های آلی از پساب‌ها داشته و می‌تواند رویکردی مؤثر و اقتصادی تلقی شود (Pal et al., 2021).

Gao et al. (2014) مجموعه‌ای از نانوکامپوزیت‌های کیتوسان/SBA-15 با مقادیر مختلف کیتوسان سنتز کرده و ظرفیت جذب آن‌ها را با استفاده از رنگ آزو Acid Red 12 مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه، اثر پارامترهایی نظیر pH، قدرت یونی، زمان تماس، دما و غلظت اولیه رنگ بر عملکرد جذب

آب به عنوان منبعی حیاتی برای بقای انسان و سایر موجودات زنده، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. با پیشرفت فناوری و گسترش فعالیت‌های صنعتی، منابع آب شیرین در سراسر جهان با کاهش چشمگیر مواجه شده و در معرض تهدید آلودگی‌های متنوع قرار گرفته‌اند، تا جایی که کمبود آب به یکی از چالش‌های بزرگ قرن بیست و یکم تبدیل شده است. افزایش جمعیت جهانی موجب رشد تقاضا برای آب شده و پیش‌بینی می‌شود که در دهه‌های آینده، بحران آب به عنوان یکی از دلایل اصلی بروز جنگ‌ها و مهاجرت‌های جمعیتی مطرح شود (Babuji et al., 2023). در این میان، منطقه خاورمیانه و به ویژه ایران، به عنوان دومین کشور بزرگ این منطقه، به شدت تحت تأثیر بحران آب قرار گرفته است. سرانه منابع آب تجدیدپذیر در ایران کمتر از ۱۷۰۰ متر مکعب در سال برآورد می‌شود، که این مقدار بسیار کمتر از میانگین جهانی (۷۰۰۰ متر مکعب) است. این میزان آب نه تنها پاسخ‌گوی نیازهای کشاورزی، صنعتی و خانگی نیست، بلکه در اغلب موارد به دلیل آلودگی به فلزات سنگین، نیتрат، ترکیبات آلی رنگ‌زا و دیگر مواد سمی، از کیفیت کافی برای مصارف انسانی برخوردار نیست (Mirzavand and Bagheri, 2020).

در میان آلاینده‌های آلی، رنگ‌زاهای سنتزی مورد استفاده در صنایع مختلف نظیر نساجی، کاغذسازی، پلاستیک، آرایشی، دارویی و غذایی، به دلیل پایداری شیمیایی، سمیت بالا و تمایل به زیست‌تجمع‌پذیری، از مهم‌ترین منابع آلاینده‌های محیط‌زیستی محسوب می‌شوند. برآوردها نشان می‌دهد که حدود ۱۰-۱۵٪ از رنگ‌های آزو به طور مستقیم وارد محیط‌زیست می‌شوند و با تجزیه در شرایط خاص، می‌توانند بیش از ۲۰ نوع آمین آروماتیک سرطان‌زا تولید کنند. غلظت رنگ‌های آزو در پساب صنایع نساجی و رنگ‌سازی معمولاً در محدوده چند تا چند صد میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است که می‌تواند منجر به بروز آثار نامطلوبی بر کیفیت منابع آبی شود. علاوه بر این، این رنگ‌ها با ایجاد ممانعت از نفوذ نور خورشید به لایه‌های زیرین آب، فرآیندهای زیستی اکوسیستم‌های آبی را دچار اختلال می‌کنند (علی‌محمدی و همکاران، ۱۴۰۳).

در مواجهه با این چالش، روش‌های گوناگونی برای حذف آلاینده‌های رنگی از منابع آبی توسعه یافته‌اند؛ از جمله جذب سطحی، انعقاد شیمیایی، فیلتراسیون غشایی، تبادل یونی، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته و استفاده از میکروارگانیسم‌ها. با این حال، اغلب این روش‌ها با چالش‌هایی مانند هزینه‌های بالا،

نانوکامپوزیت و عملکرد جذبی آن به صورت جامع و یکپارچه مورد بررسی قرار نگرفته است. این موضوع نشان‌دهنده وجود یک خلأ تحقیقاتی در توسعه جاذب‌های هیبریدی با ساختار کنترل‌شده و عملکرد جذبی مطلوب است.

در این راستا، نوآوری اصلی این پژوهش در توسعه نانوکامپوزیت هیبریدی CTS/SBA-15 با حفظ ساختار منظم مزومتخلخل و تقویت برهم‌کنش میان فاز سیلیسی و کیتوسان نهفته است؛ به گونه‌ای که منجر به افزایش مراکز فعال سطحی بهبود عملکرد جذب می‌شود. بر این اساس، با توجه به چالش‌های محیط‌زیستی ناشی از حضور رنگ‌های مصنوعی در منابع آبی، هدف اصلی این پژوهش بررسی عملکرد نانوجاذب سنتز شده CTS/SBA-15 در حذف رنگ متیل اورانژ از محلول‌های آبی است. همچنین، اثر پارامترهای عملیاتی شامل مقدار جاذب، غلظت اولیه رنگ، زمان تماس، دما و pH محلول بر فرآیند جذب مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

در این پژوهش، پودر کیتوسان $(C_6H_{11}NO_4)_n$ با درجه دی‌استیلاسیون حدود ۷۵-۸۵٪، اسید استیک (۹۹٪)، CH_3COOH ، اسید هیدروکلریک (۳۷٪ HCl)، کوپلیمر پلورونیک (Pluronic P123) $(EO_{20}PO_{70}EO_{20})$ ، تترا اتیل ارتوسیلیکات (۹۸٪)، $Si(OC_2H_5)_4$ ، TEOS، ۳-تری اتوکسی سیلیل (پروپیل ایزوسیانات (۹۵٪)، $C_{10}H_{21}NO_4Si$ ، ICP TES)، اتانول (۹۹٪)، C_2H_5OH ، دی‌متیل فرمامید (۹۹٪)، DMF، C_3H_7NO ، رنگ متیل اورانژ (۸۵٪)، $C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$ و گاز نیتروژن (۹۹٪، N_2) از شرکت Sigma-Aldrich واقع در St. Louis, MO, USA تهیه و بدون انجام خالص‌سازی بیشتر مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین، در تمامی مراحل از آب مقطر دیونیزه استفاده شد.

۲-۲- سنتز هیبرید کیتوسان-سیلوکسان

ابتدا، ۱ g پودر کیتوسان به همراه ۱۰ mL دی‌متیل فرمامید (DMF) و ۱/۵۲ g ۳-تری اتوکسی سیلیل پروپیل ایزوسیانات (ICPTES) درون یک بالن دو دهانه ریخته شد و یک هم‌زن مغناطیسی برای یکنواخت‌سازی محلول درون آن قرار گرفت. دهانه جانبی بالن با درپوش مناسب مسدود و دهانه اصلی آن به منبع گاز نیتروژن متصل شد. سپس، بالن درون حمام پارافین مایع

بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان کیتوسان در ساختار کامپوزیت، ظرفیت جذب بهبود می‌یابد و کامپوزیت SBA-15/CTS (حاوی ۲۰٪ کیتوسان) عملکرد جذبی بهتری نسبت به اغلب جاذب‌های رایج دارد. همچنین، Bahalkeh et al. (2020) حذف رنگ Brilliant Red E-4BA از فاضلاب را با استفاده از نانوالیاف CTS/SBA-15 سنتز شده به روش الکتروریسی مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که این کامپوزیت جذبی موثر برای حذف رنگ مذکور از محلول‌های آبی است و شرایط بهینه فرآیند شامل $pH = 7$ ، دوز جاذب 0.3 g و زمان تماس 40 min تعیین شد.

در مطالعه‌ای دیگر، Masoudnia et al. (2020) نانوالیاف‌های کیتوسان اصلاح شده با SBA-15 برای حذف رنگ‌های Direct Yellow 12، Direct Black ANBN و Blue از فاضلاب صنعتی استفاده کردند. بررسی‌های انجام شده نشان داد که بهترین عملکرد مربوط به جاذب اصلاح شده CTS/SBA-15-NH₂ در شرایط pH اسیدی، دوز جاذب 0.5 g و غلظت اولیه 60 mg L^{-1} برای رنگ‌های زرد و آبی، و 40 mg L^{-1} برای رنگ سیاه است. همچنین، زمان تماس بهینه برای جذب هر سه رنگ 40 min گزارش شد. علاوه بر این، Boukoussa et al. (2021) رفتار جذبی رنگ متیلن بلو را بر روی ذرات SBA-15 عامل‌دار شده و تثبیت شده در بستر آلژینات کلسیم مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، اثر پارامترهایی نظیر pH ، زمان تماس، دما و غلظت اولیه رنگ بر فرآیند جذب ارزیابی شد و نتایج نشان داد که کامپوزیت ALG-SBA-15 دارای ظرفیت جذب حدود 45 mg g^{-1} و راندمان حذف بیش از ۹۰٪ در شرایط بهینه است. مطالعات انجام شده نشان داد که ساختار مزومتخلخل SBA-15 و حضور گروه‌های عاملی سطحی نقش مهمی در افزایش تعداد سایت‌های فعال و بهبود برهم‌کنش بین جاذب و مولکول‌های رنگ ایفا می‌کنند.

با وجود مطالعات متعدد انجام شده بر روی نانومواد مزومتخلخل سیلیسی نظیر SBA-15 و همچنین پلیمر طبیعی کیتوسان، بررسی‌های موجود نشان می‌دهد که اغلب این دو ماده به صورت مستقل یا در قالب اصلاح‌های محدود در حذف رنگ‌های آلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در نتیجه، هم‌چنان چالش‌هایی در زمینه ایجاد یک ساختار هیبریدی پایدار که بتواند به طور هم زمان مزایای ساختاری SBA-15 (نظیر سطح ویژه بالا و نظم مزوپور) و گروه‌های عاملی فعال کیتوسان (مانند NH_2 و OH) را در یک سامانه یکپارچه ترکیب کند، وجود دارد. علاوه بر این، در بسیاری از مطالعات پیشین، ارتباط میان ویژگی‌های ساختاری

سپس محلول‌های استاندارد با غلظت‌های مختلف ($1, 2, 4, 6, 8, 10$) تهیه و طیف جذب آن‌ها در محدوده $600-400$ nm نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر UV-Vis ثبت شد. نتایج نشان داد که بیشینه جذب نوری متیل اورانژ در طول موج 470 nm قرار دارد؛ از این رو، تمامی اندازه‌گیری‌های بعدی در این طول موج انجام شد.

به منظور انجام آزمایش‌های جذب، مقادیر مشخصی از نانوجاذب CTS/SBA-15 به ارلن‌های حاوی 20 mL محلول رنگ با شرایط مشخص آزمایش افزوده شد. پس از اختلاط توسط همزن مغناطیسی با سرعت 500 rpm و در شرایط مشخص هر آزمایش، نمونه‌ها به مدت 5 min در حالت سکون قرار داده شدند تا ته‌نشینی اولیه انجام شود. در ادامه، جداسازی فاز جامد-مایع با استفاده از سانتریفیوژ در سرعت 2500 rpm به مدت 5 min انجام شد. جذب نوری محلول‌های صاف شده در طول موج 470 nm اندازه‌گیری و غلظت باقی‌مانده رنگ با استفاده از منحنی کالیبراسیون مبتنی بر قانون بیر-لامبرت محاسبه شد. درصد حذف رنگ با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$\text{درصد حذف رنگ} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

که C_0 و C_t : به ترتیب غلظت اولیه و غلظت رنگ در زمان t (برحسب mg L^{-1}) هستند. تمامی آزمایش‌ها در سه تکرار انجام و میانگین نتایج گزارش شد.

محدوده و سطوح انتخابی پارامترهای عملیاتی شامل pH، غلظت اولیه رنگ، مقدار جاذب، زمان تماس و دما، براساس مطالعات پیشین مرتبط با جذب رنگ‌های آلی توسط جاذب‌های مبتنی بر کیتوسان و SBA-15 و همچنین انجام آزمون‌های مقدماتی انتخاب شدند (Bahalkeh et al., 2020; Gao et al., 2014). به منظور بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر جذب، تأثیر پنج پارامتر شامل مقدار جاذب، غلظت اولیه رنگ، دما، زمان تماس و pH مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی اثر مقدار جاذب، مقادیر $0.1, 0.3, 0.6, 0.8, 1, 1.6$ g از نانوجاذب به ارلن‌های حاوی 20 mL محلول متیل اورانژ با غلظت اولیه 10^{-1} mg در 5 pH افزوده شد. مخلوط‌ها به مدت 30 min در دمای 25°C به همزن مغناطیسی در سرعت 500 rpm هم‌زده شدند، سپس به مدت 5 min در حالت سکون قرار گرفتند و پس از جداسازی، جذب نهایی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. برای بررسی اثر غلظت اولیه، محلول‌های رنگی با غلظت‌های $1, 2, 4, 6, 8, 10$ mg L^{-1} تهیه و به هر نمونه 0.16 g جاذب افزوده شد. آزمایش‌ها در 5 pH، دمای 25°C و زمان تماس 30 min انجام گرفت و

قرار داده شد تا در دمای 104°C ، به صورت غیرمستقیم و تحت اتمسفر نیتروژن به مدت 48 h با سرعت 500 rpm هم‌زده شود. پس از اتمام این مرحله، بالن از حمام حرارتی خارج شده و جریان گاز نیتروژن قطع شد. سپس $1/238$ g اتانول و $1/829$ g اسید استیک به سیستم افزوده شد. مخلوط حاصل، تحت شرایط محیطی و به کمک هم‌زن مغناطیسی به مدت 24 h با سرعت 500 rpm ساعت هم‌زده شد. پس از آن، محلول صاف شده و رسوب حاصل با اتانول شست‌وشو داده شد. در نهایت، رسوب در آون خشک‌کن خشک شده و پودری زرد رنگ با ظاهری یکنواخت به دست آمد.

۲-۳- سنتز نانو جاذب CTS/SBA-15

در گام نخست، 2 g از کوپلیمر پلورونیک P123 درون یک بشر ریخته و $62/5$ g اسید هیدروکلریک $1/9$ M به آن افزوده شد. سپس یک هم‌زن مغناطیسی در بشر قرار داده شد و بشر درون حمام پارافین مایع قرار گرفت تا مخلوط به مدت 45 min در دمای 45°C و با سرعت 500 rpm هم‌زده شود. در ادامه، $3/84$ g تترا اتیل ارتو سیلیکات (TEOS) به صورت قطره‌قطره به مخلوط اضافه شد و هم‌زدن در همان دما برای 45 min دیگر ادامه یافت. پس از آن، 0.2 g از پودر حاصل از سنتز هیبرید کیتوسان-سیلوکسان به مخلوط افزوده شد و سیستم در همان شرایط دمایی 45°C به مدت 24 h هم‌زده شد. سپس مخلوط به مدت یک شبانه‌روز در حالت سکون و در شرایط پوشیده با فویل آلومینیومی باقی‌ماند. در ادامه، دما تا 100°C افزایش یافت تا تشکیل ساختار منظم مزوپور شش‌وجهی توسط قالب P123 و تثبیت شبکه سیلیسی تسهیل شود. در مرحله بعد، ماده حاصل به یک بالن منتقل شد و 50 mL اتانول به آن افزوده شد. مخلوط تحت شرایط رفلکس در دمای 78°C به مدت 24 h قرار گرفت تا حذف کامل قالب کوپلیمری P123 از ساختار مزو متخلخل انجام شود. در پایان، محصول حاصل، صاف و با آب دیونیزه شست‌وشو داده شد و رسوب نهایی پس از خشک کردن در آون، به صورت پودری نرم و سفید رنگ به دست آمد.

۲-۴- آماده‌سازی محلول‌های رنگی و طراحی آزمایش‌های جذب و واجذب

مطالعه حاضر در مقیاس آزمایشگاهی و به صورت ناپیوسته انجام شد. برای تهیه محلول مادر متیل اورانژ، مقدار 0.1 g از پودر رنگ در بالن ژوژه 1000 mL حاوی آب دیونیزه حل و تا حجم نهایی رقیق شد تا محلولی با غلظت 100 mg L^{-1} حاصل شود.

سطح همگن، جذب چندلایه بر سطوح ناهمگن و اثرات انرژی برهم‌کنش جاذب-جذب‌شونده مورد استفاده قرار می‌گیرند. براساس داده‌های حاصل از آزمایش‌های جذب در غلظت‌های اولیه مختلف، مقدار غلظت تعادلی رنگ (C_e) با استفاده از جذب نوری و بر مبنای قانون بیر-لامبرت محاسبه شد. سپس ظرفیت جذب در حالت تعادل (q_e) برحسب (mg g^{-1}) از رابطه (۲) به دست آمد.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (2)$$

که C_e : غلظت تعادلی رنگ (mg L^{-1})، V : حجم محلول (0.02 L) و m : جرم جاذب (0.16 g) هستند.

پارامترهای هر مدل از طریق برازش داده‌های تجربی با فرم‌های خطی معادلات ایزوترمی استخراج شده (نعمت‌الله زاده، ۱۳۹۵) و به منظور تعیین مدل مناسب‌تر برای توصیف فرآیند جذب مورد مقایسه قرار گرفتند. فرم خطی مدل لانگمویر:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_{\max} K_L} + \frac{C_e}{Q_{\max}} \quad (3)$$

که $Q_{\max}$: حداکثر ظرفیت جذب تک‌لایه (mg g^{-1}) و K_L : ثابت لانگمویر (L mg^{-1}) هستند. این پارامترها از شیب و عرض از مبدأ نمودار C_e/q_e برحسب C_e به دست می‌آیند. فرم خطی مدل فروندلیچ:

$$\ln(q_e) = \ln(K_f) + \frac{1}{n} \ln(C_e) \quad (4)$$

که K_f : ثابت ظرفیت جذب فروندلیچ ($\text{mg}^{1-1/n} \text{ L}^{1/n} \text{ g}^{-1}$) و عدد بی‌بعد n : شاخص شدت جذب هستند. این پارامترها از نمودار $\ln(q_e)$ برحسب $\ln(C_e)$ استخراج می‌شوند. فرم خطی مدل تمکین:

$$q_e = B_T \ln(C_e) + B_T \ln(K_T) \quad (5)$$

که در آن B_T : ثابت مرتبط با انرژی جذب و K_T : ثابت تعادلی مدل تمکین هستند و از نمودار q_e برحسب $\ln(C_e)$ محاسبه می‌شوند.

۲-۶- سینتیک جذب

به منظور بررسی سرعت فرآیند جذب و شناسایی مکانیسم حاکم بر حذف متیل اورانژ توسط نانوکامپوزیت CTS/SBA-15

پس از جداسازی، غلظت باقی‌مانده رنگ و درصد حذف محاسبه شد.

به منظور بررسی اثر زمان تماس، محلول‌های رنگی با غلظت اولیه 10 mg L^{-1} و $\text{pH} = 5$ تهیه شد و به هر نمونه 0.16 g جاذب افزوده شد. نمونه‌ها به مدت ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ min هم‌زدن قرار گرفتند و پس از جداسازی، جذب نهایی در دمای 25°C اندازه‌گیری شد. برای بررسی اثر pH ، محلول‌های رنگ با pH های ۲، ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۳ با استفاده از محلول‌های HCl و NaOH تنظیم شدند. سپس به هر ارلن حاوی 20 mL محلول رنگ با غلظت 10 mg L^{-1} ، مقدار 0.16 g جاذب افزوده شد. آزمایش‌ها در دمای 25°C و زمان تماس ۳۰ min انجام و پس از جداسازی، جذب نهایی محلول‌ها اندازه‌گیری شد. به منظور بررسی اثر دما، آزمایش‌های جذب در دماهای 25°C ، 35°C ، 45°C ، 55°C و 65°C انجام شد. در این آزمایش‌ها 20 mL از محلول متیل اورانژ با غلظت 10 mg L^{-1} و $\text{pH} = 5$ در تماس با 0.16 g جاذب قرار گرفت و پس از ۳۰ min هم‌زدن با سرعت 500 rpm ، جذب نهایی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

هم‌چنین، به منظور ارزیابی قابلیت بازیابی و استفاده مجدد نانوکامپوزیت CTS/SBA-15، پس از انجام فرآیند جذب تحت شرایط منتخب آزمایش (شامل غلظت اولیه 10 mg L^{-1} ، مقدار جاذب 0.16 g ، $\text{pH} = 5$ ، زمان تماس ۳۰ min و دمای 25°C)، جاذب از محلول جدا و فرآیند واجذب با استفاده از 20 mL محلول NaOH با غلظت 0.1 M انجام شد. مخلوط به مدت ۲ h تحت هم‌زدن با سرعت 500 rpm قرار گرفت و سپس جاذب توسط سانتریفیوژ جداسازی شد. در ادامه جاذب سه مرتبه با آب دیونیزه شستشو داده شد تا آثار محلول واجذب‌کننده حذف شود و سپس به مدت ۱۰ h در آون با دمای 80°C خشک شد. جاذب بازیابی شده مجدداً تحت شرایط مشابه در فرآیند جذب مورد استفاده قرار گرفت. این چرخه به مدت ۵ سیکل متوالی تکرار شد تا پایداری و قابلیت استفاده مجدد جاذب مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲-۵- ایزوترم جذب سطحی

مطالعه ایزوترم‌های جذب، اطلاعات مهمی در خصوص رفتار تعادلی سیستم جاذب-جذب‌شونده، ظرفیت نهایی جذب و ماهیت برهم‌کنش‌های سطحی فراهم می‌آورد. به منظور تحلیل رفتار تعادلی جذب متیل اورانژ بر روی نانوکامپوزیت CTS/SBA-15، مدل‌های متداول ایزوترمی شامل لانگمویر (Langmuir)، فروندلیچ (Freundlich) و تمکین (Temkin) مورد بررسی قرار گرفتند. این مدل‌ها به ترتیب برای توصیف جذب تک‌لایه بر

با ضخامت لایه مرزی هستند.

۷-۲- ترمودینامیک جذب

به منظور بررسی اثر دما بر فرآیند جذب سطحی متیل اورانژ بر روی نانوکامپوزیت CTS/SBA-15، آزمایش‌های جذب تحت شرایط منتخب شامل غلظت اولیه رنگ 10 mg L^{-1} ، مقدار جاذب 0.16 g و $\text{pH} = 5$ و زمان تماس 30 min در بازه دمایی 25°C تا 75°C انجام شد. پارامترهای ترمودینامیکی شامل تغییرات انرژی آزاد گیبس (ΔG^0)، آنتالپی (ΔH^0) و آنتروپی (ΔS^0) به منظور ارزیابی ماهیت، خودبه‌خودی بودن و نوع فرآیند جذب محاسبه شدند. رابطه بین توابع ترمودینامیکی به صورت رابطه (۱۱) بیان می‌شود.

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (11)$$

برای محاسبه پارامترهای ترمودینامیکی، ابتدا ثابت تعادل ظاهری فرآیند جذب (K_c) براساس نسبت ظرفیت جذب در حالت تعادل به غلظت تعادلی به صورت رابطه (۱۲) تعریف شد.

$$K_c = q_e / C_e \quad (12)$$

سپس با استفاده از معادله وانت‌هوف، رابطه بین K_c و دما به صورت رابطه (۱۳) بیان شد.

$$\ln(K_c) = (\Delta S^0 / R) - (\Delta H^0 / RT) \quad (13)$$

که R : ثابت جهانی گازها ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) و T : دمای مطلق برحسب کلوین (K) است.

با ترسیم نمودار $\ln(K_c)$ برحسب $1/T$ ، شیب خط برابر با $-\Delta H^0 / R$ و عرض از مبدأ برابر با $\Delta S^0 / R$ در نظر گرفته شد و از این طریق تغییرات آنتالپی و آنتروپی محاسبه شدند.

۸-۲- آزمون‌های مشخصه‌یابی

به منظور بررسی خصوصیات فیزیکی، ساختاری و شیمیایی نانوجاذب CTS/SBA-15، مجموعه‌ای از آزمون‌های مشخصه‌یابی بر روی نمونه انجام شد. برای ارزیابی ساختار بلوری و شناسایی فازهای موجود در نانوجاذب سنتز شده، آزمون پراش پرتو ایکس (X-Ray Diffraction, XRD) با استفاده از دستگاه PW1730 ساخت شرکت Philips (هلند) انجام شد. پرتو X از منبع $\text{CuK}\alpha$ با طول موج $1.5406 \text{ \AA}$ تولید شد. الگوهای XRD به منظور بررسی

داده‌های تجربی حاصل از تغییرات زمان تماس با استفاده از مدل‌های متداول سینتیکی شامل شبه درجه اول (Pseudo-First-Order)، شبه درجه دوم (Pseudo-Second-Order)، الویچ (Elovich) و نفوذ درون‌ذره‌ای (Intraparticle Diffusion) مورد تحلیل قرار گرفتند. در این راستا، ابتدا ظرفیت جذب در زمان‌های مختلف (q_t) از رابطه (۶) محاسبه شد.

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (6)$$

که C_0 و C_t : به ترتیب غلظت اولیه و غلظت رنگ در زمان t (mg L^{-1})، V : حجم محلول (0.2 L) و m : جرم جاذب (0.16 g) هستند. مقادیر C_t براساس داده‌های جذب نوری و با استفاده از قانون بیر-لامبرت تعیین شدند.

برای تحلیل داده‌ها، فرم‌های خطی مدل‌های سینتیکی به کار گرفته شد (فغانی و جنت‌مقام، ۱۳۹۸) و پارامترهای مربوطه از طریق برازش داده‌های تجربی استخراج شد. مدل شبه درجه اول:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (7)$$

که q_e و q_t : به ترتیب ظرفیت جذب در حالت تعادل و در زمان t (mg g^{-1}) و k_1 : ثابت سرعت شبه درجه اول (min^{-1}) هستند. مدل شبه درجه دوم:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (8)$$

که k_2 : ثابت سرعت شبه درجه دوم ($\text{g mg}^{-1} \text{ min}^{-1}$) است. مدل الویچ:

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln(t) \quad (9)$$

که α : نرخ اولیه جذب ($\text{mg g}^{-1} \text{ min}^{-1}$) و β : پارامتر مرتبط با پوشش سطحی و انرژی فعال‌سازی (g mg^{-1}) هستند. مدل نفوذ درون‌ذره‌ای:

$$q_t = k_{id} t^{1/2} + C \quad (10)$$

که k_{id} : ثابت نفوذ درون‌ذره‌ای ($\text{mg g}^{-1} \text{ min}^{-1/2}$) و C : پارامتر مرتبط

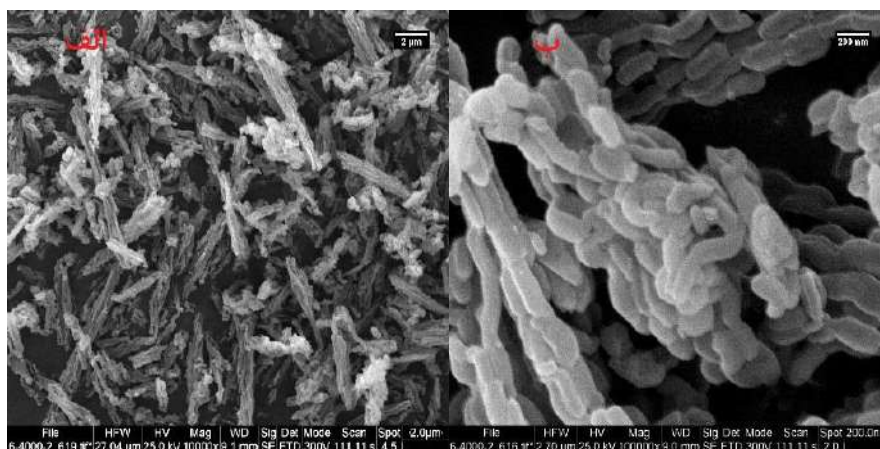
۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشخصه‌یابی نانوذرات سنتز شده CTS/SBA-15

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در شکل‌های ۱-الف و ۱-ب، مورفولوژی سطحی نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 را در بزرگنمایی‌های متفاوت نمایش می‌دهند. در تصویر مربوط به بزرگ‌نمایی $2\ \mu\text{m}$ (شکل ۱-الف) مشاهده می‌شود که ذرات دارای ساختاری شبه‌میله‌ای و تجمع‌یافته هستند و به‌صورت متراکم و درهم‌تنیده در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. این نوع آرایش می‌تواند منجر به افزایش سطح تماس مؤثر بین نانوذرات شود که از منظر فرآیندهای جذب سطحی، ویژگی مطلوبی محسوب می‌شود (Zhao et al., 1998). در تصویر SEM با بزرگنمایی $200\ \text{nm}$ (شکل ۱-ب)، جزئیات مورفولوژی ذرات با وضوح بیشتری قابل‌مشاهده است. ساختار نانوکامپوزیت‌ها به‌صورت تجمع‌یافته از صفحات یا میله‌های کوتاه با سطحی نسبتاً زبر و ناهموار دیده می‌شود که می‌تواند موجب افزایش تعداد سایت‌های فعال سطحی شود. این ویژگی در کاربردهای محیط‌زیستی و فرآیندهای جذب آلاینده‌ها اهمیت به‌سزایی دارد، زیرا افزایش زبری سطح می‌تواند مکان‌های بیشتری را برای برهم‌کنش مولکولی فراهم سازد (Wang et al., 2013). مورفولوژی مشاهده‌شده با ساختارهای گزارش‌شده برای SBA-15 و کامپوزیت‌های مبتنی بر کیتوسان (CTS) هم‌خوانی داشته و بیانگر تشکیل موفقیت‌آمیز ساختار مزومتخلخل با سطح ویژه بالا است (Vallet-Regi et al., 2001; Liou et al., 2022).

نظم ساختاری و ویژگی‌های بلوری نمونه موردتحلیل قرار گرفتند. برای ارزیابی ریزساختار، توزیع اندازه، و مشاهده آرایش داخلی نانوذرات، از میکروسکوپ الکترونی عبوری (Transmission Electron Microscopy, TEM) مدل CM120 ساخت شرکت Philips (هلند) استفاده شد. در این روش، پرتو الکترونی پراثری از نمونه عبور داده‌شد و تصاویر حاصل برای بررسی مورفولوژی داخلی، شکل ذرات و یکنواختی نانوکامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور بررسی مورفولوژی سطحی و ساختار سه‌بعدی سطح نانوجاذب، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscopy, SEM) مدل VEGAIII ساخت شرکت TESCAN (جمهوری چک) استفاده شد. تصاویر SEM امکان بررسی شکل ظاهری، اندازه و نحوه توزیع نانوذرات بر سطح کامپوزیت را فراهم کرد.

برای شناسایی گروه‌های عاملی، پیوندهای شیمیایی و ساختار مولکولی نانوجاذب، از طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) با دستگاه RXI ساخت شرکت PerkinElmer (آمریکا) استفاده شد. طیف FTIR در محدوده $4000 - 400\ \text{cm}^{-1}$ ثبت شد. به‌منظور تعیین مساحت سطح ویژه، قطر متوسط منافذ، حجم کل تخلخل و نوع توزیع حفرات، آنالیز جذب-واجذب گاز نیتروژن به‌روش Brunauer-Emmett-Teller (BET) با دستگاه BELSORP MINI II ساخت شرکت BEL (ژاپن) انجام شد. این آزمون در دمای 196°C با استفاده از نیتروژن مایع به‌عنوان گاز جذب‌شونده انجام گرفت. نتایج به‌دست‌آمده اطلاعات دقیقی درخصوص ویژگی‌های سطحی و پتانسیل جذب نانوجاذب فراهم آورد.



شکل ۱- تصاویر SEM نانوجاذب CTS/SBA-15: (الف) نمای کلی مورفولوژی سطح؛ و (ب) جزئیات ریزساختار نانوکامپوزیت

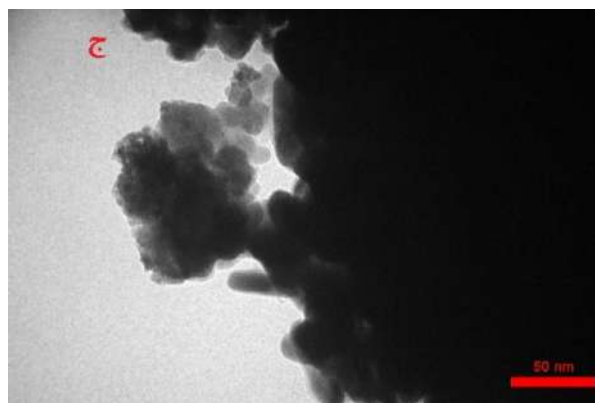
نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 با ساختار مزومتخلخل منظم را نشان می‌دهند. در شکل ۲-الف، نمای از ساختار مزوپور مشاهده

در ادامه، تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) ارائه‌شده در شکل ۲-الف تا ۲-ج، شواهدی از سنتز موفق

مرزهای نسبتاً مشخص مشاهده می‌شوند که می‌تواند بیانگر برهم‌کنش مناسب میان فاز آلی کیتوسان و چارچوب سیلیکایی SBA-15 است. مشاهده این ساختار تجمعی در مقیاس نانو، تشکیل موفق نانوکامپوزیت هیبریدی CTS/SBA-15 را تأیید می‌کند. علاوه بر این، حفظ ساختار مزومتخلخل در کنار تشکیل نواحی تجمعی کیتوسان می‌تواند نقش مؤثری در ایجاد سایت‌های فعال سطحی و تسهیل نفوذ مولکول‌های متیل اورانژ در فرآیند جذب ایفا نماید (Wang et al., 2023). در مجموع، نتایج حاصل از تصاویر TEM نشان می‌دهند که ساختار مزومتخلخل منظم SBA-15 پس از اصلاح با کیتوسان تا حد زیادی حفظ شده و نانوکامپوزیت سنتز شده دارای مورفولوژی مناسب، کانال‌های قابل دسترس و ساختار متخلخل مطلوب برای کاربردهای جذب سطحی است.

می‌شود که در آن آرایش نسبتاً منظم حفرات و کانال‌های مزومتخلخل قابل تشخیص است. این الگو بیانگر حفظ نسبی ساختار شبکه‌ای SBA-15 پس از فرآیند اصلاح با کیتوسان بوده و تشکیل ساختار هیبریدی را تأیید می‌کند. در شکل ۲-ب، الگوی نواری منظم و موازی با وضوح بالا مشاهده می‌شود که مشخصه ساختارهای مزومتخلخل منظم SBA-15 در امتداد صفحات است (Vallet-Regí et al., 2001). فواصل منظم بین کانال‌های مزوپور، حفظ آرایش ساختاری SBA-15 پس از اصلاح با کیتوسان را تأیید می‌کند (Zhao et al., 1998).

هم‌چنین بررسی کیفی تصویر TEM نشان می‌دهد که فاصله بین کانال‌ها در محدوده چند نانومتر قرار دارد که با نتایج حاصل از آنالیز BET و توزیع اندازه حفرات BJH هم‌خوانی مناسبی دارد. شکل ۲-ج مورفولوژی کلی نانوکامپوزیت و نحوه تجمع ذرات را نشان می‌دهد. در این شکل، نواحی نانومتری تجمع‌یافته با



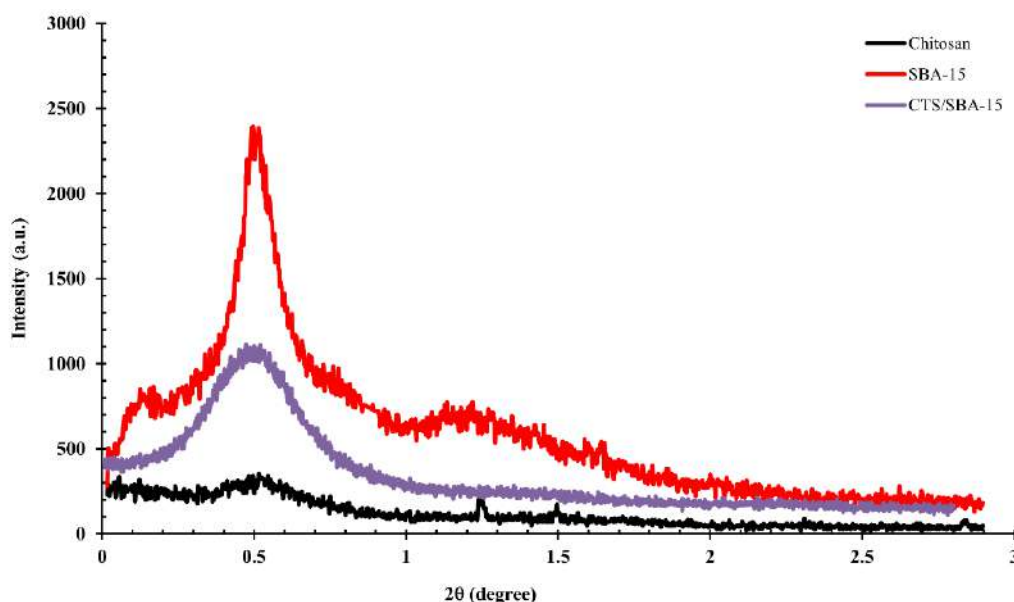
شکل ۲- تصاویر TEM نانوکامپوزیت CTS/SBA-15: (الف) آرایش نسبتاً منظم حفرات مزوپور؛ (ب) کانال‌های موازی و ساختار مزومتخلخل منظم SBA-15؛ و (ج) مورفولوژی کلی و نواحی تجمع‌یافته نانوکامپوزیت سنتز شده

بازتابی (۱۰۰) و (۱۱۰) منتسب هستند. این پیک‌ها مشخصه ساختار مزومتخلخل شش‌ضلعی منظم با تقارن دو بعدی (2D-hexagonal p6mm) بوده و با الگوهای گزارش شده برای SBA-15 در مطالعات پیشین و کارت استاندارد مرجع سیلیکا مزومتخلخل (JCPDS No. 00-044-1394) مطابقت دارند

الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) در زوایای پایین (Low-angle XRD) برای سه نمونه SBA-15، کیتوسان و نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 در شکل ۳ ارائه شده است. الگوی XRD مربوط به SBA-15 یک پیک پراش قوی در زاویه حدود 5° و یک پیک ضعیف‌تر در حدود $1/2^\circ$ را نشان می‌دهد که به ترتیب به صفحات

الگوی XRD مربوط به کیتوسان خالص تنها یک هاله پهن با شدت کم را نشان می‌دهد که بیانگر ماهیت عمدتاً آمورف این پلیمر طبیعی است. نبود پیک‌های بلوری مشخص در نمونه کیتوسان با گزارش‌های پیشین مطابقت داشته و نشان‌دهنده فقدان نظم بلوری بلندبرد در ساختار آن است (Rinaudo, 2006). در مجموع، نتایج حاصل از آزمون XRD بیانگر آن است که فرآیند اصلاح SBA-15 با کیتوسان منجر به نفوذ موفق فاز آلی در ساختار مزومتخلخل شده، بدون آن‌که چارچوب منظم مزوپور به‌طور کامل تخریب شود. این ویژگی می‌تواند نقش مهمی در فراهم شدن هم‌زمان سطح ویژه مناسب و گروه‌های عاملی فعال برای فرآیند جذب ایفا کند.

(Prabhu et al., 2022). حضور این پیک‌ها بیانگر تشکیل موفق ساختار منظم مزوپور در نمونه سنتز شده است. در نمونه نانوکامپوزیت CTS/SBA-15، شدت پیک مربوط به صفحه (۱۰۰) به‌طور محسوسی کاهش یافته، درحالی‌که موقعیت زاویه‌ای آن تقریباً بدون تغییر باقی‌مانده است. این رفتار معمولاً به ورود زنجیره‌های کیتوسان به درون کانال‌های مزومتخلخل SBA-15 نسبت داده می‌شود. کاهش شدت پیک‌ها را می‌توان ناشی از کاهش اختلاف چگالی الکترونی بین دیواره‌های سیلیسی و فضای داخلی حفرات پس از بارگذاری کیتوسان دانست (Oliveira et al., 2023). با وجود این کاهش شدت، باقی‌ماندن پیک اصلی (۱۰۰) نشان می‌دهد که ساختار مزومتخلخل SBA-15 پس از اصلاح با کیتوسان تا حد زیادی حفظ شده است. از سوی دیگر،



شکل ۳- الگوی XRD نانوکامپوزیت CTS/SBA-15

مشخصه چارچوب سیلیکایی منظم SBA-15 هستند (Zhao et al., 1998).

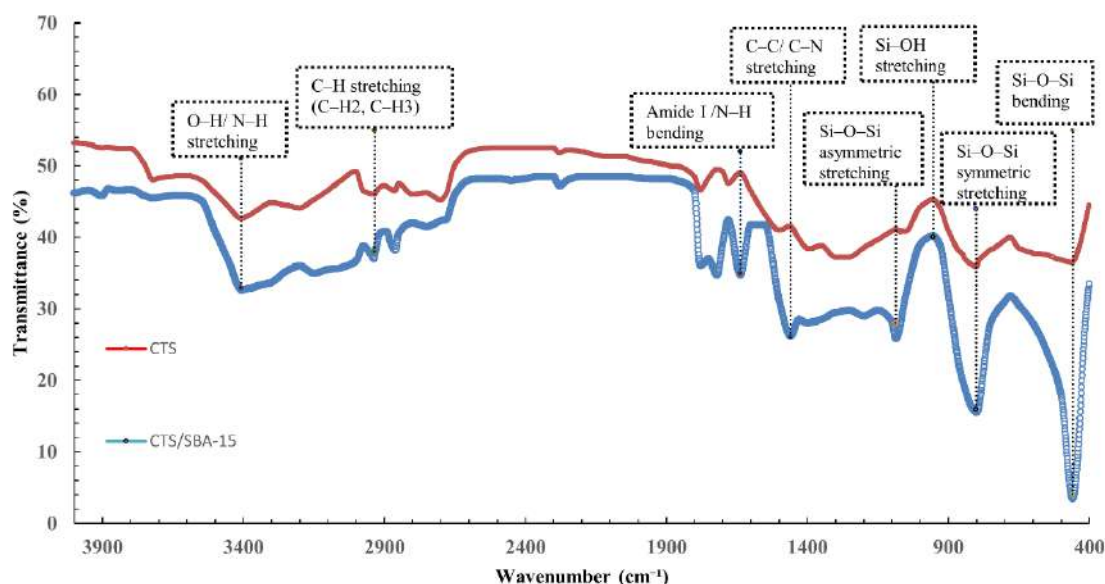
هم‌چنین، پیک ظاهر شده در حدود 459 cm^{-1} مربوط به ارتعاش خمشی پیوند Si-O-Si بوده و حضور ساختار سیلیکایی را تأیید می‌کند (Wang et al., 2013). باند مشاهده شده در حدود 954 cm^{-1} نیز به ارتعاش کششی گروه‌های Si-OH سطحی مربوط است که نشان‌دهنده حضور گروه‌های هیدروکسیلی فعال بر سطح SBA-15 است. در ناحیه $2935-2975\text{ cm}^{-1}$ باندهای مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های C-H مشاهده می‌شود که به ساختار پلی‌ساکارییدی کیتوسان مربوط هستند (Aranaz et al., 2021). هم‌چنین، باند پهن در حدود 3408 cm^{-1} به ارتعاشات کششی گروه‌های هیدروکسیل (O-H) و آمینی (N-H) نسبت

به‌منظور شناسایی گروه‌های عاملی موجود در نانوکامپوزیت سنتز شده CTS/SBA-15 و بررسی برهم‌کنش‌های ایجاد شده میان چارچوب سیلیکایی SBA-15 و کیتوسان، آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوری (FTIR) در محدوده طیفی 400 cm^{-1} تا 4000 cm^{-1} انجام شد که نتایج آن در شکل ۴ ارائه شده است. در این شکل، طیف آبی‌رنگ مربوط به نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 و طیف قرمز رنگ مربوط به کیتوسان خالص (CTS) مقایسه دو طیف، تغییرات مشخصی را در موقعیت و شدت برخی باندهای جذبی نشان می‌دهد که بیانگر اصلاح موفق SBA-15 با کیتوسان و تشکیل ساختار هیبریدی است. پیک‌های مشاهده شده در حدود 1086 cm^{-1} و 801 cm^{-1} ، به‌ترتیب به ارتعاشات کششی نامتقارن و متقارن پیوندهای Si-O-Si نسبت داده می‌شوند که

گروه‌های آمینی و هیدروکسیلی نشان می‌دهد که فرآیند عامل‌دارسازی بدون تخریب قابل توجه ساختار مزوپور انجام شده است. این نتایج با مطالعات پیشین هم‌خوانی داشته و صحت مسیر سنتز را تأیید می‌کند (Wang et al., 2013). هم‌چنین، این گروه‌های عاملی می‌توانند نقش مهمی در فرآیند جذب متیل اورانژ ایفا کنند. گروه‌های آمینی و هیدروکسیلی موجود در ساختار کیتوسان، به‌ویژه در محیط اسیدی و پس از پروتون‌دار شدن، می‌توانند برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی مؤثری با گروه‌های سولفونات آنیونی رنگ متیل اورانژ برقرار کنند. علاوه بر این، وجود گروه‌های هیدروکسیل و سیلانول سطحی، از طریق تشکیل پیوندهای هیدروژنی، موجب تقویت برهم‌کنش جاذب-جذب‌شونده و بهبود عملکرد جذب می‌شود.

داده می‌شود که حضور گروه‌های عاملی فعال کیتوسان را در ساختار نانوکامپوزیت نشان می‌دهد. علاوه بر این، پیک مشاهده‌شده در حدود 1638 cm^{-1} به ارتعاشات خمشی N-H و/یا ارتعاشات آمیدی نسبت داده می‌شود که از ویژگی‌های ساختاری کیتوسان محسوب می‌شود (Rinaudo, 2006). پیک ظاهرشده در حدود 1459 cm^{-1} نیز به ارتعاشات پیوندهای C-N و C-C در ساختار آلی کیتوسان مرتبط است و حضور فاز آلی را در ساختار نهایی تأیید می‌کند.

در مجموع، حضور هم‌زمان باندهای مشخصه SBA-15 و گروه‌های عاملی مربوط به کیتوسان در طیف FTIR نانوکامپوزیت CTS/SBA-15، بیانگر اصلاح موفق ساختار مزومتخلخل SBA-15 با کیتوسان و تشکیل نانوکامپوزیتی پایدار است. حفظ باندهای اصلی سیلیکایی در کنار ظهور و تقویت باندهای مرتبط با



شکل ۴- مقایسه طیف FTIR نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 و کیتوسان خالص (CTS)

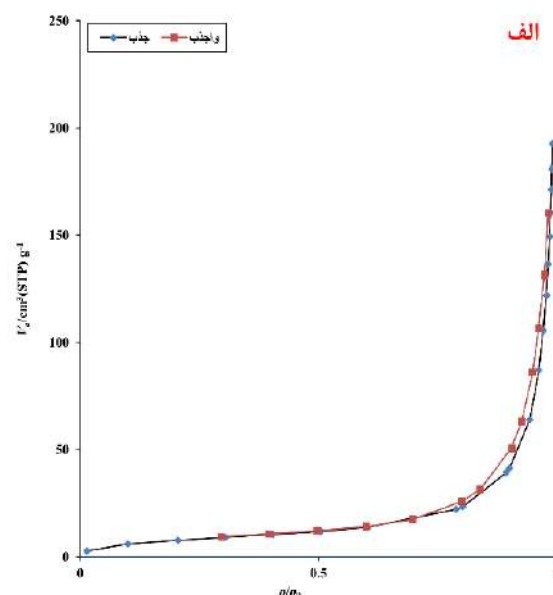
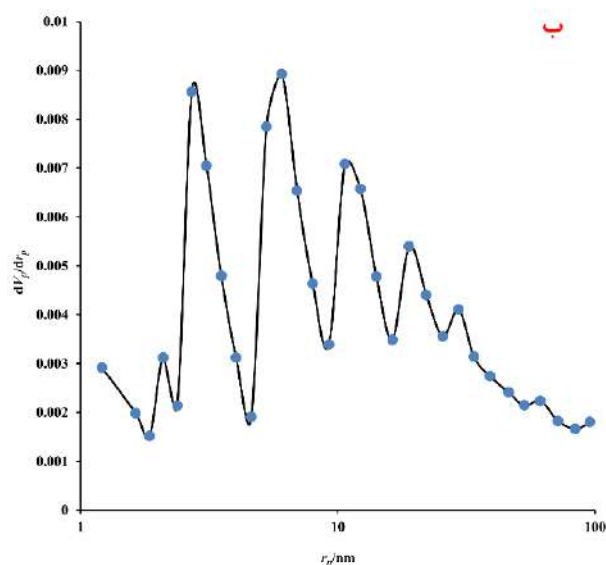
محاسبه‌شد، برابر با $773/51\text{ m}^2\text{g}^{-1}$ به‌دست آمد که نشان‌دهنده ساختار متخلخل توسعه‌یافته با سطح تماس بالا برای برهم‌کنش‌های سطحی است. هم‌چنین، میانگین قطر حفرات برابر با $6/06\text{ nm}$ بوده که در محدوده مزوپور (2 nm تا 50 nm) قرار دارد. حجم کل تخلخل نیز برابر $0/2867\text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ محاسبه‌شد. نتایج حاصل در جدول ۱ ارائه شده‌اند. این مقادیر با نتایج گزارش‌شده برای SBA-15 اصلاح‌شده با کیتوسان انجام در مطالعات پیشین هم‌خوانی مناسبی دارند (Wang et al., 2013).

مقایسه با پژوهش Pham et al. (2019) نشان می‌دهد که اصلاح SBA-15 با کیتوسان موجب افزایش حدود $1/157$ برابری سطح ویژه شده است. این افزایش سطح ویژه را می‌توان ناشی از

شکل ۵-الف، ایزوترم جذب-واجدب نیتروژن نانوجاذب CTS/SBA-15 را نشان می‌دهد که به وضوح ویژگی‌های ساختاری مزوپور این ماده را تأیید می‌کند. براساس طبقه‌بندی IUPAC، ایزوترم مشاهده‌شده از نوع IV بوده و وجود حلقه هیستریز (Hysteresis Loop) در ناحیه فشار نسبی بالا (حدود $0/1-1/0\text{ p/p}_0$) مشخصه اصلی آن است. چنین رفتاری بیانگر وجود ساختار مزومتخلخل با منافذ سیلندری باز بوده و اختلاف مسیرهای جذب و واجذب نیتروژن را نشان می‌دهد (Thommes et al., 2015). این ویژگی برای کاربردهای جذبی، به‌ویژه در حذف آلاینده‌های آلی، بسیار مطلوب ارزیابی می‌شود. مساحت سطح ویژه نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 که با استفاده از مدل BET

کیتوسان بیانگر آن است که فرآیند عامل‌داری بدون تخریب قابل توجه چارچوب SBA-15 انجام شده است. وجود سطح ویژه بالا و منافذ مزوپور با اندازه مناسب می‌تواند موجب افزایش تعداد سایت‌های فعال، تسهیل انتقال جرم و نفوذ مؤثر مولکول‌های متیل اورانژ به درون ساختار جاذب شود. علاوه بر این، حضور هم‌زمان ساختار مزومتخلخل SBA-15 و گروه‌های عاملی آمینی و هیدروکسیلی کیتوسان، شرایط مناسبی را برای ایجاد برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و پیوندهای هیدروژنی با مولکول‌های رنگ فراهم می‌کند که این موضوع می‌تواند یکی از دلایل عملکرد مطلوب نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 در فرآیند جذب متیل اورانژ باشد.

اصلاح موفق ساختار مزومتخلخل و افزایش تعداد مکان‌های فعال سطحی دانست که نقش مهمی در بهبود عملکرد جذب ایفا می‌کنند (Pham et al., 2019). همچنین، نمودار توزیع اندازه حفرات نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 که با استفاده از روش BJH و برپایه شاخه واجذب ایزوترم تهیه شده است، در شکل ۵-ب ارائه شده است. نتایج، وجود توزیع غالب حفرات در محدوده مزوپور را تأیید می‌کند. مشاهده پیک‌های اصلی در محدوده چند نانومتر تا چند ده نانومتر بیانگر حفظ ساختار مزومتخلخل SBA-15 پس از اصلاح با کیتوسان است. توزیع نسبتاً گسترده اندازه حفرات را می‌توان به پوشش جزئی دیواره منافذ توسط زنجیره‌های کیتوسان و ایجاد ناهمگنی سطحی نسبت داد. در مجموع، حفظ ساختار مزومتخلخل پس از اصلاح با



شکل ۵- نتایج آنالیز BET نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 شامل: الف) ایزوترم جذب-واجذب نیتروژن؛ و ب) توزیع اندازه حفرات براساس روش BJH

جدول ۱- پارامترهای سطحی و ساختاری نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 حاصل از آنالیز BET

مقدار نمونه تست شده (g)	سطح مقطع تک‌مولکولی (nm ²)	میانگین قطر حفرات (nm)	حجم تخلخل (cm ³ g ⁻¹)	مساحت سطح ویژه (m ² g ⁻¹)
۰/۰۳۸۷	۰/۱۶۲	۶/۰۶	۰/۲۸۶۷	۷۷۳/۵۱

آلاینده را تعیین می‌کند. به‌منظور بررسی اثر مقدار نانوجاذب CTS/SBA-15 بر حذف رنگ متیل اورانژ، مقادیر مختلف جاذب شامل ۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۰۶، ۰/۰۸، ۰/۱ و ۰/۱۶ به ۲۰ mL از محلول رنگی با غلظت اولیه ۱۰ mg L⁻¹ در pH = ۵ و دمای ۲۵ °C افزوده شد و پس از ۳۰ min زمان تماس، میزان جذب نوری محلول‌ها در طول موج ۴۷۰ nm با استفاده از دستگاه

۳-۲- بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر فرآیند جذب

متیل اورانژ توسط نانوجاذب CTS/SBA-15

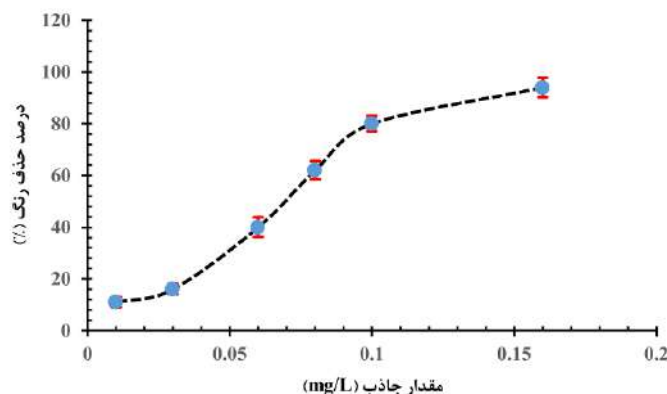
۳-۲-۱- بررسی تأثیر مقدار جاذب بر فرآیند جذب

مقدار جاذب یکی از مهم‌ترین پارامترهای عملیاتی در فرآیندهای جذب سطحی است، زیرا به‌طور مستقیم تعداد سایت‌های فعال در دسترس برای برهم‌کنش با مولکول‌های

افزایش مقدار جاذب باعث توزیع مناسب‌تر مولکول‌های رنگ بر سطح جاذب و افزایش احتمال جذب آن‌ها می‌شود. همچنین، حضور گروه‌های عاملی فعال نظیر NH_2 و OH در ساختار کیتوسان موجود در نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 می‌تواند از طریق برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و پیوندهای هیدروژنی، نقش مهمی در جذب مولکول‌های متیل اورانژ ایفا کند. با وجود روند افزایشی مشاهده‌شده، میزان افزایش راندمان حذف در مقادیر بالاتر جاذب به تدریج کاهش می‌یابد که این موضوع می‌تواند ناشی از نزدیک شدن سیستم به شرایط تعادل و همچنین احتمال هم‌پوشانی یا تجمع ذرات جاذب باشد. در چنین شرایطی، بخشی از سطح فعال جاذب ممکن است به‌صورت مؤثر در دسترس مولکول‌های رنگ قرار نگیرد. این رفتار در بسیاری از سیستم‌های جذب مبتنی بر نانوکامپوزیت‌ها و جاذب‌های مزوپور گزارش شده است (Patil et al., 2023). بر این اساس، مقدار 0.16 g بیشترین راندمان حذف را در شرایط بررسی‌شده نشان داد.

اسپکتروفتومتر UV-Vis اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل در شکل ۶ ارائه شده است. مطابق نتایج، با افزایش مقدار جاذب از 0.01 g به 0.16 g ، درصد حذف رنگ به‌طور قابل‌توجهی از حدود 11% به 94% افزایش یافت. این روند افزایشی را می‌توان به افزایش تعداد سایت‌های فعال و سطح تماس مؤثر در سیستم نسبت داد. در مقادیر پایین جاذب، تعداد سایت‌های فعال محدود بوده و تنها بخشی از مولکول‌های رنگ امکان جذب بر سطح نانوکامپوزیت را پیدا می‌کنند. با افزایش مقدار جاذب، سطح ویژه و تعداد مکان‌های فعال قابل‌دسترس افزایش یافته و در نتیجه احتمال برخورد مؤثر بین مولکول‌های متیل اورانژ و سطح جاذب بیشتر می‌شود که این امر به افزایش راندمان جذب منجر می‌شود (Bilal et al., 2022; Wang and Guo, 2020).

علاوه بر افزایش تعداد سایت‌های فعال، افزایش مقدار جاذب می‌تواند موجب کاهش نسبت مولکول‌های رنگ به واحد جرم جاذب شده و از اشباع سریع سطح جلوگیری نماید. این موضوع به‌ویژه در غلظت‌های ثابت آلاینده اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا



شکل ۶- اثر مقدار نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 بر درصد حذف متیل اورانژ

نسبت داد. در غلظت‌های پایین، نسبت سایت‌های فعال به مولکول‌های رنگ بالا بوده و در نتیجه بخش عمده‌ای از مولکول‌ها جذب می‌شوند. با افزایش غلظت اولیه، این نسبت کاهش یافته و سایت‌های فعال به تدریج اشباع می‌شوند، به‌طوری‌که بخشی از مولکول‌های رنگ بدون جذب در فاز محلول باقی می‌مانند که منجر به کاهش راندمان حذف می‌شود (Wang and Peng, 2010).

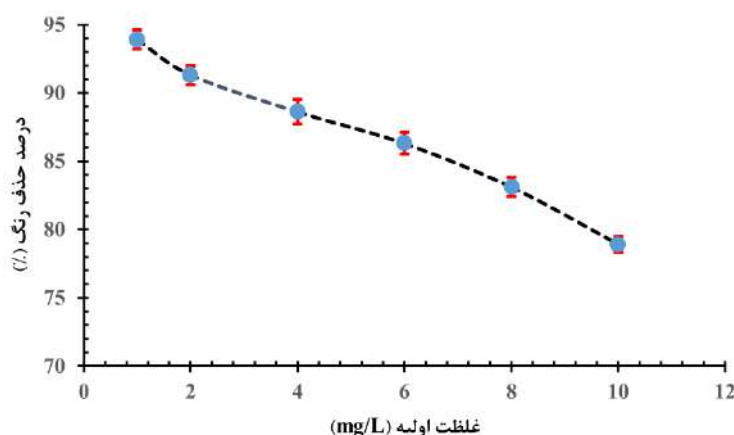
علاوه بر این، در غلظت‌های بالاتر، رقابت بین مولکول‌های رنگ برای اشغال سایت‌های فعال افزایش یافته و انتقال جرم از فاز محلول به سطح جاذب با محدودیت بیشتری مواجه می‌شود. این رفتار از ویژگی‌های متداول سیستم‌های جذب با مقدار جاذب ثابت بوده و در مطالعات مختلف نیز گزارش شده است (Agarwala and

۳-۲-۲- بررسی تأثیر غلظت اولیه بر فرآیند جذب

غلظت اولیه رنگ از پارامترهای کلیدی مؤثر بر کارایی فرآیند جذب است، زیرا به‌طور مستقیم بر نیروی محرکه انتقال جرم و نسبت بین تعداد مولکول‌های رنگ و سایت‌های فعال جاذب اثر می‌گذارد. در این مطالعه، 20 mL از محلول‌های متیل اورانژ با غلظت‌های اولیه $1, 2, 4, 6, 8$ و 10 mg L^{-1} تهیه و به هر نمونه 0.1 g از نانوجاذب CTS/SBA-15 افزوده شد. آزمایش‌ها در pH برابر ۵، دمای 25°C و زمان تماس 30 min انجام شد. نتایج حاصل در شکل ۷ ارائه شده است. مطابق نتایج، با افزایش غلظت اولیه رنگ از 1 mg L^{-1} به 10 ، درصد حذف از حدود $93/9\%$ به $78/9\%$ کاهش یافت. این روند کاهشی را می‌توان به محدود بودن تعداد سایت‌های فعال جاذب در شرایط مقدار ثابت جاذب

ناشی از افزایش نیروی محرکه انتقال جرم در سیستم و افزایش احتمال برخورد مؤثر مولکول‌های رنگ با سطح جاذب است.

(Mulky, 2023). شایان ذکر است که در چنین شرایطی، اگرچه درصد حذف کاهش می‌یابد، اما مقدار جذب تعادلی (q_e) معمولاً با افزایش غلظت اولیه روند افزایشی نشان می‌دهد که این موضوع



شکل ۷- اثر غلظت اولیه رنگ بر حذف متیل اورانژ توسط نانوجاذب CTS/SBA-15

بار مثبت بر سطح جاذب‌شده و در نتیجه، جاذبه الکترواستاتیکی قوی بین سطح جاذب و مولکول‌های آنیونی متیل اورانژ افزایش می‌یابد. در مقابل، با افزایش pH و کاهش غلظت یون‌های H^+ ، گروه‌های آمینی به حالت غیر پروتونه (NH_2^-) باز می‌گردند و چگالی بار مثبت سطح کاهش می‌یابد. علاوه بر این، در محیط‌های بازی، حضور یون‌های هیدروکسید (OH^-) می‌تواند با آنیون‌های رنگ برای اشغال سایت‌های فعال رقابت کرده و همچنین با ایجاد دافعه الکترواستاتیکی بین سطح جاذب و رنگ، موجب کاهش راندمان حذف شود (Al-Amrani et al., 2022). بنابراین، کاهش چشمگیر جذب در pH‌های ۱۰ و ۱۳ را می‌توان به کاهش جاذبه الکترواستاتیکی و افزایش اثرات دافعه نسبت داد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که pH تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر رفتار جذب متیل اورانژ دارد و کارایی فرآیند به شدت تابع شرایط اسیدی-بازی محیط است. این روند بیانگر نقش غالب برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی در مکانیسم جذب بوده و با مطالعات پیشین در زمینه جذب رنگ‌های آنیونی توسط جاذب‌های مبتنی بر کیتوسان هم‌خوانی دارد (Gao et al., Bahalkeh et al., 2020; 2014).

۳-۲-۴- بررسی تأثیر زمان تماس بر فرآیند جذب

زمان تماس یکی از عوامل مهم در فرآیندهای جذب سطحی است که نقش تعیین‌کننده‌ای در رسیدن سیستم به حالت تعادل و میزان برهم‌کنش بین جاذب و آلاینده دارد. به منظور بررسی اثر این پارامتر، فرآیند حذف متیل اورانژ توسط نانوجاذب CTS/SBA-15 در بازه‌های زمانی ۵، ۱۵، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ مورد

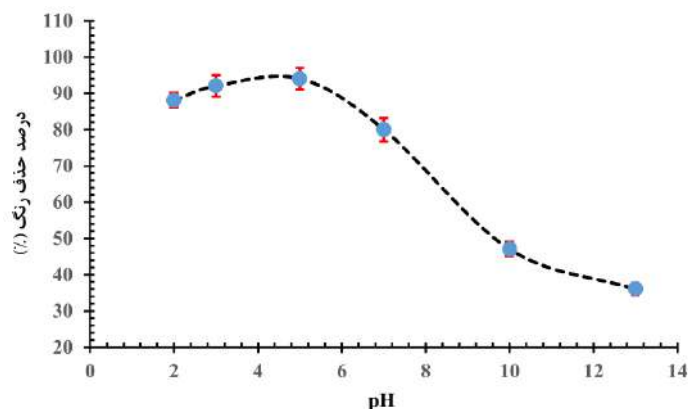
۳-۲-۳- بررسی تأثیر pH بر فرآیند جذب

به منظور بررسی تأثیر pH محلول بر راندمان حذف رنگ متیل اورانژ، آزمایش‌های جذب در مقادیر مختلف pH شامل ۲، ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۳ انجام شد. شرایط آزمایش شامل استفاده از ۰/۱ g جاذب، غلظت اولیه رنگ 10 mg L^{-1} ، دمای 25°C و زمان تماس ۳۰ min بود. نتایج به دست آمده در شکل ۸ ارائه شده است. در گام نخست، اثر pH بر رفتار طیفی رنگ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در محیط‌های اسیدی، جابه‌جایی قابل توجهی در طول موج بیشینه جذب متیل اورانژ رخ می‌دهد؛ به طوری که طول موج بیشینه جذب در $pH = 2$ برابر 508 nm ، در $pH = 3$ برابر با 488 nm و در شرایط خنثی و بازی در حدود 470 nm به دست آمد. این تغییرات ناشی از تبدیل ساختار مولکولی متیل اورانژ بین فرم‌های پروتونه و دی پروتونه در محیط‌های مختلف pH بوده و می‌تواند بر دقت اندازه‌گیری جذب نوری تأثیرگذار باشد (Alvez et al., 2025). از این رو، داده‌های مربوط به pH‌های بسیار اسیدی (۲ و ۳) با احتیاط تفسیر شده‌اند. همان گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، راندمان حذف رنگ به شدت تحت تأثیر pH قرار دارد. بیشترین مقدار حذف در $pH = 5$ (حدود ۹۴٪) حاصل شد، در حالی که با افزایش pH به ناحیه خنثی و سپس بازی، راندمان حذف به طور قابل توجهی کاهش یافت. این رفتار را می‌توان بر اساس تغییرات بار سطحی جاذب و ماهیت یونی رنگ تبیین نمود.

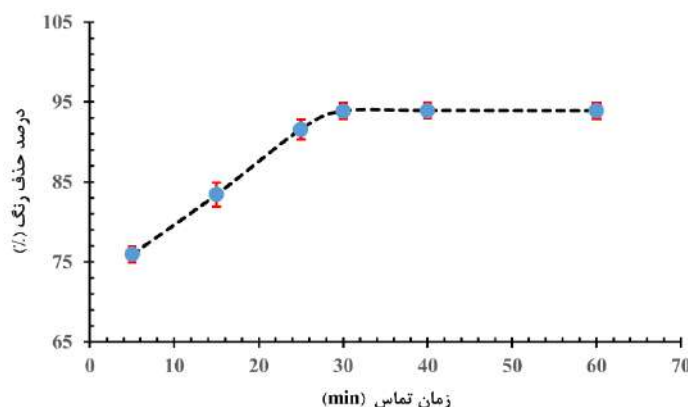
نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 به دلیل حضور گروه‌های عاملی آمینی (NH_2^-) در ساختار کیتوسان، در محیط‌های اسیدی پروتون‌دار شده و به صورت NH_3^+ در می‌آید. این امر موجب ایجاد

دسترس بر سطح جاذب و همچنین گرادیان غلظتی بالا بین فاز محلول و سطح جاذب است که به عنوان نیروی محرکه اصلی انتقال جرم عمل می‌کند. در این مرحله، مولکول‌های رنگ به سرعت به سطح جاذب منتقل شده و برهم کنش‌های سطحی به طور مؤثری رخ می‌دهند (Ho and McKay, 1999).

مطالعه قرارگرفت. شرایط آزمایش شامل استفاده از ۰/۱ g جاذب، $\text{pH} = 5$ ، غلظت اولیه رنگ 10 mg L^{-1} و دمای 25°C بود. نتایج به دست آمده در شکل ۹ ارائه شده است. مطابق نتایج، با افزایش زمان تماس از ۵ min به ۳۰، درصد حذف رنگ به طور قابل توجهی از از حدود ۷۵٪ به بیش از ۹۳٪ افزایش یافت. این افزایش سریع در مراحل اولیه جذب نشان دهنده فراوانی سایت‌های فعال در



شکل ۸- اثر pH بر حذف متیل اورانژ توسط نانوجاذب CTS/SBA-15



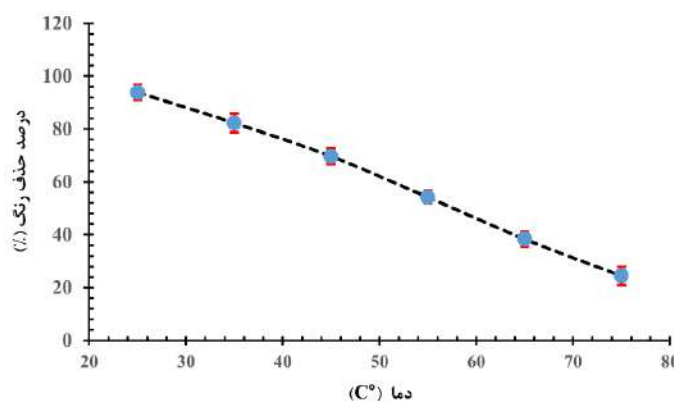
شکل ۹- اثر زمان تماس بر حذف متیل اورانژ توسط نانوجاذب CTS/SBA-15

و دسترسی آسان به سایت‌های فعال موجب افزایش سریع جذب می‌شود، درحالی‌که در ادامه، با افزایش اشغال سطح و محدود شدن دسترسی به حفره‌های داخلی جاذب، سرعت جذب کاهش یافته و سیستم به تعادل نزدیک می‌شود. این رفتار با نتایج حاصل از مدل نفوذ درون ذره‌ای در بخش مطالعات سینتیکی نیز سازگار است که نشان داد نفوذ درون ذره‌ای در فرآیند نقش دارد، اما تنها مرحله کنترل کننده سرعت نیست. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که بخش عمده فرآیند جذب در ۳۰ min نخست انجام می‌شود و پس از آن، سیستم به تعادل نزدیک می‌شود. این موضوع بیانگر سرعت مناسب جذب و عملکرد مطلوب نانوجاذب در زمان‌های نسبتاً کوتاه است که از دیدگاه کاربردهای عملی نیز اهمیت قابل توجهی دارد.

با ادامه فرآیند و افزایش زمان تماس، نرخ افزایش حذف به تدریج کاهش یافت؛ به طوری که پس از حدود ۳۰ min، تغییرات راندمان حذف بسیار ناچیز بوده و سیستم عملاً به حالت تعادل نزدیک شد. به عنوان مثال، درصد حذف در زمان‌های ۴۰ min و ۶۰ به ترتیب برابر با ۹۳/۸۸٪ و ۹۳/۹۱٪ به دست آمد که اختلاف اندکی با مقدار ثبت شده در ۳۰ min دارد. این رفتار نشان می‌دهد که بخش عمده سایت‌های فعال جاذب در زمان‌های اولیه اشغال شده و با گذشت زمان، به دلیل کاهش تعداد مکان‌های در دسترس و کاهش نیروی محرکه انتقال جرم، سرعت جذب کاهش می‌یابد (Foo and Hameed, 2010). رفتار دو مرحله‌ای مشاهده شده، شامل جذب سریع در زمان‌های اولیه و رسیدن تدریجی به حالت تعادل، نشان می‌دهد که فرآیند جذب تحت تأثیر چند مکانیسم انتقال جرم قرار دارد. در مراحل ابتدایی، انتقال جرم در لایه مرزی

۳-۲-۵- بررسی تأثیر دما بر فرآیند جذب

دما یکی از پارامترهای کلیدی در فرآیندهای جذب سطحی است که از طریق تأثیر بر انرژی جنبشی مولکول‌ها، برهم‌کنش‌های سطحی و تعادل جذب، نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی فرآیند ایفا می‌کند. به‌منظور بررسی اثر دما بر حذف متیل اورانژ، آزمایش‌های جذب در بازه دمایی 25°C تا 75°C



شکل ۱۰- اثر دما بر حذف متیل اورانژ توسط نانوجاذب CTS/SBA-15

تحت شرایط ثابت شامل غلظت اولیه 10 mg L^{-1} ، مقدار جاذب 0.16 g و $\text{pH} = 5$ و زمان تماس 30 min انجام شد. نتایج حاصل در شکل ۱۰ ارائه شده است. مطابق نتایج، با افزایش دما از 25°C تا 75°C ، درصد حذف رنگ به‌طور قابل‌توجهی از حدود $93/8\%$ به $24/4\%$ کاهش یافت. این روند کاهشی نشان می‌دهد که افزایش دما اثر منفی بر کارایی فرآیند جذب داشته و بیانگر وابستگی دمایی تعادل جذب در این سیستم است.

از دیدگاه مکانیسمی، افزایش دما موجب افزایش انرژی جنبشی مولکول‌های رنگ در فاز محلول شده و احتمال جدا شدن آن‌ها از سطح جاذب را افزایش می‌دهد. همچنین، در دماهای بالاتر، برهم‌کنش‌های فیزیکی نظیر نیروهای الکترواستاتیکی و پیوندهای هیدروژنی تضعیف شده و در نتیجه تمایل مولکول‌های رنگ برای باقی ماندن بر سطح جاذب کاهش می‌یابد. در مجموع، این عوامل موجب جابجایی تعادل به سمت وا جذب و کاهش راندمان حذف می‌شوند. بر این اساس، دماهای پایین‌تر شرایط مناسب‌تری برای انجام فرآیند جذب فراهم می‌کنند و بیشترین راندمان حذف در دمای 25°C مشاهده شد. نکته قابل‌توجه آن است که روند کاهشی مشاهده‌شده در درصد حذف با افزایش دما، با رفتار گزارش‌شده برای ظرفیت جذب تعادلی (q_e) در مطالعات مشابه نیز هم‌خوانی دارد (Gao et al., Boukoussa et al., 2021; 2014). این هم‌سویی نشان‌دهنده نقش مهم دما در کنترل تعادل جذب بوده و بیانگر تأثیر قابل‌توجه عوامل ترمودینامیکی بر عملکرد سیستم است. بررسی کمی این اثرات در بخش ترمودینامیکی ارائه خواهد شد.

۳-۲-۳- مطالعه ایزوترمی جذب رنگ متیل اورانژ توسط

نانوکامپوزیت CTS/SBA-15

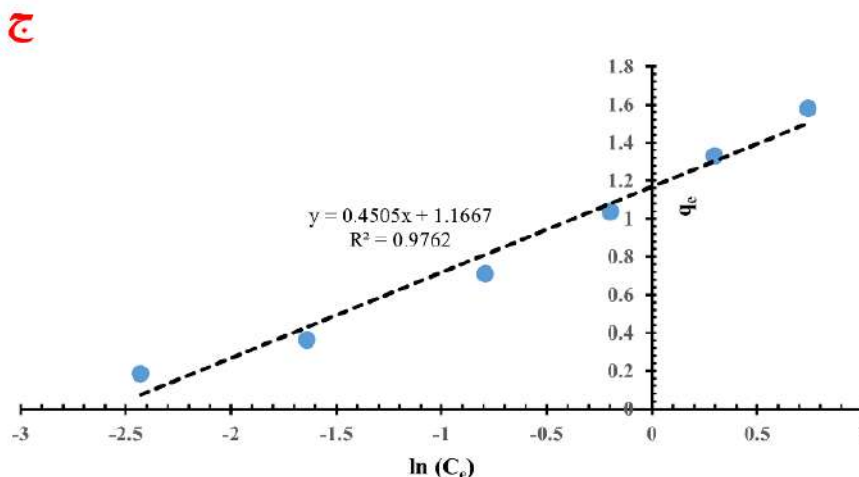
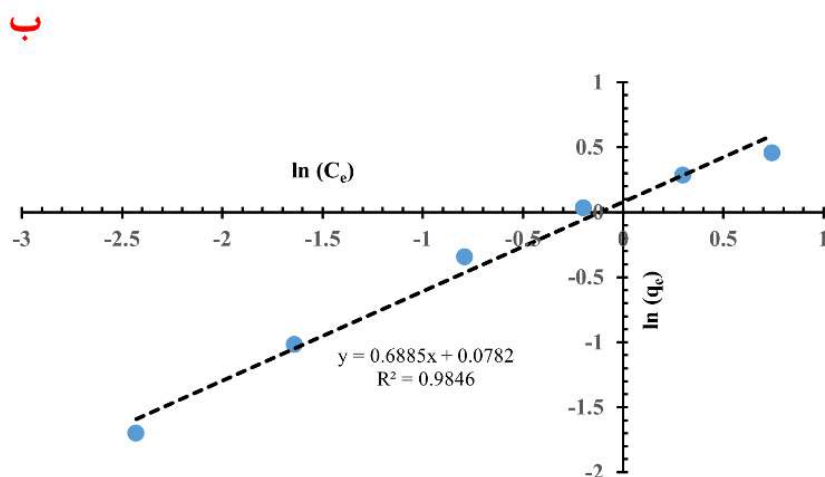
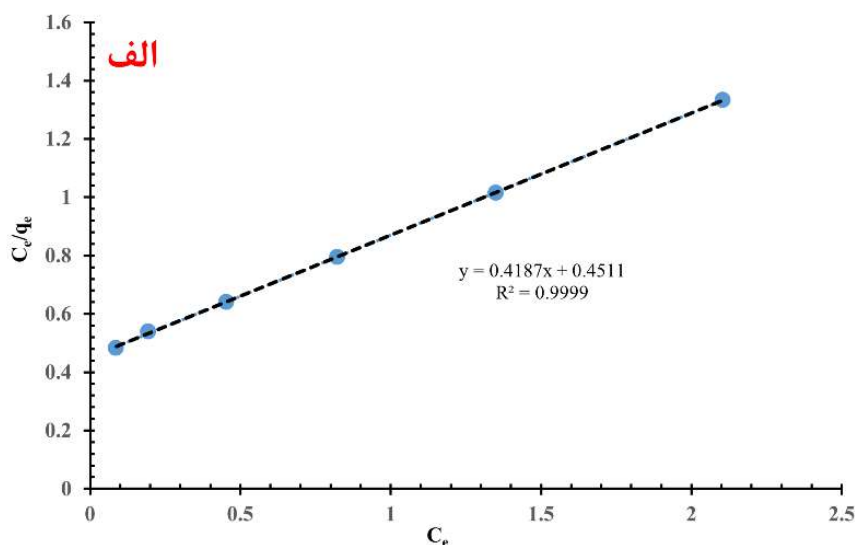
مطالعات سینتیکی، جذب سرعت فرآیند و زمان رسیدن به

تعادل را بررسی می‌کنند، درحالی‌که مدل‌های ایزوترمی اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت تعادلی سیستم و نحوه توزیع مولکول‌های رنگ بین فاز محلول و سطح جاذب ارائه می‌دهند. از این‌رو، بررسی هم‌زمان مدل‌های ایزوترمی و سینتیکی برای درک جامع مکانیسم جذب ضروری است. در این پژوهش، داده‌های تعادلی جذب با استفاده از مدل‌های ایزوترمی لانگمویر، فروندلیچ و تمکین مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج حاصل از برازش این مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شد. ضریب تعیین (R^2) به‌عنوان معیار اصلی برای سنجش میزان انطباق مدل‌ها با داده‌های تجربی در نظر گرفته شد (شکل ۱۱) و پارامترهای استخراج‌شده نیز در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

نتایج نشان‌داد که مدل لانگمویر نسبت به سایر مدل‌ها تطابق بهتری با داده‌های تجربی دارد و بالاترین ضریب تعیین R برابر 0.999 را ارائه می‌دهد. این نتیجه بیانگر آن است که فرآیند جذب متیل اورانژ بر روی نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 عمدتاً از الگوی جذب تک‌لایه‌ای بر سطحی نسبتاً همگن پیروی می‌کند. مقدار ظرفیت بیشینه جذب ($Q_{max} = 2/39\text{ mg g}^{-1}$) نشان‌دهنده توانایی مناسب نانوکامپوزیت سنتز شده در حذف رنگ از محلول‌های آبی است. همچنین، مقدار ثابت لانگمویر ($K_L = 0/93\text{ L mg}^{-1}$) بیانگر تمایل بالای سطح جاذب به مولکول‌های رنگ بوده که می‌تواند ناشی از برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و تشکیل پیوندهای

است که فرضیات مربوط به جذب چندلایه بر سطوح ناهمگن و توزیع خطی انرژی جذب در این سیستم کمتر غالب بوده و این مدل‌ها قادر به توصیف دقیق رفتار تعادلی فرآیند جذب نیستند.

هیدروژنی بین گروه‌های عاملی کیتوسان (NH_2^- و OH^-) و مولکول‌های متیل اوراتر باشد. در مقابل، مدل‌های فروندلیچ و تمکین تطابق کمتری با داده‌های تجربی نشان دادند که بیانگر آن



شکل ۱۱- برازش مدل‌های ایزوترمی جذب متیل اوراتر بر روی نانوکامپوزیت CTS/SBA-15: (الف) لانگمویر؛ (ب) فروندلیچ؛ و (ج) تمکین

جدول ۲- پارامترهای مدل‌های ایزوترمی لانگمویر، فروندلیچ و تمکین برای جذب متیل اورانژ توسط نانوکامپوزیت CTS/SBA-15

مدل	پارامتر	مقدار
لانگمویر	$k_L (\text{L mg}^{-1})$	۰/۹۲۸
	$Q_{max} (\text{mg g}^{-1})$	۲/۳۸۸
	R^2	۰/۹۹۹
فروندلیچ	$k_F (\text{mg}^{1-1/n} \text{L}^{1/n} \text{g}^{-1})$	۱/۰۸۱
	n	۱/۴۵۲
	R^2	۰/۹۸۶
تمکین	$B_T (\text{mg g}^{-1})$	۰/۴۵
	$K_T (\text{L mg}^{-1})$	۱۳/۳۶
	R^2	۰/۹۷۶

زمانی است. مقدار ظرفیت جذب تعادلی (q_e) نیز حدود mg g^{-1} ۱/۸۷۷ به‌دست آمد. داده‌های سینتیکی فرآیند جذب براساس تغییرات غلظت باقی‌مانده رنگ در زمان‌های مختلف (C_t) و مقدار جذب در هر لحظه (q_t) در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سیستم در حدود ۳۰ min به حالت تعادل رسیده و مقدار q_t تقریباً با q_e برابر شده است که نشان‌دهنده سرعت بالای جذب در مراحل اولیه و سپس رسیدن به اشباع تدریجی سایت‌های فعال جاذب است.

۳-۴- بررسی سینتیکی جذب رنگ متیل اورانژ توسط

نانوکامپوزیت CTS/SBA-15

تحلیل سینتیکی نقش کلیدی در درک مکانیسم حاکم بر فرآیند جذب، سرعت انتقال جرم و شناسایی مرحله کنترل‌کننده ایفا می‌کند. براساس نتایج به‌دست آمده، ظرفیت جذب در دقایق اولیه با شیب تندی افزایش یافته و پس از حدود ۳۰ min به‌مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد که بیانگر برقراری تعادل جذب در این بازه

جدول ۳- داده‌های سینتیکی فرآیند جذب متیل اورانژ توسط نانوکامپوزیت CTS/SBA-15

زمان تماس (min)	$C_t (\text{mg L}^{-1})$	$q_t (\text{mg g}^{-1})$	$q_e - q_t (\text{mg g}^{-1})$
۵	۲/۴۰۶	۱/۵۱۸	۰/۳۵۹
۱۵	۱/۶۶۱	۱/۶۶۸	۰/۲۰۹
۲۵	۰/۸۴۳	۱/۸۳۱	۰/۰۴۶
۳۰	۰/۶۱۵	۱/۸۷۷	-
۴۰	۰/۶۱۲	۱/۸۷۸	-
۶۰	۰/۶۰۹	۱/۸۷۸	-

بیانگر دقت مناسب این مدل در توصیف رفتار سینتیکی سیستم است. این نتایج نشان می‌دهد که فرآیند جذب تحت‌تأثیر برهم‌کنش‌های سطحی بوده و مدل شبه درجه دوم توصیف مناسبی از رفتار سینتیکی سیستم ارائه می‌دهد. با این حال، انطباق این مدل لزوماً به معنای شیمی جذب خالص نبوده و می‌تواند بیانگر نقش مؤثر برهم‌کنش‌های سطحی در کنار نیروهای فیزیکی در فرآیند جذب باشد.

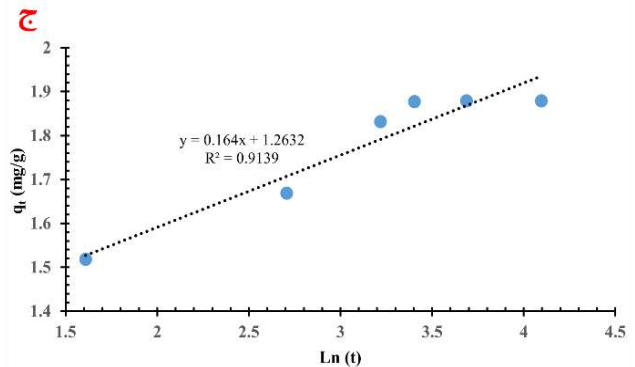
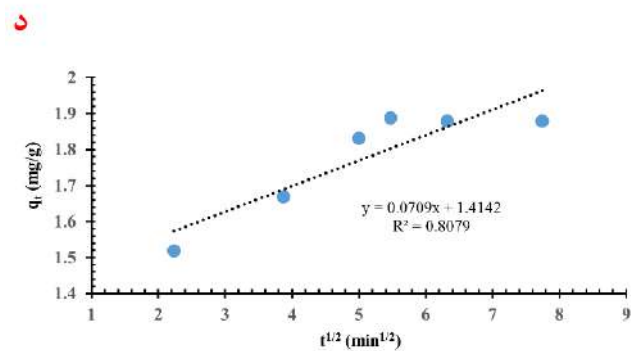
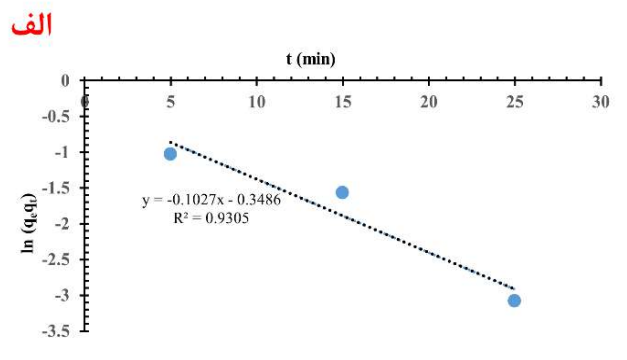
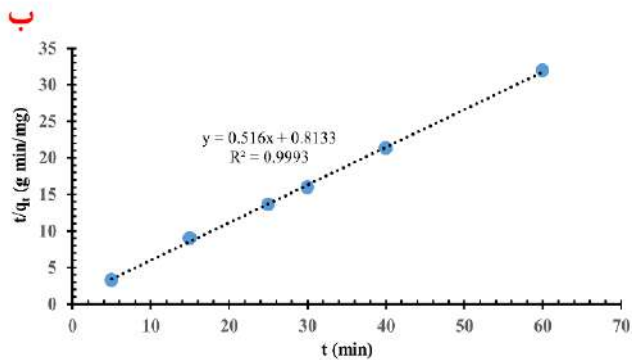
برازش داده‌ها با مدل الویج (شکل ۱۲-ج) نشان داد که این مدل دارای تطابق متوسط با داده‌های تجربی است ($R^2 = ۰/۹۱۴$) که بیانگر ناهمگنی نسبی سطح جاذب و توزیع غیر یکنواخت انرژی جذب است. هم‌چنین، نتایج برازش مدل نفوذ درون‌ذره‌ای (شکل ۱۲-د) نشان داد که نمودار q_t برحسب $t^{1/2}$ به‌صورت خطی

با توجه به رسیدن سیستم به تعادل در حدود ۳۰ min، تنها داده‌های قبل از این نقطه برای برازش مدل شبه درجه اول مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج حاصل از برازش (شکل ۱۲-الف) نشان داد که مدل شبه درجه اول تطابق مناسبی با داده‌های تجربی ندارد، به‌طوری‌که مقدار q_e محاسبه‌شده ($۰/۷۰۶ \text{ mg g}^{-1}$) اختلاف قابل‌توجهی با مقدار تجربی ($۱/۸۷۷ \text{ mg g}^{-1}$) دارد. این اختلاف نشان می‌دهد که این مدل قادر به توصیف دقیق رفتار سینتیکی سیستم نیست.

در مقابل، مدل شبه درجه دوم بهترین تطابق را با داده‌های تجربی نشان داد (شکل ۱۲-ب)، به‌گونه‌ای که مقدار q_e محاسبه‌شده ($۱/۹۳۸ \text{ mg g}^{-1}$) بسیار نزدیک به مقدار تجربی (mg $۱/۸۷۷ \text{ g}^{-1}$) است. هم‌چنین ضریب تعیین بالا ($R^2 = ۰/۹۹۹$)

مرزی در مراحل اولیه جذب است. در مجموع، مقایسه مدل‌های مختلف (جدول ۴) نشان می‌دهد که فرآیند جذب متیل اورانژ بر روی نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 از یک مکانیسم چندمرحله‌ای تبعیت می‌کند که در آن برهم‌کنش‌های سطحی در کنترل سرعت فرآیند و نیروهای فیزیکی در پایداری جذب نقش دارند.

یکنواخت نبوده و شامل چند ناحیه مجزا است. این رفتار نشان می‌دهد که نفوذ درون‌ذره‌ای تنها مرحله کنترل‌کننده سرعت نبوده و فرآیند جذب از مکانیسم‌های چند مرحله‌ای شامل انتقال جرم در لایه مرزی و نفوذ درون‌ذره‌ای تبعیت می‌کند. مقدار نسبتاً بالای عرض از مبدأ (C) نیز مؤید نقش قابل‌توجه مقاومت لایه



شکل ۱۲- برازش خطی مدل‌های سینتیکی جذب متیل اورانژ توسط نانوکامپوزیت CTS/SBA-15: (الف) شبه درجه اول؛ (ب) شبه درجه دوم؛ (ج) Elovich؛ و (د) نفوذ درون‌ذره‌ای

جدول ۴- پارامترهای مدل‌های سینتیکی جذب متیل اورانژ توسط نانوکامپوزیت CTS/SBA-15

مقدار	پارامتر	مدل
۰/۱۰۳	$k_1 \text{ (min}^{-1}\text{)}$	شبه درجه اول
۰/۷۰۶	$q_e \text{ (mg g}^{-1}\text{)}$	
۰/۹۳۱	R^2	
۰/۳۲۷	$k_2 \text{ (g mg}^{-1} \text{ min}^{-1}\text{)}$	شبه درجه دوم
۱/۹۳۸	$q_e \text{ (mg g}^{-1}\text{)}$	
۰/۹۹۹	R^2	
۳۶۳/۰۵	$\alpha \text{ (mg g}^{-1} \text{ min}^{-1}\text{)}$	مدل الویچ (Elovich)
۶/۰۹	$\beta \text{ (g mg}^{-1}\text{)}$	
۰/۹۱۴	R^2	
۰/۰۷۱	$k_{id} \text{ (mg g}^{-1} \text{ min}^{-1/2}\text{)}$	نفوذ درون‌ذره‌ای
۱/۴۱۴	$C \text{ (mg g}^{-1}\text{)}$	
۰/۸۰۸	R^2	

۳-۵- مطالعه ترمودینامیکی جذب رنگ متیل اورانژ توسط

نانوکامپوزیت CTS/SBA-15

به منظور ارزیابی ماهیت ترمودینامیکی فرآیند جذب، پارامترهای تغییرات آنتالپی (ΔH^0)، آنتروپی (ΔS^0) و انرژی آزاد گیبس (ΔG^0) برای جذب متیل اورانژ بر روی نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 در دماهای مختلف محاسبه و در جدول ۵ ارائه شده‌اند. همان‌گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مقدار منفی آنتالپی ($\Delta H^0 = -64/14 \text{ kJ mol}^{-1}$) نشان‌دهنده گرمازا بودن فرآیند جذب است. این نتیجه بیانگر آن است که افزایش دما موجب کاهش تمایل مولکول‌های متیل اورانژ به سطح جاذب شده و فرآیند جذب در دماهای پایین‌تر مطلوب‌تر است. مقدار نسبتاً

بالای ΔH^0 نشان می‌دهد که فرآیند جذب صرفاً ناشی از برهم‌کنش‌های فیزیکی ضعیف نبوده و علاوه بر جاذبه‌های الکترواستاتیکی و پیوندهای هیدروژنی، برهم‌کنش‌های سطحی قوی‌تری نیز در فرآیند جذب دخیل هستند. این رفتار می‌تواند ناشی از حضور هم‌زمان گروه‌های عاملی آمینی و هیدروکسیلی کیتوسان در کنار ساختار مزومتخلخل SBA-15 و ایجاد مکانیسم جذب ترکیبی در سطح نانوکامپوزیت باشد. مقدار منفی آنتروپی ($\Delta S^0 = -207/5 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) بیانگر کاهش درجه بی‌نظمی در سیستم طی فرآیند جذب است. این کاهش بی‌نظمی ناشی از انتقال مولکول‌های متیل اورانژ از فاز محلول با آزادی حرکتی بیشتر به سطح جاذب با وضعیت مقیدتر بوده که منجر به کاهش تصادفی بودن در فصل مشترک جامد-مایع می‌شود.

جدول ۵- پارامترهای ترمودینامیکی جذب متیل اورانژ بر روی نانوکامپوزیت CTS/SBA-15

دما (K)	انرژی آزاد گیبس (J mol^{-1})	آنتالپی (J mol^{-1})	آنتروپی ($\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
۲۹۸	-۱۱۷۱۲/۱	-۶۴۱۳۸/۴	-۲۰۷/۵
۳۰۸	-۹۶۳۷/۲		
۳۱۸	-۷۵۶۲/۴		
۳۲۸	-۵۴۸۷/۵		
۳۳۸	-۳۴۱۲/۷		
۳۴۸	-۱۳۳۷/۹		

جاذب و مولکول‌های متیل اورانژ، و همچنین برهم‌کنش‌های سطحی در فرآیند جذب نقش دارند. این نتیجه با تطابق مناسب داده‌ها با مدل شبه درجه دوم در بخش سینتیکی نیز هم‌خوانی دارد.

۳-۶- بررسی قابلیت بازیابی نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 و مقایسه عملکرد آن با جاذب‌های پایه سیلیکایی

به منظور ارزیابی قابلیت بازیابی و استفاده مجدد نانوکامپوزیت CTS/SBA-15، فرآیند جذب-واحد در پنج سیکل متوالی تحت شرایط منتخب آزمایش انجام شد و راندمان حذف متیل اورانژ پس از هر سیکل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوکامپوزیت سنتز شده پس از چندین سیکل متوالی، همچنان بخش قابل‌توجهی از ظرفیت جذب خود را حفظ می‌کند؛ به‌طوری‌که کاهش راندمان حذف پس از پنج سیکل کمتر از ۵٪ بود. این رفتار بیانگر پایداری مناسب ساختار جاذب و حفظ نسبی سایت‌های فعال طی فرآیندهای متوالی جذب-واحد است. پایداری مناسب جاذب را می‌توان به حضور هم‌زمان ساختار مزومتخلخل منظم SBA-15 و گروه‌های عاملی فعال کیتوسان نسبت داد. چارچوب سیلیکایی SBA-15 موجب حفظ ساختار

هم‌چنین، تشکیل لایه جذب‌یافته بر سطح جاذب و محدود شدن حرکت مولکول‌های رنگ درون کانال‌های مزومتخلخل نیز می‌تواند در کاهش آنتروپی سیستم مؤثر باشد. مقادیر منفی انرژی آزاد گیبس (ΔG^0) در بازه دمایی مورد بررسی نشان‌دهنده خودبه‌خودی بودن فرآیند جذب متیل اورانژ بر روی نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 است. با این حال، کاهش مقدار منفی ΔG^0 با افزایش دما بیانگر آن است که فرآیند جذب در دماهای بالاتر از نظر ترمودینامیکی کمتر مطلوب می‌شود که این موضوع با گرمازا بودن فرآیند و کاهش راندمان جذب در دماهای بالاتر هم‌خوانی دارد. مقادیر نسبتاً پایین ΔG^0 نیز نشان می‌دهند که فرآیند جذب با مصرف انرژی کم و تمایل مناسب برای برهم‌کنش میان مولکول‌های رنگ و سطح جاذب انجام می‌شود. با در نظر گرفتن هم‌زمان نتایج ترمودینامیکی، سینتیکی و مشخصه‌یابی، می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند جذب متیل اورانژ بر روی نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 از یک مکانیسم ترکیبی فیزیکی-شیمیایی تبعیت می‌کند؛ به‌طوری‌که برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی میان گروه‌های پروتونه‌شده آمینی و گروه‌های آنیونی رنگ، پیوندهای هیدروژنی میان گروه‌های عاملی سطح

به منظور ارزیابی عملکرد، نتایج این پژوهش با برخی جاذب‌های پایه سیلیکایی گزارش شده در مطالعات پیشین مقایسه شد که خلاصه آن در جدول ۶ ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، عملکرد جاذب‌های مزومتخلخل به عوامل مختلفی از جمله سطح ویژه، ساختار تخلخل، نوع گروه‌های عاملی سطح و شرایط عملیاتی وابسته است. در این میان، نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 با وجود قرار گرفتن در محدوده ظرفیت جذب جاذب‌های گزارش شده، رفتار تعادلی و سینتیکی مطلوب‌تری نشان داد و در زمان کوتاه‌تری به تعادل رسید. این موضوع می‌تواند ناشی از حضور هم‌زمان گروه‌های عاملی فعال کیتوسان و ساختار مزومتخلخل منظم SBA-15 باشد که دسترسی مناسب مولکول‌های رنگ به مراکز فعال سطحی را تسهیل می‌کند. علاوه بر این، پایداری ساختاری مناسب و حفظ راندمان جذب پس از چندین سیکل جذب-واحد جذب نشان می‌دهد که تثبیت کیتوسان بر روی بستر سیلیکایی SBA-15 توانسته است پایداری جاذب را در محیط آبی بهبود بخشد.

در مجموع نتایج بیانگر آن است که نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 می‌تواند به عنوان جاذبی پایدار و قابل بازیابی برای حذف رنگ‌های آنیونی از محلول‌های آبی مورد توجه قرار گیرد. با این حال، در محیط‌های واقعی مانند پساب‌های صنعتی، حضور هم‌زمان یون‌ها و ترکیبات آلی و معدنی ممکن است از طریق رقابت برای سایت‌های فعال یا تغییر در برهم‌کنش‌های سطحی، بر عملکرد جذب تأثیرگذار باشد. از این رو، بررسی عملکرد نانوکامپوزیت در شرایط واقعی پساب صنعتی می‌تواند به عنوان موضوعی برای مطالعات آینده پیشنهاد شود.

متخلخل و جلوگیری از تخریب ساختاری طی فرآیند و جذب می‌شود، در حالی که گروه‌های آمینی و هیدروکسیلی کیتوسان نقش مؤثری در ایجاد برهم‌کنش با مولکول‌های متیل اورانژ ایفا می‌کنند. علاوه بر این، تثبیت کیتوسان بر روی بستر سیلیکایی موجب کاهش حلالیت و افزایش پایداری پلیمر در محیط آبی شده است که این موضوع نقش مهمی در قابلیت استفاده مجدد جاذب دارد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که حضور گروه‌های عاملی فعال کیتوسان در کنار ساختار مزومتخلخل SBA-15 نقش مؤثری در بهبود برهم‌کنش بین سطح جاذب و مولکول‌های متیل اورانژ دارد. این موضوع در تطابق مناسب داده‌های تجربی با مدل لانگمویر و مدل سینتیکی شبه درجه دوم نیز قابل مشاهده است که بیانگر غالب بودن جذب تک‌لایه‌ای و نقش برهم‌کنش‌های سطحی در فرآیند جذب است.

هم‌چنین، حفظ ساختار مزومتخلخل SBA-15 پس از فرآیند عامل‌داری، موجب فراهم شدن سطح ویژه مناسب و دسترسی مؤثر مولکول‌های رنگ به مراکز فعال سطحی شده است. علاوه بر این، نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 پس از چندین سیکل متوالی جذب-واحد جذب، افت محسوسی در عملکرد نشان نداده و پایداری ساختاری و شیمیایی مناسبی را حفظ کرده است. تثبیت کیتوسان بر روی بستر سیلیکایی SBA-15 موجب کاهش حلالیت و جلوگیری از تخریب ساختار پلیمری در محیط آبی شده و قابلیت استفاده مجدد جاذب را بهبود بخشیده است. هم‌چنین، عملکرد مناسب جاذب در محدوده نسبتاً وسیعی از شرایط عملیاتی شامل pH و دما، نشان‌دهنده پتانسیل قابل قبول این نانوکامپوزیت برای کاربرد در فرآیندهای تصفیه پساب‌های حاوی رنگ‌های آنیونی است.

جدول ۶- مقایسه پارامترهای عملیاتی، مدل‌های ایزوترمی/سینتیکی و حداکثر ظرفیت جذب متیل اورانژ توسط جاذب‌های پایه سیلیکایی

نوع جاذب	مدل‌های ایزوترمی/سینتیکی غالب	حداکثر ظرفیت جذب لانگمویر $Q_{max}(\text{mg g}^{-1})$	مساحت سطح ویژه $(\text{m}^2 \text{g}^{-1})$	شرایط عملیاتی منتخب	مرجع
نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 (پژوهش حاضر)	لانگمویر/شبه درجه دوم	۲/۴	۷۷۳/۵	$\text{pH} = 5$ ، دمای 25°C ، زمان تماس ۳۰ min، غلظت اولیه $10-1 \text{ mg L}^{-1}$ و مقدار جاذب ۰/۱۶ g	-
SBA-15 مزومتخلخل	لانگمویر/شبه درجه دوم	۲/۱	۵۰۷/۱	$\text{pH} = 7$ ، دمای 25°C ، زمان تماس ۱۲۰ min، غلظت اولیه $50-10 \text{ mg L}^{-1}$ و مقدار جاذب ۰/۵ g	Zabi et al. (2021)
سیلیکای مزومتخلخل مشتق شده از پوسته برنج	لانگمویر/شبه درجه دوم	۲/۲	۴۲۵/۲	$\text{pH} = 7$ ، دمای 25°C ، زمان تماس ۱۸۰ min، غلظت اولیه $50-5 \text{ mg L}^{-1}$ و مقدار جاذب ۱ g	Dhaneswara et al. (2023)
هیدروژل آمینو-اتیل کیتوسان	لانگمویر/شبه درجه دوم	۳/۶	-	$\text{pH} = 4$ ، دمای 25°C ، زمان تماس ۱۲۰ min، غلظت اولیه $100-20 \text{ mg L}^{-1}$ و مقدار جاذب ۱/۵ g	Tamer et al. (2024)

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نانوکامپوزیت مزومتخلخل CTS/SBA-15 با موفقیت سنتز شد و عملکرد آن در حذف رنگ متیل اورانژ از محلول‌های آبی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ترکیب ساختار منظم مزوپور SBA-15 با گروه‌های عاملی فعال کیتوسان نقش مؤثری در بهبود برهم‌کنش بین جاذب و مولکول‌های رنگ ایفا کرده و موجب ارتقای عملکرد جذب می‌شود. بررسی ویژگی‌های ساختاری و مورفولوژیکی نیز حفظ ساختار مزومتخلخل SBA-15 و حضور گروه‌های عاملی مؤثر در فرآیند جذب را تأیید نمود. بررسی پارامترهای عملیاتی نشان داد که فرآیند جذب به شدت تحت تأثیر pH، مقدار جاذب، غلظت اولیه رنگ، زمان تماس و دما قرار دارد. نتایج بیانگر آن بود که کاهش pH، افزایش مقدار جاذب و افزایش زمان تماس موجب بهبود راندمان حذف شدند، درحالی‌که افزایش غلظت اولیه رنگ و دما باعث کاهش راندمان حذف شد. بیشترین راندمان حذف متیل اورانژ (حدود ۹۴٪) در شرایط $\text{pH} = 5$ ، دمای 25°C ، مقدار جاذب 0.16 g ، غلظت اولیه رنگ 1 mg L^{-1} و زمان 30 min مشاهده شد. نتایج سینتیکی و تعادلی نشان دادند که فرآیند جذب از مدل شبه درجه دوم و ایزوترم لانگمویر تبعیت بیشتری دارد که بیانگر نقش مهم برهم‌کنش‌های سطحی و تشکیل تک‌لایه جذب بر سطح جاذب است. همچنین، نتایج ترمودینامیکی، ماهیت خودبه‌خودی و گرمازای فرآیند را تأیید کردند.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که نانوکامپوزیت CTS/SBA-15 از ظرفیت مناسبی به‌عنوان جاذبی مؤثر، پایدار و قابل‌بازایی برای حذف رنگ‌های آنیونی از محیط‌های آبی برخوردار است. علاوه بر این، پایداری مناسب جاذب در طی سیکل‌های متوالی جذب-واحد، بیانگر قابلیت استفاده مجدد و پتانسیل کاربردی مناسب این نانوکامپوزیت در فرآیندهای تصفیه پساب است. با این حال، ارزیابی عملکرد این جاذب در سامانه‌های پیوسته و همچنین بررسی رفتار آن در شرایط پیچیده‌تر شامل پساب‌های واقعی صنعتی حاوی آلاینده‌های آلی و معدنی مختلف، نیازمند مطالعات تکمیلی است. افزون بر این، بررسی دقیق‌تر قابلیت بازایی جاذب در سیکل‌های طولانی‌مدت، تحلیل اقتصادی فرآیند و امکان‌سنجی کاربرد در مقیاس صنعتی می‌تواند زمینه توسعه کاربردهای عملی این نانوکامپوزیت را در تصفیه پساب‌های صنعتی فراهم سازد.

۵- قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از تمامی افرادی که در انجام این پژوهش، مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد خانم سارا مهری، همکاری و مساعدت داشته‌اند، صمیمانه قدردانی نمایند.

۶- اظهارنامه مالی

این پژوهش با بهره‌گیری از گرنت پژوهشی دانشجویان تحصیلات تکمیلی دانشگاه گلستان انجام شده است.

۷- اظهارنامه نحوه استفاده از هوش مصنوعی

در هیچ یک از مراحل تهیه و نگارش این مقاله از ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.

۸- مراجع

طهماسبی، ع.، صراف‌زاده، م.ح.، و غفاری، س.ب.، (۱۴۰۲)، "بهینه‌سازی فرآیند اکسیداسیون پیشرفته رادیکال سولفاتی برای کاهش مواد آلی فاضلاب کارخانه خمیر و کاغذ با استفاده از روش سطح پاسخ"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۸(۳)، ۴۷-۵۸.

<https://doi.org/10.22112/JWWSE.2023.370878.1334>

علی‌محمدی، ف.، قبادی‌نژاد، ز.، و برقی، س.م.، (۱۴۰۳)، "بهینه‌سازی شرایط رنگ‌زدایی رنگ Reactive Red 194 از پساب سنتتیک توسط کپک بومی *Trametes species*"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۹(۳)، ۲۹-۴۱.

<https://doi.org/10.22112/jwwse.2024.420674.1377>

فرهادیان، م.، ساکی، آ.، و داوری، ن.، (۱۳۹۶)، "بررسی عوامل مؤثر فرآیندی در تخریب علف‌کش بنتازون در آب‌های آلوده توسط نانوآکسیدهای فلزی تیتانیوم (IV) و آهن (III) برپایه ژئولیت طبیعی"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۲(۳)، ۲۱-۳۲.

<https://doi.org/10.22112/jwwse.2018.92536.1037>

فغانی، ح.، و حشمتی جنت‌مقام، ع.، (۱۳۹۸)، "حذف رنگ‌دانه متیل‌بلو از محلول‌های آبی توسط کامپوزیت بتا سیکلودکسترین/اکسیدروی"، *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۶(۳)، ۱۰۹-۱۲۵.

<https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.15762.3094>

نعمت‌اله‌زاده، ع.، (۱۳۹۵)، "ارائه روشی برای تعیین مستقیم

- modeling of adsorption isotherm systems", *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2-10, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- Gao, Q., Zhu, H., Lou, W.J., Wang, S., and Zhou, C.G., (2014), "Preparation, characterization, and adsorption evaluation of chitosan-functionalized mesoporous composites", *Microporous and Mesoporous Materials*, 193, 15-26, <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.02.025>
- Ho, Y.S., and McKay, G., (1999). "Pseudo-second order model for sorption processes", *Process biochemistry*, 34(5), 451-465, [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)
- Liou, T.H., Chen, G.W., and Yang, S., (2022), "Preparation of amino-functionalized mesoporous SBA-15 nanoparticles and the improved adsorption of tannic acid in wastewater", *Nanomaterials*, 12(5), 791, <https://doi.org/10.3390/nano12050791>
- Masoudnia, S., Habibi Juybari, M., Mehrabian, R.Z., Ebadi, M., and Kaveh, F., (2020) "Efficient dye removal from wastewater by functionalized macromolecule chitosan-SBA-15 nanofibers for biological approaches", *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, 118-130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.158>
- Mirzavand, M., and Bagheri, R., (2020), "The water crisis in Iran: Development or destruction", *World Water Policy*, 6(1), 89-97, <https://doi.org/10.1002/wwp2.12023>
- Oliveira, D.E., Chagas, J.A., De Lima, A.L., and Mota, C.J., (2022), "CO₂ capture over MCM-41 and SBA-15 mesoporous silicas impregnated with chitosan", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(29), 10522-10530, <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c00385>
- Pal, P., Pal, A., Nakashima, K., and Yadav, B.K., (2021). "Applications of chitosan in environmental remediation: A review", *Chemosphere*, 266, 128934, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128934>
- Patil, Y., Attarde, S., Dhake, R., Fegade, U., and Alaghaz, A.N.M., (2023), "Adsorption of Congo red dye using metal oxide nano-adsorbents: Past, present, and future perspective", *International Journal of Chemical Kinetics*, 55(10), 579-605, <https://doi.org/10.1002/kin.21675>
- Pham, S.T., Nguyen, M.B., Le, G.H., Pham, T.T.T., Quan, T.T.T., Nguyen, T.D., Son, T.L., and Vu, T.A., (2019), "Cellulose conversion to 5 Hydroxymethyl Furfural (5-HMF) Using Al-Incorporated SBA-15 as Highly Efficient Catalyst", *Journal of Chemistry*, 1, 1-8, <https://doi.org/10.1155/2019/5785621>
- Prabhu, A., Sudha, V., Pachamuthu, M.P., Sundaravel, B., and Bellucci, S., (2022), "Ultrasonic synthesis of Al-SBA-15 nanoporous catalyst for t-Butylation of ethylbenzene", *Journal of Nanomaterials*, 2022(1), 2512223, <https://doi.org/10.1155/2022/2512223>
- Rinaudo, M., (2006), "Chitin and chitosan: Properties and applications", *Progress in Polymer Science*, 31(7), 603-632, <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>
- Safa, Y., and Bhatti, H.N., (2011), "Adsorptive removal ثابت‌های ایزوترم‌های فرایندهای جذب و ارزیابی آن با نتایج تجربی", *علوم و مهندسی جداسازی*, ۸(۲), ۳۱-۴۱, <https://doi.org/10.22103/jsse.2017.1450>
- Agarwala, R., and Mulky, L., (2023). "Adsorption of dyes from wastewater: A comprehensive review", *ChemBioEng Reviews*, 10(3), 326-335, <https://doi.org/10.1002/cben.202200011>
- Al-Amrani, W.A., Hanafiah, M.A.K.M., and Mohammed, A.H.A., (2022), "A comprehensive review of anionic azo dyes adsorption on surface-functionalised silicas", *Environmental Science and Pollution Research*, 29(51), 76565-76610, <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23062-0>
- Alves, R.T., Terceiro, P.S., de Araújo, C.B., Ribeiro, A.S., Pereira, M.S., da Cunha, P.S., de Oliveira, I.N., and Manzoni, V., (2025), "Solvatochromic effects on anionic and protonated forms of methyl orange dye: An experimental and theoretical study", *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 343, 126530, <https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.126530>
- Aranaz, I., Alcántara, A.R., Civera, M.C., Arias, C., Elorza, B., Caballero, A.H., and Acosta, N., (2021), "Chitosan: An overview of its properties and applications", *Polymers*, 13(19), 3256, <https://doi.org/10.3390/polym13193256>
- Babuji, P., Thirumalaisamy, S., Duraisamy, K., and Periyasamy, G., (2023), "Human health risks due to exposure to water pollution: A review", *Water*, 15(14), 2532, <https://doi.org/10.3390/w15142532>
- Bahalkeh, F., Habibi Juybari, M., Zafar Mehrabian, R., and Ebadi, M., (2020), "Removal of Brilliant Red dye (Brilliant Red E-4BA) from wastewater using novel Chitosan/SBA-15 nanofiber", *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 818-825, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.035>
- Boukoussa, B., Mokhtar, A., El Guerdaoui, A., Hachemaoui, M., Ouachtak, H., Abdelkrim, S., Hamacha, R., Ait Addi, A., Babou, S., Boudina, B., Bengueddach, A., and Hamacha, R., (2021). "Adsorption behavior of cationic dye on mesoporous silica SBA-15 carried by calcium alginate beads: Experimental and molecular dynamics study", *Journal of Molecular Liquids*, 333, 115976, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115976>
- Costa, J.A.S., de Jesus, R.A., Santos, D.O., Neris, J.B., Figueiredo, R.T., and Paranhos, C.M., (2021), "Synthesis functionalization, and environmental application of silica-based mesoporous materials of the M41S and SBA-n Families: A review", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(23), 105259, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105259>
- Dhaneswara, D., Zulfikar, N., Fatriansyah, J.F., Mastuli, M.S., and Suhariadi, I., (2023), "Adsorption capacity of Mesoporous SBA-15 particles synthesized from corncobs and rice husk at different CTAB/P123 ratios and their application for dyes adsorbent", *Evergreen*, 10(2), 924-930, <https://doi.org/10.5109/6792887>
- Foo, K.Y., and Hameed, B.H., (2010), "Insights into the

- of direct dyes by low-cost rice husk: Effect of treatments and modifications”, *African Journal of Biotechnology*, 10(16), 3128-3142, <https://doi.org/10.5897/AJB10.1302>
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A.V., Olivier, J.P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., and Sing, K.S., (2015), “Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)”, *Pure and Applied Chemistry*, 87(9-10), 1051-1069, <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- Tamer, T.M., Sadik, W.A.A., Elady, R.A., Omer, A.M., Abd-Ellatif, M.M., and Mohy-Eldin, M.S., (2024), “Novel amino-ethyl chitosan hydrogel for methyl orange removal from waste water”, *Desalination and Water Treatment*, 317, 100122, <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100122>
- Vallet-Regi, M., Rámila, A., Del Real, R.P., and Pérez-Pariente, J., (2001), “A new property of MCM-41: Drug delivery system” *Chemistry of Materials*, 13(2), 308-311, <https://doi.org/10.1021/cm0011559>
- Wang, S., and Peng, Y., (2010), “Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment”, *Chemical engineering journal*, 156(1), 11-24, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.029>
- Wang, S., Sun, H., Ang, H.M., and Tadé, M.O., (2013), “Adsorptive remediation of environmental pollutants using novel graphene-based nanomaterials”, *Chemical Engineering Journal*, 226, 336-347, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.04.070>
- Wang, J., and Guo, X., (2020), “Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method”, *Chemosphere*, 258, 127279, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127279>
- Wang, Q., Jia, X., Jin, M., Guo, R., Niu, B., Yan, H., and Wang, H., (2023), “A magnetically recyclable carboxyl-functionalized chitosan composite for efficiently removing methyl orange from wastewater: Isotherm, kinetics, thermodynamic, and adsorption mechanism”, *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 126631, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126631>
- Zabi, N.Z., Ibrahim, W.N.W., Zainal Abidin, N.H., Mat Salleh, S.S., Shahrul Effendi, F.A., Mohamed Idrus, I.F., Md Rasid, H., Mat Hadzir, N., Mohamad Hanapi, N.S., and Muhammad, M., (2021), “Analytical comparative studies of adsorption efficiency of MCM-41 and SBA-15 on removal of anionic-azo and cationic dyes from aqueous sample”, *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 25(5), 831-847.
- Zhao, D., Feng, J., Huo, Q., Melosh, N., Fredrickson, G.H., Chmelka, B.F., and Stucky, G.D., (1998), “Triblock copolymer syntheses of mesoporous silica with periodic 50 to 300 angstrom pores”, *Science*, 279, 549, <https://doi.org/10.1126/science.279.5350.548>



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

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

هزینه چاپ آگهی در نشریات انجمن

نوع	مبلغ (ریال)
۱ صفحه در یک شماره	۲۰۰۰۰۰۰
۲ صفحه در یک شماره	۴۰۰۰۰۰۰
۱ صفحه در چهار شماره پیایی*	۹۰۰۰۰۰۰
۲ صفحه در چهار شماره پیایی*	۱۲۰۰۰۰۰۰

* شامل یک‌سال عضویت حقوقی انجمن

حق عضویت اعضای حقیقی

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

شماره حساب: ۱۳۵۷۲۰۶۲۳

شماره شبدا: IR9301800000000000135720623

شماره کارت مجازی: ۵۸۵۹-۸۳۷۰-۰۹۹۰-۳۱۰۱

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

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

جدول مزایای اعضای حقوقی طرح جدید

مزایای عضویت	سطح (مبلغ پرداختی)	عضویت	برنزی (سالانه ۱۰ میلیون تومان)	نقره‌ای (سالانه ۱۵ میلیون تومان)	طلایی (سالانه ۲۰ میلیون تومان)	الماسی (سالانه ۲۵ میلیون تومان)
دریافت اعتبار یک‌ساله (نحوه استفاده از اعتبار دریافتی، در ذیل جدول شرح داده شده است)			سالانه ۵ میلیون تومان	سالانه ۸ میلیون تومان	سالانه ۱۲ میلیون تومان	سالانه ۱۵ میلیون تومان
درج لوگوی شرکت در نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب و خبرنامه و سایت انجمن (با مشخص بودن سطح عضویت) در مدت زمان عضویت			*	*	*	*
دریافت اشتراک یک ساله نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب به صورت رایگان (۴ شماره) در مدت زمان عضویت			*	*	*	*
درج رایگان آگهی نیم صفحه (با متن دلخواه) در یک شماره نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب در مدت زمان عضویت					*	*
ارائه ۵۰٪ تخفیف در اجاره غرفه نمایشگاهی هم‌زمان با همایش‌های سالانه انجمن در مدت زمان عضویت (در صورت داشتن اعتبار، مبلغ اجاره غرفه از اعتبار کسر خواهد شد)					*	*
امکان انتقال ۵۰٪ از اعتبار باقیمانده به سال بعد (در صورت تمدید عضویت)					*	*
امکان برگزاری کارگاه و وبینار کاربردی (براساس 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

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

و در سایت اعلام کند.

❖ فایل‌های لازم

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

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

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

- فایل مشخصات نویسندگان.

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

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

❖ نرم‌افزار حروف‌چینی: نرم‌افزار Microsoft Word 2013 یا بالاتر

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

❖ نام نویسنده(گان):

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

❖ نام مؤسسه:

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

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

توجه به نکات زیر در ارسال مقاله ضروری است:

- ارسال مقاله منحصراً از طریق ثبت‌نام در سامانه الکترونیک مجله علوم و مهندسی آب و فاضلاب انجام می‌شود.
- نویسنده‌ای که برای بار چندم اقدام به ارسال مقاله می‌نماید، حتماً باید از طریق صفحه شخصی قبلی خود نسبت به ارسال مقاله اقدام نموده و به‌هیچ عنوان دوباره در سامانه ثبت نام نکند.
- وارد کردن اسامی و اطلاعات کامل تمامی نویسندگان در سامانه و در محل مربوط به مشخصات نویسندگان مقاله، الزامی است.

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

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

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

❖ دستورالعمل نگارش و تنظیم مقالات:

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

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

❖ انواع مقالات:

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

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

❖ چکیده فارسی:

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

❖ چکیده انگلیسی: باید دقیقاً معادل چکیده فارسی باشد.

❖ واژه‌های کلیدی فارسی و انگلیسی:

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

❖ متن مقاله:

متن کامل مقاله در دو فایل جداگانه شامل یک فایل ورد با قلم نازک B Nazanin با اندازه ۱۲ برای زبان فارسی و قلم Times New Roman با اندازه ۱۰ برای زبان انگلیسی و با فاصله بین خطوط ۱/۵ سانتیمتر به صورت تک‌ستونی و یک فایل pdf فرمت 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 قدرانی در انتهای مقاله و قبل از بخش مراجع نوشته می‌شود. بخش‌های مختلف متن و همه صفحات و همین‌طور تمام سطرها به ترتیب شماره‌گذاری می‌شوند.

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

❖ جدول‌ها و شکل‌ها:

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

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

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

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

❖ معادلات:

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

❖ مراجع:

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

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

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

در نگارش انواع مراجع از فرمت زیر استفاده شود:

• مقاله فارسی:

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

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

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

• مقاله غیر فارسی:

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

• مقاله منتشر نشده:

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

• کتاب:

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

• بخشی از کتاب:

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

• موسسه به جای نویسنده:

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

• مقالات کنفرانسی:

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

• پایان نامه:

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

• سایت اینترنتی:

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

دستورالعمل استفاده از هوش مصنوعی و مدل‌های زبانی

در تهیه مقالات

مقدمه

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

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

۱- استفاده از هوش مصنوعی به‌عنوان دستیار پژوهشی و

ابزار ویرایش

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

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

نتایج پژوهشی

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

۳- شفاف سازی در مورد استفاده از هوش مصنوعی

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

۴- استفاده از هوش مصنوعی در جستجوی منابع علمی

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

۵- حفظ استقلال علمی پژوهشگران و اصالت تحقیقات

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

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

۶- مسئولیت پذیری نویسندگان در برابر محتوا

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

نتیجه گیری

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

❖ تذکر مهم:

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

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering

Vol. 11, No. 2, Summer 2026

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

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

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

Editorial Board:



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

Industrial Water and Wastewater Policy Council:

Amini, H. (Ph.D.): Managing Director, National Water and Wastewater Engineering Company (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.): Managing Director, Tehran Wastewater Company

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

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

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering

Volume 11, No. 2, Summer 2026

Preface (From Hydrology to Water Security: Why Should Iran Play a Key Role in the Ninth Phase of UNESCO's Hydrological Programme?)	2
Dr. Mohammad Hossein Sarrafzadeh	

Papers

A Review of Various Models for Estimating Background Leakage in Water Distribution Networks	4
Bitra Heidari, Mohamad Reza Jalili Ghazizadeh and Iman Moslehi	
Pipe Failure Prediction Using Weighted Logistic Regression for Managing Imbalanced and Recurring Events (Case Study: District 2 of Tehran)	17
Mohsen Sattari and Homayoun Motiee	
Investigating the Efficiency of Chloroferric and Polyaluminum Chloride Coagulants in Removing Arsenic from Contaminated Water in the Presence of Different Doses of Coagulant Aid	31
Tooran Aghaalizadeh, behzad Koochi and Mehdi Mirzamohammadi	
Developing an Organizational Sustainable Development Model in the Water and Wastewater Industry: An Analytical Review Based on Mashhad Water and Wastewater Company Experiences	41
Mohammad Hosseini, Mohammad Talati, Ali Salami Koocheh Bagh, Masoud Abdollahpoor, Fariba Ghanbari and Samaneh Tavakoli Aminian	
Content Analysis of Written Messages on Water Demand Management in Tehran: Persuasive Techniques, Framing, and Actionability	59
Zahra Mehri, Bagher Sarukhani, Yousef Khojir and Omidali Masoudi	
Evaluation of the Efficiency of Chitosan-Supported Mesoporous SBA-15 Nanocomposite for the Removal of Methyl Orange from Aqueous Solutions	76
Sara Mehri, Mohammad Saleh Shafeeyan, Mohammad Habibi Juybari	