



ISSN 2588-3941

نشریه علمی

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

سال دهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴

نشریه علمی

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

سال دهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴

انجمن آب و فاضلاب ایران

۲ پیشگفتار (از داده تا تصمیم: آینده مدیریت آب و فاضلاب با هوش مصنوعی)
دکتر محمدجواد عبدی و دکتر سیدحسین سجادی فر

مقالات علمی

۴ بررسی فنی-اقتصادی روش‌های توزیع آب شرب شهری
فرزانه فتوحی فیروزآباد، محمدرضا اختصاصی و عبدالرسول نگارش

۱۹ تعیین ضریب حداکثر تقاضای لحظه‌ای در شبکه‌های توزیع آب
رامتین مظاهری، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده و همایون مطیعی

۲۹ شبیه‌سازی عددی تأثیر زاویه برخورد جریان بر الگوی جریان حول پایه‌های پل مرکب
معصومه رستم‌آبادی، حمیدرضا سماع و سیدحسین مهاجری

۴۳ تحلیل ریاضی انتقال خط لوله بخار زیراتمسفیری در نمک‌زدایی آب دریا
منا شجاعی و محسن نصرتی

۵۵ بررسی سهم ویژگی‌های تصفیه‌خانه فاضلاب در نتایج مدل‌های هوش مصنوعی با به‌کارگیری SHAP
وحید نورانی، مهسا دهقان و آیدا حسینی بقانام

۷۱ مدل‌سازی و پیش‌بینی متوسط مصرف آب هر واحد خانگی شهری متأثر از همه‌گیری کووید-۱۹: مطالعه موردی
استان مازندران
معصومه شیرواژن، ربابه کاظمی و محمدعلی رضانی

مطالب عمومی

۸۰ میزگرد (نشست تخصصی مدیریت لجن در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب)

۹۰ ایده برتر

۹۶ معرفی کتاب

۹۸ اخبار انجمن

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

سال ۱۰، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴

این نشریه دارای مجوز کمیسیون بررسی نشریات علمی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، به شماره ۳/۱۸/۲۹۰۱۲۹ مورخ ۱۳۹۵/۱۲/۱۶ و مجوز وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی به شماره ۸۶۰۹۲ مورخ ۱۳۹۸/۱۰/۳۰ است.

انجمن آب و فاضلاب ایران

دکتر مسعود تابش

دکتر علی حقیقی

صاحب امتیاز

مدیر مسئول

سر دبیر

اعضای

هیئت تحریریه



دکتر مسعود تابش: استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران
دکتر تیکو تانیمبو: دانشیار، دانشگاه ویت واتر سراند، ژوهانسبورگ، آفریقای جنوبی
دکتر علی ترابیان: استاد دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران
دکتر افشین تکدستان: استاد دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز
دکتر محمدرضا جلیلی قاضی زاده: دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی
دکتر عبدالله رشیدی مهرآبادی: دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی
دکتر دراکان ساویچ: استاد، دانشگاه اگزتر، لندن
دکتر سید حسین سجادی فر: شرکت آب و فاضلاب تهران و استادیار دانشگاه آزاد اسلامی
دکتر محمد حسین صراف زاده: استاد دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران و رئیس کرسی یونسکو در 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 فرماني: دانشیار، دانشگاه اگزتر، انگلستان
دکتر اوراز یو گیوستولوسی: 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: مدیر عامل شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور
مهندس علی اصغر قانع: رئیس کانون هماهنگی دانش، صنعت، بازار آب و فاضلاب، معاونت علمی ریاست جمهوری
مهندس مجید قنادی: مدیر دفتر تحقیقات، توسعه فناوری و ارتباط با صنعت، شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور
مهندس حمیدرضا هنری: عضو هیئت علمی بازنشسته دانشگاه علوم پزشکی تهران

شورای سیاستگذاری

صنعت آب و فاضلاب

ناهِید اختری

ناهِید 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@jwwse.ir

کارشناس اجرایی:

طراح و صفحه آرا:

ناشر:

آدرس:

تلفن:

نمبر:

شاپا چاپی:

شاپا الکترونیکی:

ایمیل:

پیشگفتار (از داده تا تصمیم: آینده مدیریت آب و فاضلاب با هوش مصنوعی)..... ۲
دکتر محمدجواد عبدی و دکتر سیدحسین سجادی فر

مقالات علمی

۴..... بررسی فنی-اقتصادی روش‌های توزیع آب شرب شهری
فرزانه فتوحی فیروزآباد، محمدرضا اختصاصی و عبدالرسول نگارش

۱۹..... تعیین ضریب حداکثر تقاضای لحظه‌ای در شبکه‌های توزیع آب
رامتین مظاهری، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده و همایون مطیعی

۲۹..... شبیه‌سازی عددی تأثیر زاویه برخورد جریان بر الگوی جریان حول پایه‌های پل مرکب
معصومه رستم‌آبادی، حمیدرضا سماع و سیدحسین مهاجری

۴۳..... تحلیل ریاضی انتقال خط لوله بخار زیراتمسفیری در نمک‌زدایی آب دریا
منا شجاعی و محسن نصرتی

۵۵..... بررسی سهم ویژگی‌های تصفیه‌خانه فاضلاب در نتایج مدل‌های هوش مصنوعی با به‌کارگیری SHAP
وحید نورانی، مهسا دهقان و آیدا حسینی بقانام

۷۱..... مدل‌سازی و پیش‌بینی متوسط مصرف آب هر واحد خانگی شهری متأثر از همه‌گیری کووید-۱۹:
مطالعه موردی استان مازندران
معصومه شیرواژن، ربابه کاظمی و محمدعلی رضانی

مطالب عمومی

۸۰..... میزگرد (نشست تخصصی مدیریت لجن در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب).....

۹۰..... ایده برتر.....

۹۶..... معرفی کتاب.....

۹۸..... اخبار انجمن.....



از داده تا تصمیم: آینده مدیریت آب و فاضلاب با هوش مصنوعی



دکتر محمدجواد عبدی
شرکت آب و فاضلاب استان تهران



دکتر سیدحسین سجادی فر
شرکت آب و فاضلاب استان تهران

اندیشیدن مدیران و ساختار تصمیم‌گیری شرکت‌ها ایجاد می‌کنند. در گذشته، مدیریت آب و فاضلاب بیشتر بر واکنش به مشکلات استوار بود. نشستی که رخ می‌داد، قطعی آبی که اتفاق می‌افتاد، یا مصرفی که از الگوهای معمول فراتر می‌رفت، همه محرک‌هایی بودند که مدیران را به تصمیم‌گیری وادار می‌کردند. اما امروز این امکان فراهم شده است که پیش از وقوع بحران‌ها، نشانه‌های آن شناسایی شود و اقدام‌های لازم صورت گیرد. این همان تفاوت بنیادینی است که هوش مصنوعی با خود به‌همراه می‌آورد: حرکت از مدیریت واکنشی به مدیریت پیش‌نگر.

برای درک اهمیت این تحول، کافی است به یکی از اساسی‌ترین مشکلات صنعت آب و فاضلاب یعنی هدررفت منابع توجه کنیم. در بسیاری از کشورها، درصد قابل‌توجهی از آب تولیدشده هرگز به‌دست مصرف‌کننده نمی‌رسد و در مسیر انتقال به‌دلیل نشتی و شکستگی‌ها از بین می‌رود. هر یک از این رخدادها علاوه بر خسارت مالی، پیامدهای اجتماعی و محیط‌زیستی گسترده‌ای به‌دنبال دارد. اکنون تصور کنید سامانه‌ای مبتنی بر الگوریتم‌های یادگیری ماشین بتواند با تحلیل داده‌های فشار، دبی و کیفیت آب، به‌طور لحظه‌ای احتمال بروز نشتی را پیش‌بینی کند و حتی موقعیت تقریبی آن را تعیین نماید. چنین قابلیت‌هایی نه یک رؤیای دور، بلکه واقعیتی است که در بسیاری از نقاط جهان در حال اجرا است و می‌تواند در کشور ما نیز به‌سرعت عملیاتی شود.

البته باید یادآور شد که در همین سال‌های اخیر اقدامات ارزشمندی در شرکت‌های آب و فاضلاب کشور صورت گرفته است. تجربه‌های موفق در زمینه بهره‌گیری از سامانه‌های پیش‌آنلاین، برنامه‌های بهینه‌سازی عملیاتی و نیز بهبود سطح خدمات‌رسانی نشان می‌دهد که این صنعت نه‌تنها از تحولات جهانی عقب نیست، بلکه زمینه‌های مستحکمی برای گام‌های بعدی دارد. وجود منابع انسانی متخصص و متعهد نیز سرمایه‌ای بی‌بدیل است که ظرفیت اجرای تحولات عمیق را فراهم می‌سازد. چنین پشتوانه‌ای موجب می‌شود نقشه‌راه هوشمندسازی نه از نقطه صفر، بلکه بر پایه دستاوردهای واقعی و تجربیات موفق آغاز شود.

هوش مصنوعی تنها به موضوع نشتی محدود نمی‌شود. یکی دیگر از عرصه‌های حیاتی، مدیریت دارایی‌های فیزیکی است. خطوط انتقال و توزیع، ایستگاه‌های پمپاژ، مخازن ذخیره، تصفیه‌خانه‌ها و سامانه‌های جمع‌آوری فاضلاب، دارایی‌هایی هستند که نگهداری و نوسازی آن‌ها هزینه‌های هنگفتی می‌طلبد. چالش اصلی برای مدیران این است که بدانند کدام بخش از شبکه باید زودتر بازسازی شود و کدام دارایی هنوز ظرفیت خدمت‌رسانی دارد. در این زمینه، الگوریتم‌های هوشمند می‌توانند با تحلیل

در جهان امروز که منابع حیاتی با تهدیدهای متعدد روبه‌رو هستند، هیچ موضوعی به‌اندازه مدیریت آب و فاضلاب اهمیت و فوریت ندارد. مدیران ارشد این صنعت هر روز با پرسش‌هایی بنیادین مواجه می‌شوند: چگونه می‌توان شبکه‌ای فرسوده را به سیستمی پایدار تبدیل کرد؟ چگونه باید میان هزینه‌های سنگین سرمایه‌گذاری و محدودیت‌های مالی تعادل برقرار نمود؟ و چگونه می‌توان به دغدغه‌های شهروندان در خصوص استمرار و بهبود خدمات پاسخ داد؟ پاسخ به این پرسش‌ها دیگر تنها با ابزارهای سنتی ممکن نیست، بلکه نیازمند نگرشی نوین و آینده‌نگر است؛ نگرشی که در آن هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین نقشی اساسی ایفا می‌کنند.

هوش مصنوعی را نباید صرفاً مجموعه‌ای از فناوری‌ها دانست. آنچه اهمیت دارد، تغییری است که این ابزارها در شیوه

داده‌های تاریخی و شرایط فعلی تجهیزات، الگوهای فرسایش و خرابی را پیش‌بینی کنند و بدین ترتیب اولویت‌بندی دقیقی برای سرمایه‌گذاری ارائه دهند. این امر به معنای استفاده بهینه از منابع مالی محدود و افزایش بازدهی دارایی‌های موجود است.

افزون بر این، پیش‌بینی تقاضای آب یکی دیگر از عرصه‌هایی است که هوش مصنوعی در آن نقشی تعیین‌کننده ایفا می‌کند. مصرف آب نه تنها تحت تأثیر عوامل جمعیتی، بلکه متغیرهای پیچیده‌ای چون تغییرات آب‌وهوایی، الگوهای مصرفی خانوارها و مناسبت‌های اجتماعی نیز بر آن اثرگذار است. روش‌های سنتی قادر به تحلیل این پیچیدگی‌ها نیستند، اما الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند با بررسی داده‌های حجیم و متنوع، الگوهای مصرف را شناسایی کرده و پیش‌بینی دقیقی از تقاضا ارائه دهند. چنین دانشی به مدیران این امکان را می‌دهد که از قبل برنامه‌ریزی کرده و از بروز کمبود یا فشار بیش از حد بر شبکه جلوگیری کنند.

از سوی دیگر، مصرف انرژی در تأسیسات آب و فاضلاب موضوعی است که بار مالی قابل‌توجهی بر دوش شرکت‌ها می‌گذارد. سامانه‌های هوشمند قادرند الگوهای بهینه بهره‌برداری از پمپ‌ها و تجهیزات را طراحی کنند و با هماهنگی میان مصرف انرژی و نیاز آبی، هزینه‌ها را به‌طور چشمگیری کاهش دهند. این امر افزون بر صرفه‌جویی مالی، به کاهش ردپای کربنی شرکت‌ها و ایفای نقش مسئولانه‌تر در برابر محیط‌زیست نیز منجر می‌شود. بدیهی است که مسیر پیاده‌سازی هوش مصنوعی ساده و بی‌چالش نیست. نخستین گام در این مسیر، ایجاد زیرساخت‌های داده‌ای قابل اعتماد است. بدون داده‌های دقیق و یکپارچه، هیچ الگوریتمی نمی‌تواند نتایج اتکاپذیر ارائه دهد. بنابراین، شرکت‌ها باید از همان ابتدا به جمع‌آوری، پالایش و استانداردسازی داده‌ها توجه ویژه‌ای نشان دهند. ایجاد بانک‌های اطلاعاتی جامع، استفاده از حسگرهای هوشمند و سامانه‌های تله‌متری پیشرفته بخشی از این فرآیند است که سرمایه‌گذاری اولیه اما ضروری را می‌طلبد. گام بعدی، توانمندسازی نیروی انسانی است. هیچ فناوری بدون مدیران و کارشناسان آگاه به نتیجه مطلوب نمی‌رسد. آموزش کارکنان برای کار با داده‌ها، آشنایی با اصول هوش مصنوعی و ارتقای فرهنگ داده‌محوری در سازمان، پیش‌شرط‌هایی هستند که باید به‌طور جدی دنبال شوند. مدیران ارشد باید بدانند که هوش مصنوعی نه جایگزین انسان، بلکه یاری‌رسان اوست و این همکاری انسان و ماشین است که منجر به بهترین نتایج خواهد شد.

پس از آن، انتخاب پروژه‌های پایلوت اهمیت می‌یابد. شرکت‌ها

نباید در همان آغاز به دنبال اجرای گسترده و همه‌جانبه باشند. بهترین راه، شروع از پروژه‌های محدود اما راهبردی است؛ پروژه‌هایی که ارزش افزوده بالایی داشته و امکان اجرا در مدت کوتاه را نیز فراهم کنند. برای مثال، پیش‌بینی نشت در یک منطقه خاص یا بهینه‌سازی مصرف انرژی در یک تصفیه‌خانه می‌تواند نقطه آغاز مناسبی باشد. موفقیت این پایلوت‌ها اعتماد مدیران و کارکنان را جلب می‌کند و زمینه را برای گسترش تدریجی به سطح کل شبکه فراهم می‌سازد.

از منظر مدیریتی، ترسیم یک نقشه راه جامع اهمیت ویژه‌ای دارد. این نقشه راه باید شامل مراحل مشخصی باشد: جمع‌آوری و استانداردسازی داده‌ها، توسعه زیرساخت‌های تحلیلی، انتخاب و اجرای پایلوت‌ها، ارزیابی نتایج، گسترش تدریجی به کل شبکه و نهایتاً نهادینه‌سازی فرهنگ تصمیم‌گیری مبتنی بر داده. هر یک از این مراحل باید با شاخص‌های عملکردی دقیق سنجیده شود تا پیشرفت کار به‌طور مستمر ارزیابی و اصلاح شود.

فراتر از جنبه‌های فنی و اجرایی، مدیران باید چشم‌انداز کلان‌تری نیز در نظر داشته باشند. هوش مصنوعی می‌تواند جایگاه شرکت‌های آب و فاضلاب را در سطح ملی و حتی بین‌المللی ارتقا دهد. شرکتی که از فناوری‌های نوین برای بهینه‌سازی عملیات خود بهره می‌برد، نه تنها بهره‌وری بالاتری خواهد داشت، بلکه در عرصه‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی نیز الگو و مرجع خواهد بود. چنین شرکتی می‌تواند اعتماد عمومی را افزایش دهد، سرمایه‌گذاران را جذب کند و در مسیر توسعه پایدار گام بردارد. در پایان باید تأکید کرد که هوش مصنوعی تنها یک ابزار فناورانه نیست، بلکه رویکردی مدیریتی است که بر داده‌های دقیق، تحلیل‌های پیش‌نگر و تصمیم‌گیری هوشمندانه تکیه دارد. مدیرانی که امروز این مسیر را آغاز می‌کنند، در واقع آینده‌ای روشن‌تر برای شهروندان، پایداری بیشتر برای منابع و جایگاهی مطمئن‌تر برای شرکت‌های خود ترسیم خواهند کرد. آینده صنعت آب و فاضلاب به‌دست کسانی شکل خواهد گرفت که نگاه هوشمندانه را در مدیریت جاری می‌سازند و با تدبیر و برنامه‌ریزی گام‌های استوار برمی‌دارند.

Research Paper

مقاله پژوهشی

Technical-Economic Study of Urban Drinking Water Distribution Methods

بررسی فنی-اقتصادی روش‌های توزیع آب شرب شهری

Farzaneh Fotuhi Firuzabad^{1*}, Mohammadreza Ekhtesasi² and Abdorasoul Negaresh³

فرزانه فتوحی فیروزآباد^{۱*}، محمدرضا اختصاصی^۲ و عبدالرسول نگارش^۳

1- Assistant Professor of Department of Nature Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran.

۱- استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.

2- Professor, Natural Resources and Desert Studies Faculty, Yazd University, Yazd, Iran.

۲- استاد دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد، یزد، ایران.

3- PhD Student of Civil-Water Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Iran.

۳- دانشجوی دکتری عمران- مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران.

*Corresponding Author, Email:

*نویسنده مسئول، ایمیل: f.fotouhi@ardakan.ac.ir

f.fotouhi@ardakan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۲

Received: 02/07/2024

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

Revised: 03/03/2025

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

Accepted: 11/03/2025

© انجمن آب و فاضلاب ایران

© IWWA

Abstract

چکیده

The separation of potable water from non-potable sanitary water is a crucial strategy for the quantitative and qualitative management of water consumption. In this study, scenarios for separating drinking water from sanitary water were evaluated for the Gazorgh region of Yazd Province using EPANET software from both technical and economic perspectives. The scenarios included a dual water distribution network, as well as governmental and private drinking water withdrawal sites. The economic analysis of these methods, conducted using the Net Present Value (NPV) approach, revealed that all scenarios yielded a positive NPV, indicating their economic viability. A comparison of the unit price of drinking water per cubic meter showed a slight difference between the dual water distribution network method (63,900 Rials) and the governmental drinking water withdrawal site method (58,600 Rials). However, in terms of the NPV index, the dual water distribution network method demonstrated a significantly higher and more economical value (277.40 million Rials) compared to the governmental drinking water withdrawal site method (39.20 million Rials). Additional factors such as population age, ease of access to drinking water, and social acceptance of the dual water network were also considered in comparison to governmental and private water withdrawal methods. The implementation of this project could help promote a culture of water conservation by implementing equitable tariffs for drinking water and rationalizing sanitary water usage.

جداسازی آب آشامیدنی از آب غیرآشامیدنی یکی از مؤلفه‌های مدیریت کمی و کیفی مصرف را تشکیل می‌دهد. سناریوهای تفکیک آب آشامیدنی از غیرآشامیدنی با استفاده از نرم‌افزار EPANET در گازرگه یزد مورد بررسی فنی و اقتصادی قرار گرفت. سناریوها شامل شبکه دوگانه توزیع آب، جایگاه‌های دولتی و خصوصی برداشت آب است. نتایج تحلیل اقتصادی روش‌ها با استفاده از شاخص ارزش فعلی خالص نشان داد که همه روش‌ها دارای شاخص NPV مثبت هستند که این نشان‌دهنده موفق بودن پروژه‌ها از نظر اقتصادی است. در رابطه با مقایسه قیمت واحد فروش آب شرب به ازای هر مترمکعب برای روش شبکه توزیع دوگانه آب (۶۳۹۰۰ ریال)، نسبت به روش جایگاه دولتی برداشت آب (۵۸۶۰۰ ریال) اختلاف اندکی وجود دارد، ولی روش شبکه توزیع دوگانه آب دارای NPV بالاتر و اقتصادی‌تر (۲۷۷/۴۰ میلیون ریال) نسبت به روش جایگاه دولتی برداشت آب (۳۹/۲۰ میلیون ریال) است. پارامترهایی از جمله استقبال افراد مسن از شبکه دوگانه، سهولت دسترسی مردم به آب شرب و توزیع کاملاً بهداشتی آب، اجرای این روش را در بافت قدیم تأیید می‌نماید. با اجرای این پروژه می‌توان با تعرفه پلکانی قیمت آب آشامیدنی و سهمیه‌بندی آب بهداشتی، فرهنگ صرفه‌جویی مصرف آب را به مراتب عادلانه‌تر از وضعیت کنونی مدیریت نمود.

Keywords: Governmental and Private Drinking Water Withdrawal Sites, Dual Water Distribution Network, Yazd City, Consumption Management.

کلمات کلیدی: جایگاه‌های دولتی و خصوصی برداشت آب، شبکه توزیع دوگانه آب، شهر یزد، مدیریت مصرف.

در تعاریف شرکت‌های مهندسی آب و فاضلاب و مشاورین مربوطه، تحت موضوع نصب شیر برداشت در مناطق مختلف با شبکه محدود، نه به صورت یک شبکه کاملاً وسیع و گسترده و به موازات شبکه فعلی، مطرح بوده است. برای مثال در شهرهای قم، کاشان و آبادان به صورت شیر برداشت و در مناطق بجنستان و خور و بیابانک به شکل شبکه محدود شرب مستقل اجرا شده است (پهلوانی و همکاران، ۱۳۹۱). به هر حال وضعیت بحرانی کمبود آب ایجاب می‌نماید تا در مناطق مختلف اقلیمی بسته به شرایط منطقه و نیاز آبی نسبت به مدیریت و گزینه‌های مختلف جداسازی شبکه آب شرب و بهداشت اقدام شود (Nguyen, 2003).

در این بخش، به یک سری تحقیقات مرتبط با موضوع مقاله حاضر، اشاره می‌شود. گلابچی (۱۳۸۸) با بررسی سیستم‌های مختلف آبرسانی و توزیع آب شهری، با توجه به معیارهایی از جمله در دسترس بودن آب شرب، عدم تصفیه یا تهیه آب برای مصارفی غیر از شرب، عدم نیاز به طراحی، عدم نیاز به تعداد بالای نیروی انسانی متخصص و بهره‌بردار و غیره، اولویت اجرایی روش‌های آبرسانی را بدین ترتیب مشخص کرده است، اولویت اول: آبرسانی به وسیله شبکه و بسته‌بندی، اولویت دوم: آبرسانی از طریق شبکه توزیع دوگانه، اولویت سوم: آبرسانی از طریق شبکه توزیع واحد، اولویت چهارم: آبرسانی سیار. سربندی فراهانی (۱۳۸۸) مشکلات شهر قم در تأمین آب شرب شهری را بررسی و سپس سیر طراحی و اجرای شبکه دوم توزیع آب شهری در این شهر را ارائه کردند. با بررسی‌های صورت گرفته تنها گزینه قابل اجرا جداسازی آب شرب از سایر مصارف شهری بود؛ اما به دلیل هزینه بالای احداث شبکه توزیع دوم و رساندن آب شرب در داخل منازل مردم، تصمیم به احداث ایستگاه‌های توزیع آب شرب در سطح شهر (شیر برداشت) گرفته شد. مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی گزارشی تحت عنوان شبکه‌های دوگانه توزیع آب (۱۳۹۲) منتشر نمود. در این گزارش عنوان شده است که طرح تفکیک شبکه‌های شرب و غیرشرب در بلندمدت اقتصادی است. در این طرح نسبت سود به هزینه بزرگ‌تر از یک بوده و توجیه اقتصادی این نوع شبکه‌ها را در بر دارد. براساس این گزارش، به منظور انجام این طرح و یک تحلیل مالی و اقتصادی دقیق برای مقایسه تبعات اقتصادی آن با گزینه‌های دیگر، لازم است که مسائل اجتماعی ناشی از بهره‌برداری از دو نوع آب با کیفیت و قیمت مختلف بررسی شده و نتایج آن برای استفاده در طرح‌های مشابه مورد تحلیل قرارگیرد. در گزارش کمیته تحقیقات آب آفریقای جنوبی، امکان استفاده از سیستم‌های دوگانه توزیع آب در آفریقای جنوبی ارزیابی شد (Ilemobade et al., 2009). خشکی

یکی از ابزارهای رویکرد فنی در مدیریت تقاضا استفاده از شبکه‌های دوگانه آبرسانی است (Kotwicki and Al-Otaibi, 2011; Storey et al., 2007). میزان آب مورد نیاز برای شرب و پخت و پز مقدار ناچیزی از مصرف کل مصرف‌کنندگان خانگی و شهری را شامل می‌شود که نیاز به آب با کیفیت بالا و رعایت استانداردهای آب شرب است. این درحالی است که سایر مصارف غیرشرب که بخش بیش‌تری از مصارف شهری را شامل می‌شوند، می‌توانند با کیفیت پایین‌تری برای مشترکین تأمین شوند (Apostolidis et al., 2011). شبکه‌های دوگانه آبرسانی شامل دو شبکه مجزا از هم هستند که آب مورد نیاز مصرف‌کنندگان را از منابع مختلف، با کیفیت متفاوت و برای مصارف شرب و غیرشرب تأمین می‌کنند (Oosterholt et al., 2007). از آنجایی که در این شبکه‌ها آب شرب تنها برای مصارف آشامیدنی و پخت و پز استفاده می‌شود، لذا بهره‌برداری از این شبکه‌ها می‌تواند برداشت آب شیرین از منابع محدود و با کیفیت را کاهش دهد (پهلوانی و همکاران، ۱۳۹۱).

از دلایل مهم بالا بودن مصرف سرانه آب لوله‌کشی در ایران، استفاده از آب آشامیدنی تصفیه‌شده برای سایر مصارف از جمله شست و شوی لباس، ظرف، اتومبیل، استحمام و آبیاری باغچه‌ها است. هم‌چنین میزان هزینه‌ای که در ایران بابت آب آشامیدنی تصفیه شده از مردم گرفته می‌شود برابر با قیمت تمام‌شده آن نیست و بخش اعظم هزینه‌ها برعهده دولت است (عبدالمنافی و مظاهری، ۱۳۹۲). در برخی از شهرهای جهان آب آشامیدنی از آبی که به سایر مصارف می‌رسد، جدا است (Nairizi, 1994; Satterfield, 2009). در بسیاری از مناطق کشور به دلیل بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی، ذخایر منابع آبی به شدت در خطر افتاده است. انتقال آب از یک منطقه به منطقه دیگر نیز علاوه بر هزینه‌های انتقال و چالش‌های محیط‌زیستی، با مشکلات و محدودیت‌های زیادی همراه است. بازیافت پساب و استفاده مجدد از آن‌ها به عنوان آب شرب نیز با محدودیت‌های بهداشتی، هزینه‌ای و روانی همراه است (Menge, 2006; Yi et al., 2011). بنابراین استفاده از تمامی منابع آب از جمله منابع آب بی کیفیت باید مورد توجه و مدیریت خاص قرار گیرد (Rogers et al., 2007; Yang et al., 2006). از سوی دیگر زمانی که تقاضای مصرف آب افزایش یابد، امکانات موجود شبکه‌های توزیع آب جوابگو نخواهد بود و نیاز به توسعه شبکه و تجهیزات آبرسانی پدید می‌آید (عبدالمنافی و مظاهری، ۱۳۹۲).

لازم به ذکر است که تاکنون، شبکه دوم یا جداسازی شبکه‌ها

سیستم توزیع آب شرب (تمام مصارف خانگی با استفاده از آب شرب) (S1)، سیستم توزیع آب شرب و غیرشرب (استفاده از آب دریا صرفاً برای فلاش تانک) (S2)، سیستم توزیع آب شرب و غیرشرب (استفاده از پساب تصفیه شده فاضلاب حاصل از فلاش تانک و سینک آشپزخانه برای مصارف فلاش تانک و آتش‌نشانی) (S3)، روش چهارم (S4) دقیقاً مانند روش سوم است با این تفاوت که نحوه تصفیه فاضلاب در روش چهارم به شکل غیرهوازی و در روش سوم به صورت هوازی است. نتایج آنالیز اقتصادی نشان داد که هزینه‌های سرمایه‌گذاری $S4 > S3 > S2 > S1$ و هزینه‌های جاری $S4 < S2 < S3 < S1$ است. هنگام لحاظ نمودن هر دو نوع هزینه، میزان کل هزینه‌های روش S2 و S4 کم‌تر از سایر روش‌ها و روش S1 پرهزینه‌تر است. به‌طور کلی طی دوره بهره‌برداری ۲۵ سال، روش S4 را مناسب‌ترین روش دانسته‌اند. چون در این روش بیش‌ترین صرفه‌جویی در مصرف آب شرب صورت خواهد‌گرفت و در ضمن نسبت به‌روش سوم از نظر نوع تصفیه، برتری‌های زیادی دارد.

Rasoulkhani et al. (2019) سیستم‌های توزیع دوگانه آب را به‌عنوان یک راه‌حل زیرساختی برای افزایش پایداری و انعطاف‌پذیری سیستم‌های آبرسانی شهری برای بهبود عملکرد و کاهش مصرف انرژی پیشنهاد دادند. برخی مطالعات اهمیت مقبولیت اجتماعی و پذیرش عموم در به‌کارگیری سیستم‌های توزیع دوگانه آب و موفق بودن این پروژه‌ها را خاطر نشان کردند (Garcia-Cuerva et al., 2016). علاوه‌بر عوامل اجتماعی (مانند پذیرش جامعه)، عملکرد سیستم‌های دوگانه بر توسعه زیرساخت‌های جدید نیز متکی است (Kandiah et al., 2019).

فتوحی و همکاران (۱۳۹۸) سناریوهای تفکیک آب آشامیدنی و غیرآشامیدنی را با استفاده از نرم‌افزار تحلیل شبکه EPANET در منطقه صفائیه یزد مورد بررسی فنی و اقتصادی قرار دادند. سناریوها شامل شبکه دوگانه توزیع آب و جایگاه‌های دولتی برداشت آب شرب هستند. نتایج تحلیل اقتصادی روش‌ها با استفاده از شاخص ارزش فعلی خالص (NPV) نشان داد که هر دو روش دارای شاخص NPV مثبت است که این امر نشان‌دهنده موفق بودن پروژه‌ها از نظر اقتصادی است. فتوحی و همکاران (۱۳۹۹) روش شبکه توزیع دوگانه آب در بافت جدید شهر یزد را مورد بررسی فنی-اقتصادی قرار دادند. هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای شبکه دوگانه در محدوده مطالعاتی برابر با ۲۰۳۶۶/۶۶ میلیون ریال به‌دست آمد. میزان هزینه جاری سالیانه ۱۳۰۸/۷۲ میلیون ریال محاسبه شد که این مقدار برابر ۶/۴ درصد سرمایه‌گذاری اولیه است. هزینه توزیع هر مترمکعب آب شرب در بافت جدید به‌ترتیب ۸۷۶۳۰ ریال بود. نتایج

منطقه، فاکتور مهمی در اجرای سیستم‌های دوگانه توزیع آب در آفریقای جنوبی است. بازچرخانی آب، مصرف آب شرب را کاهش می‌دهد. بررسی‌های بین‌المللی نشان می‌دهد که استفاده از آب بازیافتی برای مصارف غیرشرب (فلاش تانک و آبیاری باغ) ۳۰-۶۰ درصد آب شرب را ذخیره می‌نماید. پایداری و طول عمر سیستم‌های دوگانه توزیع آب در بیش‌تر مناطق دنیا، ثابت کرده است که این سیستم‌ها انتخاب بسیار مناسبی برای تأمین آب هستند. در پژوهشی، با توجه به استفاده بیش از ۲۰٪ از کل آب مصرفی برای ماشین لباس‌شویی و هم‌چنین خشک‌سالی‌های اخیر در برخی از شهرهای استرالیا، امکان استفاده از آب بازیافتی در ماشین لباس‌شویی با استفاده از تحلیل SWOT ارزیابی شد (Mainali et al., 2011). گزارش خصوصیات و عملکرد سیستم‌های دوگانه توزیع آب در آمریکا توسط (Grigg et al., 2013) ارائه شد. سیستم‌های دوگانه توزیع آب یک تکنولوژی مناسب برای بهبود کیفیت آب و کاهش هزینه‌های زیرساخت توزیع آب آشامیدنی است. سالم‌بودن و با کیفیت بودن آب و هم‌چنین سلامت عموم از فاکتورهای اساسی در مدیریت شبکه‌های دوگانه توزیع آب هستند. احداث سیستم‌های دوگانه توزیع آب فقط برای بهبود کیفیت آب و کاهش هزینه‌های زیرساخت توزیع آب آشامیدنی نیست؛ بلکه برای استفاده از آب بازیافتی و به‌طور کلی برای مدیریت کل منابع آب و هم‌چنین مدیریت فاضلاب نیز ساخته می‌شود. پهلوانی و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیقی به‌منظور انتخاب گزینه مناسب در شبکه‌های دوگانه آبرسانی از معیارهای اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی، فنی و مهندسی، سازمانی و مدیریتی استفاده کردند و در نهایت مشخص شد که احداث یک شبکه آب غیرشرب برای مصارف آبیاری فضای سبز شهری و صنایع به لحاظ اقتصادی و اجتماعی مناسب است و می‌تواند کمبود آب در این شهر را برطرف سازد. گزارش شرکت مهندسی مشاور تمدن کاریزی در سال ۱۳۹۶ در طرح پژوهشی بررسی اجرای مناسب‌ترین روش تفکیک آب شرب از سایر مصارف در شهرهای منتخب استان یزد با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به این نتیجه رسید که با توجه به تمامی معیارهای مورد ارزیابی (پایداری، محیط‌زیستی، امکان‌پذیری، اثرات اجتماعی، بهداشتی و اقتصادی) جایگاه عمومی برداشت آب به‌عنوان بهینه‌ترین گزینه و اولویت اول تفکیک آب شرب شناسایی می‌شود و آب بسته‌بندی در اولویت دوم قرار می‌گیرد؛ هم‌چنین شبکه دوگانه توزیع آب در رتبه سوم و تصفیه خانگی در رتبه چهارم این ارزیابی قرار دارند. در پژوهشی دیگر، چهار سناریوی مدیریت آب برای کشور هنگ کنگ مورد ارزیابی اقتصادی قرار گرفت (Lam et al., 2017). سناریوها عبارت بودند از

پژوهش حاضر نیز با الهام گرفتن و الگوبرداری از شیوه‌های مدیریت و توزیع آب در گذشته و تلفیق آن با روش‌ها و ابزارهای جدید مدیریت و توزیع آب به بررسی و انتخاب بهترین روش جداسازی و توزیع آب پرداخته است. از ابتکار در این پژوهش، می‌توان به روش‌های جداسازی و توزیع آب شرب با استفاده از تکنولوژی و دانش روز اشاره کرد که در آن جنبه‌های رفاه، اقتصاد طرح، دانش مدیریت، شرایط و مقتضیات محلی و استفاده از روش‌های تحلیلی و محاسباتی برای پایداری، تاب‌آوری و ارتقاء سامانه تأمین و توزیع آب در نظر گرفته شده است؛ در کشور و به‌خصوص در مناطق کم آب یا دارای بحران آب، می‌تواند روش‌های مناسب در این پژوهش، جایگزین روش‌های فعلی توزیع آب باشد.

هدف اصلی از تحقیق حاضر بررسی و مقایسه فنی- اقتصادی روش‌های جداسازی آب آشامیدنی از آب غیرآشامیدنی (شبکه دوگانه توزیع آب، جایگاه‌های دولتی و خصوصی فروش آب) با استفاده از نرم‌افزار تحلیل هیدرولیکی شبکه (EPANET) و شاخص اقتصادی NPV در منطقه گازرگاه شهرستان یزد است.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، هزینه‌های اجرایی هر یک از روش‌های تفکیک آب شرب و توزیع آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. واضح است که معیار اقتصادی یا به‌عبارتی هزینه اجرای هر یک از روش‌های تفکیک و توزیع آب شرب، از اهمیت بالایی برخوردار است و موجب خواهد شد تا تصمیم‌گیرندگان با دید وسیع‌تری نسبت به انتخاب روش مناسب برای اجرایی نمودن طرح، اقدام نمایند. لازمه این امر، طراحی و محاسبات فنی برای اجزای طرح شامل مخازن، خطوط آبرسان، شبکه توزیع، تأسیسات تأمین فشار و جایگاه‌های برداشت در هر یک از روش‌ها برای شهر یزد است. از آنجایی که مطالعه موردی این پژوهش بر روی شهر یزد انجام شده است، منطقه‌ای در بافت قدیم شهر یزد به مساحت تقریبی حدود ۷۰/۸ هکتار به‌عنوان پایلوت انتخاب شده و طراحی اجزای طرح برای هر یک از روش‌های تفکیک و توزیع آب شرب صورت خواهد گرفت. سپس برآورد اقتصادی هر یک از سامانه‌های طراحی شده محاسبه می‌شود و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شده تا مناسب‌ترین روش از نظر اقتصادی انتخاب شود.

تحلیل اقتصادی با استفاده از شاخص ارزش فعلی خالص (NPV) نشان داد که اجرای روش مذکور در منطقه مطالعاتی دارای شاخص NPV مثبت است که نشان‌دهنده موفق بودن پروژه از نظر اقتصادی بود.

محمدزاده و همکاران (۱۴۰۱) اثر جداسازی آب شرب و بهداشتی را بر کیفیت آب آشامیدنی و تهیه نقشه کیفیت منابع آب زیرزمینی در حوزه آبخیز بجستان بررسی نمودند. نتایج حاصل از مقایسه نمونه‌ها در دو بخش چاه‌ها و شبکه توزیع آب شرب نشان داد که طرح کنونی، مطلوبیت کافی از نظر تأمین آب آشامیدنی با کیفیت را دارا است. هم‌چنین با استناد به نقشه کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت، محدوده پلایا دارای کم‌ترین کیفیت منابع آبی و چاه‌های واقع در محدوده دشتی دارای کیفیت مطلوب‌تری هستند. محمدزاده و همکاران (۱۴۰۲) میزان سرانه شرب حوزه شهری بجستان را در راستای اجرای پروژه جداسازی آب شرب و بهداشتی مورد بررسی قرار دادند. مقدار سرانه به‌دست آمده در حدود ۳ لیتر برآورد شده بود، اما مقدار آن در بافت‌های مختلف دارای پراکنش متفاوت بوده و در فاصله ۴/۵-۲/۵ لیتر بود که بیش‌ترین مقدار آن در بافت ویلایی جدید و کم‌ترین حد آن در بافت آپارتمانی بود. جدول ۱ خلاصه‌ای از اطلاعات جمع‌آوری شده از هر یک از شبکه‌های دوگانه موجود در جهان را نشان می‌دهد (فتوحی، ۱۳۹۶). جدول ۲ نیز خلاصه‌ای از اطلاعات جمع‌آوری شده از طرح‌های شبکه‌های دوگانه برای شهرهای مختلف ایران را نشان می‌دهد (فتوحی، ۱۳۹۶).

تفکیک آب شرب یکی از راه‌کارهای مواجهه با بحران کم‌آبی و صرفه‌جویی اقتصادی در بخش آب محسوب می‌شود. در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر شهر یزد که امکان دسترسی آسان و ارزان به آب وجود ندارد، از نظر اقتصادی به صلاح است تا موضوع جداسازی آب در دستور کار قرار گیرد. تاریخ مدیریت منابع آب در فلات مرکزی کشور و به‌خصوص در شهر یزد، نشان می‌دهد که ساکنان این منطقه با به‌کارگیری روش‌های خلاق و مدبرانه همواره هوشمندانه‌ترین بهره‌برداری را از آب‌های زیرزمینی به‌عمل آورده‌اند. احداث هزاران رشته قنات و صدها آب‌انبار، پایاب، آسیاب و یخچال که بخشی از آن‌ها هنوز هم پابرجا باقی مانده‌اند، دلیلی روشن بر این مدعا است. مردمان این سرزمین نه‌تنها به جنبه‌های کالبدی این سیستم‌های استحصال، انتقال و ذخیره آب توجه داشته‌اند، بلکه در جنبه‌های مدیریتی آن‌ها نیز ظریف‌ترین نکات را مدنظر قرار داده و حتی برای مدیریت زمان و تقسیم و توزیع آب بین حقایق‌بران نیز به ابزاری برای اندازه‌گیری زمان که امروزه به ساعت آبی شهرت دارد، را خلق کرده‌اند.

جدول ۱- خلاصه اطلاعات جمع‌آوری شده از شبکه‌های دوگانه آبرسانی گزارش شده در دنیا

کشور	شهر (ایالت)	موارد استفاده	نوع آب غیرشرب
ایالات متحده امریکا	شارلوت- کارولینای شمالی	-	آب دریا
	جزایر ویرجین	-	آب دریا
	سنت پترزبورگ (فلوریدا)	آتش‌نشانی، آبیاری فضای سبز، شست و شوی خودرو، خنک‌سازی در نیروگاه‌ها، ساختمان‌های تجاری، ساخت‌وساز	پساب تصفیه‌شده
	گردکنیون (آریزونا)	آبیاری، فلاش تانک، شست‌وشوی خودرو و ساخت‌وساز	پساب تصفیه‌شده فاضلاب
	کلرادو	آبیاری مدارس، زمین‌های گلف و قبرستان‌ها	پساب تصفیه‌شده فاضلاب
Marshall Islands	کالیفرنیا (Irvine)	فلاش تانک	پساب تصفیه‌شده فاضلاب
	Majuro	فلاش تانک دستشویی و آتش‌نشانی	آب‌های شور زیرزمینی
Kiribati	Tarawa	فلاش تانک دستشویی و آتش‌نشانی	آب‌های شور زیرزمینی
انگلستان	Hockerton	مصارف غیرخانگی شرب	آب باران
کاستریس	لوسیا سنت	آتش‌نشانی	آب باران
هلند	-	فلاش تانک دستشویی، شست و شو، شست و شوی خودرو و آبیاری باغچه	-
استرالیا	سیدنی (پروژه رزهیل)	فلاش تانک دستشویی، شست‌وشوی خودرو و آبیاری باغچه	پساب تصفیه‌شده فاضلاب شهری
	سیدنی (پارک المپیک سیدنی)	آبیاری زمین‌های پارک و زمین‌های بازی	پساب تصفیه‌شده فاضلاب شهری
	پیمپاماکومرا	آتش‌نشانی، فلاش تانک و آبیاری باغچه	پساب تصفیه‌شده فاضلاب شهری + آب باران
ژاپن	توکیو	فلاش تانک سرویس بهداشتی	پساب تصفیه‌شده فاضلاب شهری
چین	هنگ کنگ	فلاش تانک سرویس بهداشتی	آب دریا
	شانگهای	کلیه مصارف غیرشرب خانگی	آب با تصفیه متداول
سنگاپور	-	فلاش تانک سرویس بهداشتی و مصارف صنایع	پساب تصفیه‌شده
کانادا	تورنتو	برج‌های خنک‌کننده و چیلرها	آب دریاچه
آفریقای جنوبی	کارنارون (Carnarvon)	آبیاری باغچه‌ها و خیابان‌ها	آب خاکستری
	Lynedoch Ecovillage	آبیاری باغچه‌ها و فلاش تانک سرویس بهداشتی	پساب تصفیه‌شده فاضلاب شهری
	Garies	فلاش تانک سرویس بهداشتی	آب‌های شور
	Rustenburg	صنایع و معادن	پساب تصفیه‌شده فاضلاب شهری
	Driefontein	معادن، فلاش تانک دستشویی و آبیاری فضای سبز	پساب تصفیه‌شده
کویت	-	مصارف غیرشرب شهری	آب شور
نامیبیا	Windhoek	آبیاری فضای سبز	پساب تصفیه‌شده فاضلاب شهری
فرانسه	پاریس	آتش‌نشانی، شست‌وشوی خیابان، آبیاری فضای سبز عمومی، شست‌وشوی مجاری فاضلاب‌رو	-

جدول ۲- خلاصه‌ای از اطلاعات جمع آوری شده از طرح‌های شبکه‌های دوگانه در ایران

نام شهر	دلایل تفکیک آب شرب و بهداشت	نوع شبکه دوگانه	توضیحات
کاشان	کمبود منابع آب شیرین با کیفیت بالا	شبکه دوگانه با محدودیت در توزیع آب آشامیدنی-شیر برداشت عمومی	در سال ۱۳۷۴ اولین شیر برداشت افتتاح شد، اما در ادامه پروژه متوقف شد.
قم	افزایش شوری منابع آب موجود	شبکه دوگانه با محدودیت در توزیع آب آشامیدنی-شیر برداشت عمومی	بهره‌برداری از سال ۱۳۷۸ آغاز و در حال حاضر در حال بهره‌برداری است.
بجستان	کمبود منابع آب شیرین، افزایش شوری منابع آب زیرزمینی در حال برداشت	شبکه دوگانه با محدودیت در توزیع آب آشامیدنی-شیر برداشت عمومی	مطالعات آن از سال ۱۳۸۵ آغاز شده و در سال ۱۳۹۱ کار ساخت آن انجام شده است.
اهواز	افزایش مقدار EC آب و وجود آب با کیفیت مطلوب در منابع بالادست	جایگاه‌های برداشت آب	در سال ۱۳۷۹ مطالعه طرح تفکیک آب شرب با تأکید بر تعیین جایگاه‌های پخش آب در سطح شهر آغاز شد. از ۵۰ محل تعیین شده فقط در ۵ نقطه ساخت ایستگاه پخش آب انجام شد ولی در عمل هیچ‌کدام مورد بهره‌برداری قرار نگرفت.
طبرس	کمبود آب مناسب شرب و بالا بودن مقدار EC و لب‌شور شدن آب	جایگاه عمومی برداشت آب	در سال ۱۳۸۲، ۲۷ جایگاه پخش آب شرب ایجاد شد. طرح تفکیک آب شرب به‌همین روش در سال ۱۳۸۵ توسعه و گسترش یافت.
ساوه	کیفیت نامناسب آب شرب و بالا بودن مقدار EC	جایگاه عمومی برداشت آب	در سال ۱۳۸۶ با تولید ۱۰۰ مترمکعب آب شیرین در روز با استفاده از دستگاه آب شیرین‌کن و احداث ۳۰ جایگاه پخش آب شرب، اجرای طرح تفکیک آب شرب آغاز شد.
مشهد	کاهش کیفیت منابع محلی و عدم پایداری آب انتقالی	-	این طرح تفکیک آب شرب به‌صورت پایلوت در حال انجام است. مرحله اول این طرح، در اطراف حرم اجرا شده ولی بهره‌برداری نشده است.
اردکان	بالا بودن مقدار EC و لب‌شور تا غیرقابل قبول بودن آب و شکایات مردمی	جایگاه عمومی برداشت آب	در سال ۱۳۹۲، ۳ جایگاه پخش آب شرب متصل به دستگاه آب شیرین‌کن احداث شد و نهایتاً در سال ۱۳۹۳، ۱۵ جایگاه برداشت آب احداث شد.
بهباد	بالا بودن مقدار EC و لب‌شور تا غیرقابل قبول بودن آب شرب و شکایات مردمی	جایگاه عمومی برداشت آب	در سال ۱۳۸۵ با ایجاد یک جایگاه عمومی پخش آب طرح تفکیک آب شرب از آب بهداشتی آغاز شد و در سال ۱۳۸۷، جایگاه دوم تأسیس شد.
عقدا	نامطلوب بودن آب شبکه آبرسانی در فصول گرم و انعکاس آن توسط اهالی	جایگاه عمومی برداشت آب	در سال ۱۳۸۵، ۲ محل برداشت آب شیرین به‌صورت شیر منفرد در دو نقطه مختلف اجرا شد.
ندوشن و صدرآباد	بالا بودن مقدار EC و لب‌شور تا غیرقابل قبول بودن آب شرب و شکایات مردمی به‌خصوص در فصل تابستان	شیر برداشت عمومی آب	در سال ۱۳۸۷ خط انتقال طرح تفکیک آب شرب آغاز شد.
نیوک و علویه	بالا بودن مقدار EC و لب‌شور تا غیرقابل قبول بودن آب شرب و شکایات مردمی به‌خصوص در فصل تابستان	شیر برداشت عمومی آب	اجرای طرح تفکیک آب شرب ابتدا در سال ۱۳۸۴ برای روستای نیوک و سپس در سال ۱۳۸۷ برای روستای علویه، آغاز شد.
خرانق	بالا بودن مقدار EC و لب‌شور تا غیرقابل قبول بودن آب شرب و شکایات مردمی	شیر برداشت عمومی آب	در سال ۱۳۷۴ طرح تفکیک آب شرب آغاز شد. خط انتقال اولیه به‌دلیل عدم نقشه‌برداری مسیر و اجرای نامناسب فرسوده شد. در سال ۱۳۹۰ خط جدید اجرا و بهره‌برداری شد.

۲-۱- محدوده مطالعات

(سال ۱۴۳۰) معادل با ۶۵۸۴ نفر پیش‌بینی شده است. تراکم ناخالص این منطقه ۹۳ نفر در هکتار در سال ۱۴۳۰ بوده و در حال حاضر تعداد ۱۸۷۲ فقره انشعاب آب در این منطقه واگذار شده است. در شکل ۱ موقعیت محدوده انتخابی بافت قدیم در شهر یزد نشان داده شده است.

محل گزرگاه در بافت قدیم شهر یزد به‌عنوان محدوده مطالعات در نظر گرفته شده است؛ این منطقه در حدفاصل خیابان‌های مهدی، سلمان، امام خمینی و بلوار بسیج واقع شده است. وسعت این منطقه حدود ۷۰/۸ هکتار بوده و جمعیت ساکن در این منطقه در افق طرح



شکل ۱- موقعیت منطقه انتخابی در بافت قدیم در شهر یزد

۲-۲- روش تحقیق

برای تفکیک آب شرب از آب بهداشتی برای جبران کم‌آبی و بهبود کیفیت آب شرب شهر یزد و تأمین آب شرب شهروندان به‌صورت مستقل از مصارف بهداشتی، روش‌های سه‌گانه زیر مورد توجه هستند:

الف) سامانه گسترده توزیع آب شرب: در این سامانه، شبکه دوم (شبکه آب شرب) تا درب منازل در نظر گرفته می‌شود و لوله‌کشی در داخل منازل به‌صورت دو شبکه آب شرب و بهداشت انجام می‌شود. بدیهی است در این روش باید شبکه توزیع و خطوط آبرسان در کلیه معابر شهری اجرا شوند.

ب) سامانه متمرکز دولتی توزیع آب شرب (جایگاه‌های دولتی فروش آب شرب): در این نوع سامانه، آب شرب توسط شبکه‌ای مستقل و با نصب شیر برداشت در جایگاه‌های فروش دولتی که برای این منظور در سطح شهر احداث می‌شوند، در دسترس مردم قرار می‌گیرد. تعداد این جایگاه‌ها محدود بوده و سطح پوشش هر جایگاه در مقیاس محله تعریف شده است.

ج) سامانه متمرکز توزیع آب شرب توسط بخش خصوصی (جایگاه‌های دستگاهی فروش آب شرب): این جایگاه‌ها به شکل گسترده‌ای در دسترس مردم بوده و دستگاه فروش آب شرب، در اماکن تجاری که متقاضی فروش آب هستند، قرار می‌گیرد. این دستگاه‌های فروش آب به شبکه توزیع آب شرب شهر که بدین منظور

احداث شده است، متصل بوده و به‌واسطه ایجاد زیرساخت نصب دستگاه و سایر هزینه‌های سرمایه‌گذاری در بخش خصوصی، قیمت فروش بالاتری نسبت به جایگاه‌های دولتی آب دارند.

۲-۲-۱- اجزای طرح و اصول محاسبات اقتصادی

به‌منظور طراحی سامانه‌های مذکور، ضوابط و مبانی زیر مورد توجه قرار گرفته است:

✓ سامانه توزیع جداگانه آب شرب از اجزایی نظیر مخزن ذخیره، خطوط آبرسان، شبکه توزیع، تأسیسات تأمین فشار و انشعابات خانگی تشکیل شده است. در طراحی مخزن و شبکه توزیع جداگانه آب ضوابط و مبانی مندرج در نشریه ۳-۱۱۷ (معاون نظارت و راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۹۲) مورد توجه قرار گرفته است. مخزن ذخیره آب شرب براساس نیاز آبی ۳ روز جمعیت شهر با توجه به سرانه مصرف آب در این روش (۲۵ لیتر بر شبانه‌روز برای هر نفر) محاسبه و طراحی شده است.

✓ سامانه توزیع آب شرب در جایگاه دولتی و خصوصی، متشکل از اجزایی نظیر مخزن ذخیره، خطوط آبرسان، شبکه توزیع و جایگاه برداشت آب است. در طراحی و محاسبات مربوط به مخزن، خطوط آبرسان، تأسیسات تأمین فشار و شبکه توزیع برای جایگاه‌های برداشت آب از ضوابط و مبانی استاندارد

ب) **هزینه‌های بهره‌برداری:** پیش‌بینی دقیق هزینه‌های بهره‌برداری از طرح که در سال‌های آتی انجام می‌شود، تقریباً ممکن نیست. اما می‌توان با استفاده از آمار و اطلاعات موجود، هزینه‌های بهره‌برداری که شامل هزینه‌هایی است که مجریان در زمان بهره‌برداری باید انجام دهند، محاسبه شود. بر این اساس و با توجه به بررسی‌های فنی، هزینه‌های دوران بهره‌برداری، تعیین می‌شود. این هزینه‌ها عبارتند از:

- هزینه تعمیرات در دوره بهره‌برداری
- هزینه مواد شیمیایی (برای گندزدایی)
- هزینه استهلاک سرمایه
- هزینه حقوق پرسنل نگهداری و بهره‌بردار
- هزینه برق مصرفی
- در برآورد کلی هزینه‌های اجرایی از منابع زیر استفاده شده است:
- فهرس بهای سازمان برنامه و بودجه و بخش‌نامه‌های مرتبط با آن.
- استعلام از تولیدکنندگان و کارخانه‌های سازنده لوله و شیرآلات و دیگر تجهیزات مورد نیاز.
- هزینه عملیات اجرایی شامل هزینه‌های کارگذاری لوله، احداث حوضچه شیرآلات، احداث جایگاه برداشت، احداث مخازن و نصب شیرآلات است. برای برآورد طرح از فهرس بهای سال ۱۴۰۲ استفاده شده است. هم‌چنین در رابطه با تهیه لوله و شیرآلات و دیگر تجهیزات از کارخانه‌های سازنده استعلام قیمت صورت گرفته است و براساس آن، هزینه تهیه مصالح طرح محاسبه شده است.

۲-۲-۳- بررسی فنی و اقتصادی سناریوهای تفکیک آب شرب از آب بهداشتی

برآورد هزینه‌های اقتصادی سناریوهای تفکیک آب شرب و بهداشت (شبکه دوگانه توزیع آب، جایگاه‌های دولتی فروش آب و جایگاه‌های خصوصی فروش آب) طبق مراحل زیر انجام گرفت:

- منطقه‌ای در بافت قدیم شهر یزد (گازرگاه) به وسعت ۷۰/۸ هکتار انتخاب شد. برای منطقه مورد نظر، مدل هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار EPANET به سه روش تفکیک آب شرب و بهداشت ساخته شد (مدل هیدرولیکی در نرم‌افزار EPANET ساخته شده و قابل کاربرد در نرم‌افزار Watergems نیز است).
- جمعیت شهر یزد و منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش‌های آماری و طرح‌های توسعه (صنعتی، اجتماعی و اقتصادی) و برنامه‌های توسعه دولت و هم‌چنین آمار سرشماری سال‌های گذشته برای سال افق طرح (۱۴۳۰) محاسبه شد و

نشریه ۱۱۷-۳ (معاون نظارت و راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۹۲) مورد توجه قرار گرفته است. مخزن ذخیره آب شرب براساس نیاز آبی ۳ روز جمعیت شهر با توجه به سرانه روش‌های سامانه توزیع جایگاه دولتی و خصوصی آب شرب به ترتیب به میزان ۵ و ۲/۵ لیتر بر شبانه‌روز برای هر نفر، محاسبه و طراحی شده است. افق طرح در محاسبات فوق، سال ۱۴۳۰ بوده، لذا دوره بهره‌برداری ۳۰ ساله خواهد بود.

۲-۲-۲- برآورد هزینه‌های دوره طرح

در انجام برآورد هزینه‌های اجرایی طرح، هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای خرید، حمل لوله و متعلقات، خرید دستگاه هوشمند برداشت آب و سایر تجهیزات براساس استعلام از سازندگان و تولیدکنندگان و عملیات لوله‌گذاری، احداث مخزن، احداث جایگاه برداشت آب، احداث حوضچه شیرآلات و دیگر تأسیسات براساس فهرست بهای سال ۱۴۰۲ با اعمال ضرایب منطقه‌ای و بالاسری در نظر گرفته شده است. محاسبه ارزش فعلی هزینه‌های سالیانه با نرخ بهره ۱۵٪ (میانگین سپرده کوتاه‌مدت و بلندمدت اعلام شده توسط بانک مرکزی) صورت گرفته است. هزینه‌های جاری شامل هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری سامانه ذخیره و توزیع آب، هزینه‌های جایگزین (اورهال)، هزینه‌های نیروی انسانی و هزینه مواد مصرفی خواهد بود. هزینه‌های دوره طرح به دو قسمت تقسیم می‌شوند. هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه که همان هزینه سرمایه‌گذاری ثابت طرح است و هزینه‌های بهره‌برداری که در حقیقت هزینه‌های جاری طرح خواهد بود که پس از سرمایه‌گذاری اولیه و راه‌اندازی طرح باید انجام شود. در این بخش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های بهره‌برداری براساس مطالعات فنی و منطقه‌ای ارائه شده است.

الف) هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه: هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌هایی است که در زمان اجرای طرح تا شروع بهره‌برداری از طرح باید انجام شود. این هزینه‌ها به‌عنوان سرمایه‌گذاری ثابت طرح در طول دوره بهره‌برداری طرح مستهلک شده (به‌غیر از زمین) و به قیمت تمام‌شده طرح اضافه می‌شود. معمولاً اقتصادی بودن طرح بستگی به میزان برگشت این سرمایه در طول دوره بهره‌برداری طرح دارد. این هزینه‌ها عبارتند از:

- هزینه عملیات اجرایی (عملیات لوله‌گذاری و احداث تأسیسات و ابنیه)؛
- هزینه خرید لوله، اتصالات، شیرآلات و تجهیزات اندازه‌گیری و کنترل، دستگاه هوشمند برداشت آب.

مصارف شست‌وشوی ظروف) برآورد می‌شود. برای سناریوی دوم (جایگاه‌های دولتی برداشت آب)، میزان متوسط مصرف سرانه ۵ لیتر در شبانه‌روز (مصارف شرب و نیمی از مصارف پخت و پز) برآورد شده و برای سناریوی سوم (جایگاه‌های خصوصی برداشت آب)، میزان متوسط مصرف سرانه برابر با ۲/۵ لیتر در شبانه‌روز (مصارف شرب) تعیین شده است. شایان ذکر است تعیین و محاسبه سرانه مصرف آب در هر سناریو بر اساس نشریه ۳-۱۱۷ (معاون نظارت و راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۹۲) و مطالعات انجام شده در ایران و سایر کشورها و مطالعات میدانی صورت گرفته در سایر پژوهش‌ها صورت پذیرفته است.

۳-۲- برآورد هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه (هزینه اجرایی و تهیه تجهیزات مورد نیاز طرح)

الف) شبکه توزیع: برای هر یک از گزینه‌های توزیع آب شرب در منطقه پایلوت در شهر یزد، طراحی و محاسبه هیدرولیکی صورت گرفته است. محاسبات هیدرولیکی و مدل کردن رفتار آب در سیستم آبرسانی با استفاده از نرم‌افزار EPANET انجام شده است. در این نرم‌افزار، محاسبات براساس اصول حاکم بر جریان سیالات (قوانین پیوستگی و انرژی) صورت می‌گیرد (Tang et al., 2007). نتایج حاصل از تحلیل هیدرولیکی، محاسبات اقطار لوله مورد نیاز و هزینه خرید و اجرا برای هر یک از روش‌ها به شرح جدول‌های ۳ الی ۵ است.

ب) مخازن ذخیره: این مخازن به گونه‌ای در نظر گرفته شده که آب مطلوب برای مصرف شرب را در خود ذخیره و پاس‌گویی نیاز شرب شهروندان باشد. این مخزن در مجاورت مخازن شحنه (سایت مخازن اصلی شهر یزد) پیش‌بینی شده و از آب انتقالی کوهرنگ که کیفیت مطلوبی دارد تغذیه می‌شود. این مخازن قادر خواهند بود در سال افق طرح (۱۴۳۰)، نیاز آب شرب در شهر یزد را به مدت ۳ روز تأمین نمایند. در جدول ۶ هزینه احداث مخزن برای منطقه پایلوت درج شده است. هزینه اجرای مخزن با احتساب محوطه‌سازی و شیرخانه ورودی و خروجی و سایر تأسیسات جنبی محاسبه شده است.

ج) خطوط آبرسان: این خطوط جریان آب خروجی از مخزن آب شرب را به ابتدای شبکه توزیع خواهد رساند. در جدول ۷ نتایج محاسبات اقطار خطوط مربوطه و هزینه خرید و اجرای این خطوط برای منطقه پایلوت ارائه شده است.

سپس تراکم منطقه مورد مطالعه در سال افق طرح با استفاده از روش‌های جمعیتی تخمین زده شد، در این مرحله مدل هیدرولیکی در نرم‌افزار فوق‌الذکر ساخته شد و با توجه به سرانه در نظر گرفته شده برای هر روش، بارگذاری شد. پس از تحلیل مدل و محاسبه اقطار لوله‌های محاسبه شده برای شبکه توزیع در هر روش، محاسبات اقتصادی انجام شد.

- برای کل شهر یزد حجم مخزن ذخیره آب شرب و خطوط آبرسان و خطوط اصلی توزیع آب برای هر سه سناریوی موجود، محاسبه و هزینه متناسب با جمعیت منطقه مورد مطالعه (گازرگاه) به آن اختصاص یافت. سپس با توجه به اجزای طرح برای هر سه سناریوی موجود، برآورد طرح محاسبه شد. در مرحله آخر، محاسبات سرمایه‌گذاری اولیه صورت گرفت و هزینه‌های جاری محاسبه شده و سپس هزینه توزیع آب در هر روش به‌ازای یک مترمکعب توزیع آب صورت پذیرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین میزان سرانه مصرف آب شرب برای سناریوهای مختلف جداسازی آب آشامیدنی از آب غیرآشامیدنی (لیتر نفر در روز، متوسط مصرف روزانه)

میزان سرانه آب شرب کاملاً وابسته به نحوه توزیع آن بوده که با توجه به این موضوع، می‌تواند مقادیر کاملاً متفاوتی داشته باشد. قیمت آب با میزان مصرف رابطه معکوس دارد. می‌توان پیش‌بینی کرد که با افزایش قیمت آب با کیفیت، میزان مصرف (با توجه به وجود شبکه توزیع آب با کیفیت پایین‌تر) به طرز قابل توجهی کاهش یابد. در سناریوی اول که واگذاری انشعاب دوم به هر مشترک است، پیش‌بینی می‌شود مشترکین آب مورد نیاز شرب و مصارف پخت و پز را از شبکه دوم تأمین نمایند. هم‌چنین به علت سهولت و دسترسی راحت‌تر به آب با کیفیت، می‌توان پیش‌بینی نمود مصارف شست‌وشوی ظروف نیز از طریق این شبکه تأمین شود (Varbanetsa et al., 2009; Yang, 2006). در مجموع پیش‌بینی می‌شود میزان مصرف آب در این سناریو نسبت به سناریوهای دوم و سوم بیش‌تر باشد. در سناریوی دوم یعنی ایجاد جایگاه دولتی برداشت و عرضه آب در سطح شهر، به علت پائین‌تر بودن هزینه‌ها در مقایسه با سناریوی اول پیش‌بینی می‌شود بیش‌تر مشترکین آب مورد نیاز شرب و مصارف پخت و پز را از این جایگاه‌ها تأمین نمایند. برای سناریوی اول (واگذاری انشعاب دوم به هر مشترک) میزان متوسط مصارف برابر با ۲۵ لیتر در شبانه‌روز (مصارف شرب به‌علاوه مصارف پخت و پز و بخشی از

فرزانه فتوحی فیروزآباد و همکاران

جدول ۳- هزینه خرید و اجرای لوله و تجهیزات (شیرآلات و متعلقات) برای روش شبکه توزیع دوگانه در منطقه پایلوت

قطر (میلی متر)	طول (متر)	بهای واحد طول لوله (ریال)	هزینه خرید لوله (میلیون ریال)	هزینه خرید لوله و تجهیزات (میلیون ریال)	بهای واحد لوله گذاری با لوله پلی اتیلن (ریال)	هزینه اجرای لوله و تجهیزات (میلیون ریال)	جمع هزینه خرید و اجرا (میلیون ریال)
۳۲	۵۶۴۱	۱۹۲۹۳۰	۱۰۸۸۳/۱۸	۱۳۰۵۹/۸۲	۵۲۷۵۰۰	۱۰۵۶۰۵/۰۲	۱۱۸۶۶۴/۸۴
۴۰	۴۴۴	۲۹۳۲۵۳/۶	۱۳۰۲/۰۵	۱۵۶۲/۴۶	۶۲۷۵۰۰	۹۸۸۷/۸۷	۱۱۴۵۰/۳۲
۵۰	۲۸۴۸	۴۴۹۵۲۶/۹	۱۲۸۰۲/۵۳	۱۵۳۶۳/۰۳	۷۲۷۵۰۰	۷۳۵۳۲/۴۴	۸۸۸۹۵/۴۷
۶۳	۵۸۰	۵۹۵۱۴۰	۳۴۵۱/۸۱	۴۱۴۲/۱۷	۷۴۷۰۰۰	۱۵۳۷۶/۴۰	۱۹۵۱۸/۵۷
۷۵	۸۸۹	۱۰۱۴۳۷۳/۶۲	۹۰۱۷/۷۸	۱۰۸۲۱/۳۴	۷۶۶۰۰۰	۲۴۱۶۷/۷۷	۳۴۹۸۹/۱۱
۱۱۰	۳۳	۱۷۹۰۳۲۵	۵۹۰/۸۱	۷۰۸/۹۷	۸۳۸۵۰۰	۹۸۲/۰۳	۱۶۹۰/۹۹
جمع کل							۲۷۵۲۰۹/۳۱

جدول ۴- هزینه خرید و اجرای لوله و تجهیزات (شیرآلات و متعلقات) برای روش جایگاه دولتی برداشت آب در منطقه پایلوت

قطر (میلی متر)	طول (متر)	بهای واحد طول لوله (ریال)	هزینه خرید لوله (میلیون ریال)	هزینه خرید لوله و تجهیزات (میلیون ریال)	بهای واحد لوله گذاری با لوله پلی اتیلن (ریال)	هزینه اجرای لوله و تجهیزات (میلیون ریال)	جمع هزینه خرید و اجرا (میلیون ریال)
۳۲	۵۰۳۱	۱۹۲۹۳۰	۹۷۰۶/۳۱	۱۱۶۴۷/۵۷	۵۲۷۵۰۰	۹۴۱۸۵/۲۳	۱۰۵۸۳۲/۸۰
۴۰	۶۷۷	۲۹۳۲۵۳/۶	۱۹۸۵/۳۳	۲۳۸۲/۳۹	۶۲۷۵۰۰	۱۵۰۷۶/۷۷	۱۷۴۵۹/۱۷
۵۰	۳۴	۴۴۹۵۲۶/۹	۱۵۲/۸۴	۱۸۳/۴۱	۷۲۷۵۰۰	۸۷۷/۸۵	۱۰۶۱/۳۵
جمع							۱۲۴۳۵۳/۳۱

جدول ۵- هزینه خرید و اجرای لوله و تجهیزات (شیرآلات و متعلقات) برای روش جایگاه خصوصی برداشت آب در منطقه پایلوت

قطر (میلی متر)	طول (متر)	بهای واحد طول لوله (ریال)	هزینه خرید لوله (میلیون ریال)	هزینه خرید لوله و تجهیزات (میلیون ریال)	بهای واحد لوله گذاری با لوله پلی اتیلن (ریال)	هزینه اجرای لوله و تجهیزات (میلیون ریال)	جمع هزینه خرید و اجرا (میلیون ریال)
۳۲	۵۷۰۸	۱۹۲۹۳۰	۱۱۰۱۲/۴۴	۱۳۲۱۴/۹۳	۵۲۷۵۰۰	۱۰۶۸۵۹/۳۳	۱۲۰۰۷۴/۲۶
۴۰	۳۴	۲۹۳۲۵۳/۶	۹۹/۷۱	۱۱۹/۶۵	۶۲۷۵۰۰	۷۵۷/۱۸	۸۷۶/۸۳
جمع							۱۲۰۹۵۱/۰۹

جدول ۶- هزینه احداث مخزن برای شهر یزد و منطقه پایلوت (میلیون ریال)

سناریوهای توزیع آب	حجم مخزن شهر یزد (مترمکعب)	مخزن در سال مبنای طرح	بهای کل احداث مخزن	هزینه احداث مخزن برای هر نفر	هزینه احداث مخزن برای منطقه پایلوت
شبکه توزیع دوگانه	۱۰۰۰۰۰	۶۰۰	۶e+۷	۵۶/۴۳	۳۷۱۵۸۳/۶۳
جایگاه دولتی برداشت آب	۲۵۰۰۰	۶۲۰	۱/۵۵e+۷	۱۴/۵۸	۹۵۹۹۲/۴۴
جایگاه خصوصی برداشت آب	۱۲۵۰۰	۶۵۰	۸/۱۳e+۶	۷/۶۴	۵۰۳۱۸/۶۲

جدول ۷- هزینه خرید و اجرای خطوط آبرسان منطقه پایلوت

روش های توزیع آب	قطر (میلی متر)	هزینه خرید برای جمعیت کل (ریال)	هزینه خرید خط لوله (میلیون ریال) برای منطقه پایلوت	هزینه اجرا برای جمعیت کل (ریال)	هزینه اجرای خط لوله (میلیون ریال) برای منطقه پایلوت	جمع هزینه خرید و اجرا (میلیون ریال) برای منطقه پایلوت
شبکه توزیع جایگاه خصوصی برداشت آب	۲۵۰	۱۰۶۶۸۶/۶	۷۰۲۴/۷	۴۷۸۷۱/۹	۳۱۵۲/۱	۱۰۱۷۶/۸
شبکه توزیع جایگاه دولتی برداشت آب	۳۰۰	۱۶۹۱۶۰/۷	۱۱۱۳۸/۲	۵۹۸۲۲/۸	۳۹۳۹/۰	۱۵۰۷۷/۲
شبکه توزیع دوگانه	۵۰۰	۴۲۵۸۱۰/۹	۲۸۰۳۷/۱	۱۲۶۴۰۱/۳	۸۳۲۲/۸	۳۶۳۵۹/۹

آب، تجهیزات مورد نیاز انشعاب آب شرب، هزینه عملیات کارگذاری لوله‌ها، هزینه اجرای حوضچه‌ها و نصب شیرآلات و

برآورد هر سناریوی توزیع آب شرب در هر منطقه شامل خرید لوله، خرید شیرآلات و اتصالات، خرید دستگاه هوشمند برداشت

اتصالات، هزینه احداث مخزن و تأسیسات جنبی و هزینه احداث جایگاه برداشت آب بوده است. در جدول ۸ هزینه سرمایه‌گذاری در منطقه پایلوت ارائه شده است.

جدول ۸- هزینه سرمایه‌گذاری برای سناریوهای مختلف جداسازی آب شرب به میلیون ریال

نام روش	لوله‌گذاری		مخزن ذخیره		خطوط آبرسان		انشعاب و کنتور		جایگاه برداشت آب		جمع کل هزینه	
	خرید	اجرا	خرید	اجرا	خرید	اجرا	خرید	اجرا	خرید	اجرا	خرید	اجرا
شبکه توزیع دوگانه	۴۵۶۶	۲۲۹۵۵	۵۶۶۴/۲	۳۷۷۶۱/۱	۲۸۰۳/۷	۸۳۲/۳	۰	۰	۰	۰	۱۶۷۹۵۱/۵	۶۱۵۴۸/۴
جایگاه دولتی برداشت آب	۱۴۲۱	۱۱۰۱۴	۱۴۶۳/۲	۹۷۵۴/۹	۱۱۱۳/۸	۳۹۳/۹	۰	۰	۲۰۰۰	۸۰۰۰	۵۹۹۸/۱	۲۹۱۶۲/۸
جایگاه خصوصی برداشت آب	۱۳۳۳	۱۰۷۶۲	۷۶۷	۵۱۱۳/۵	۷۰۲/۵	۳۱۵/۲	۰	۰	۶۰۰۰	۲۴۰۰۰	۸۸۰۲/۵	۴۰۱۹۰/۷

پایلوت ارائه شده است. با توجه به هزینه‌های سالیانه دوره بهره‌برداری و استهلاک سرمایه، هزینه انتقال هر مترمکعب آب شرب محاسبه شده است. برای محاسبه هزینه استهلاک سرمایه، عمر مفید طرح برابر ۳۰ سال و تأمین اعتبارات مالی با نرخ ۱۵ درصد (براساس نرخ بهره بلندمدت اعلامی توسط بانک مرکزی) در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب استهلاک سرمایه در سال به طریق زیر محاسبه می‌شود (اسکونژاد، ۱۳۹۵):

$$a = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \times A \quad (1)$$

که a : استهلاک سرمایه در سال، n : عمر مفید طرح، A : سرمایه‌گذاری اولیه طرح و i : نرخ سود بانکی هستند.

هزینه‌های سرمایه‌گذاری (هزینه خرید و اجرای لوله) روش‌های تفکیک آب شرب و بهداشتی در محدوده مطالعاتی برای سناریوهای شبکه توزیع دوگانه آب، جایگاه‌های دولتی توزیع آب و شبکه توزیع جایگاه خصوصی برداشت آب به ترتیب برابر با ۲۲۹۴۹۹/۹، ۳۵۱۶۰/۹ و ۴۸۹۹۳/۲ میلیون ریال است.

۳-۳- هزینه‌های بهره‌برداری

هزینه‌های بهره‌برداری شامل هزینه تعمیرات، تجهیزات و تأسیسات پروژه‌های آبرسانی، هزینه حقوق پرسنل مورد نیاز برای نگهداری و بهره‌برداری از طرح و هزینه مواد مصرفی در طرح است. در جدول ۹ هزینه‌های سالیانه دوره بهره‌برداری و جمع کل هزینه‌های مذکور برای هر یک از روش‌های توزیع آب در منطقه

جدول ۹- هزینه جاری برای سناریوهای مختلف به میلیون ریال

نام روش	هزینه سالیانه تعمیرات در دوره بهره‌برداری		استهلاک سرمایه در سال	هزینه مواد مصرفی	نیروی انسانی	هزینه جاری یکنواخت‌سازی شده	جمع کل هزینه توزیع هر مترمکعب آب (ریال)
	تأسیسات	تجهیزات					
شبکه توزیع دوگانه	۲۰۲۳/۳۲	۸۱۰۲/۷۹	۳۴۹۵۲/۸۸	۲۰۰/۲۸	۸۳۹/۷۸	۵۱۰۱۸/۲۸	۸۵۹۷۱/۱۵
جایگاه دولتی برداشت آب	۹۳۵/۷۲	۳۹۷/۰۲	۵۳۵۵/۰۱	۴۰/۰۶	۹۰۶/۶۶	۱۰۴۱۴/۸۷	۱۵۷۶۹/۸۸
جایگاه خصوصی برداشت آب	۱۲۵۴/۵۷	۷۱۷/۴۱	۷۴۶۱/۶۷	۲۰/۰۳	۹۰۶/۶۶	۱۳۲۴۴/۰۶	۲۰۷۰۵/۷۳

تأییدکننده پرهزینه بودن سناریوی اول نسبت به سناریوهای دوم و سوم است. در ضمن در پروژه‌های مشابه تجربه شده است که هزینه سالیانه تعمیرات در دوره بهره‌برداری از تأسیسات برابر ۳ درصد هزینه اجرا و ایجاد تأسیسات و هزینه سالیانه تعمیرات در دوره بهره‌برداری از تجهیزات برای سناریوی اول برابر ۵ درصد و برای سناریوهای دوم و سوم ۱۰ درصد هزینه اجرا و ایجاد تجهیزات بود. تعداد جایگاه‌های دولتی در منطقه پایلوت، دو دستگاه در یک مکان در نظر گرفته شد. تعداد جایگاه‌های خصوصی در منطقه پایلوت نیز در ۳ مکان جانمایی شده و در هر مکان ۴ دستگاه مستقر شدند. مبنای تعداد مکان‌ها و دستگاه‌های

همان‌طور که در جدول ۹ مشخص شده است، میزان هزینه جاری سالیانه برای سناریوهای شبکه توزیع دوگانه آب، جایگاه‌های دولتی توزیع آب و شبکه توزیع جایگاه خصوصی برداشت آب به ترتیب برابر ۸۵۹۷۱/۱۵، ۱۵۷۶۹/۸۸ و ۲۰۷۰۵/۷۳ میلیون ریال است. هزینه توزیع هر مترمکعب آب در منطقه پایلوت (گازرگه) برای توزیع دوگانه آب، جایگاه‌های دولتی توزیع و خصوصی آب به ترتیب ۱۴۳۰۸۸۱/۵۲، ۱۳۱۲۳۴۹/۱۴ و ۳۴۴۶۲۰۸/۴۴ ریال است. همان‌طور که نتایج حاصل از برآورد اقتصادی سه سناریوی جداسازی آب آشامیدنی از آب غیرآشامیدنی نشان می‌دهد، میزان هزینه‌های برآوردی

$$P = F_1 \times \frac{1 - \frac{(1+g)^n}{(1+i)^n}}{i-g} \quad (2)$$

که i : نرخ سود بانکی برابر ۱۵٪، g : نرخ رشد برابر ۱۰٪، n : عمر مفید برابر ۳۰ سال، F_1 : درآمد حاصل از فروش آب در سال اول و P : ارزش فعلی درآمد ۳۰ ساله حاصل از فروش آب با نرخ رشد ۱۰٪ است.

جدول ۱۰ نتایج حاصل از تحلیل اقتصادی سناریوهای تفکیک آب شرب از آب غیرشرب را با استفاده از شاخص ارزش فعلی خالص (NPV) نشان می‌دهد.

برداشت براساس شعاع پوشش هر جایگاه با ملحوظ نمودن فاکتورهای انتخاب مکان، هم‌چون سهولت برداشت، حداقل فاصله، ضوابط ارگونومی حمل ظروف آب، شرایط اقتصادی مصرف کننده و سایر موارد است.

ارزش خالص فعلی (NPV) تفاوت بین ارزش فعلی جریان نقدی ورودی و ارزش فعلی جریان نقدی خروجی است. NPV برای بودجه‌بندی سرمایه مورد استفاده قرار می‌گیرد تا احتمال سرمایه‌گذاری محاسبه شده یا پروژه را تحلیل نماید. برای محاسبه ارزش فعلی درآمد ۳۰ ساله حاصل از فروش آب از رابطه (۲) استفاده شد (اسکونزاد، ۱۳۹۵).

جدول ۱۰- نتایج حاصل از تحلیل اقتصادی سناریوهای تفکیک آب آشامیدنی از آب غیرآشامیدنی با استفاده از شاخص NPV

شاخص ارزش فعلی خالص (NPV) (میلیون ریال)	ارزش فعلی درآمد ۳۰ ساله حاصل از فروش آب (میلیون ریال)	درآمد یک سال حاصل از فروش آب (میلیون ریال)	قیمت واحد فروش آب (ریال)	ارزش فعلی پروژه (P) (میلیون ریال)	ارزش آتی پروژه (A) (میلیون ریال)	قیمت تمام شده توزیع هر مترمکعب آب شرب (ریال)	روش
۲۷۷/۴۰	۵۶۵۱۰۷/۸۸	۳۸۳۹۰/۴۸	۶۳۹۰۰	۵۶۴۸۳۰/۴۸	۸۵۹۷۱/۱۵	۱۴۳۰۸۸۱/۵۲	شبکه توزیع دوگانه
۳۹/۲۰	۱۰۳۶۴۷/۳۳	۷۰۴۱/۲۶	۵۸۶۰۰	۱۰۳۶۰۸/۱۳	۱۵۷۶۹/۸۸	۱۳۱۲۳۴۹/۱۴	جایگاه دولتی برداشت
۶۶/۷۸	۱۳۶۱۰۳/۴۵	۹۲۴۶/۱۶	۱۵۳۹۰۰	۱۳۶۰۳۶/۶۷	۲۰۷۰۵/۷۳	۳۴۴۶۲۰۸/۴۴	جایگاه خصوصی برداشت

روش جایگاه‌های دولتی برداشت آب در سایر نقاط کشور از جمله بجنستان در انتخاب بهترین روش تفکیک آب شرب از آب غیرشرب تأثیر به‌سزایی داشته است و این موضوع انتخاب سناریوی شبکه دوگانه توزیع آب شرب را تقویت می‌نماید، همان‌گونه که در شهر بجنستان نیز همین نتیجه حاصل شده است. بنابراین در منطقه پایلوت، سناریوی اول به‌عنوان بهترین روش پیشنهاد می‌شود.

رسول‌خانی و همکاران (۱۳۹۸) نیز سیستم‌های توزیع دوگانه آب را به‌عنوان یک راه‌حل زیرساختی برای افزایش پایداری و انعطاف‌پذیری سیستم‌های آب شهری برای بهبود عملکرد و کاهش مصرف انرژی پیشنهاد دادند که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. در ضمن برخی مطالعات نیز اهمیت مقبولیت اجتماعی و پذیرش عموم در به‌کارگیری سیستم‌های توزیع دوگانه آب و موفق بودن این پروژه‌ها را خاطرنشان کردند (Garcia-Cuerva et al., 2016; Kandiah et al., 2019). علاوه بر عوامل اجتماعی (مثل پذیرش جامعه)، عملکرد سیستم‌های دوگانه بر توسعه زیرساخت‌های جدید نیز متکی است. اجرای طرح جداسازی آب شرب از آب بهداشتی در هر جای دنیا برای مقابله با خشک‌سالی به‌ویژه در شرایط آلوده ناشی از تغییرات اقلیمی می‌تواند مورد توجه و بررسی قرارگیرد و همچنین برای

همان‌طور که در جدول ۱۰ مشخص شده است تمامی سناریوها دارای شاخص NPV مثبت هستند که این نشان‌دهنده موفق بودن پروژه‌ها از نظر اقتصادی است. در رابطه با مقایسه قیمت واحد فروش آب شرب به‌ازای هر مترمکعب برای سناریوی شبکه توزیع دوگانه آب (۶۳۹۰۰ ریال)، نسبت به‌روش جایگاه دولتی برداشت (۵۸۶۰۰ ریال) اختلاف اندکی وجود دارد. ولی در رابطه با میزان شاخص NPV، روش شبکه توزیع دوگانه آب NPV بالاتر و اقتصادی‌تری (۲۷۷/۴۰ میلیون ریال) نسبت به‌روش جایگاه دولتی برداشت آب (۳۹/۲۰ میلیون ریال) دارد. قیمت واحد فروش آب به‌ازای هر مترمکعب برای سناریوی جایگاه خصوصی ۱۵۳۹۰۰ ریال و شاخص NPV به میزان ۶۶/۷۸ میلیون ریال است. در رابطه با مقایسه قیمت واحد فروش آب، روش جایگاه خصوصی برداشت آب گران‌تر از سایر روش‌ها است. میزان شاخص NPV برای روش مذکور کم‌تر از سناریوی شبکه توزیع دوگانه آب است. در نتیجه سناریوی شبکه توزیع دوگانه آب نسبت به سناریوی جایگاه خصوصی برداشت آب اقتصادی‌تر و توجیه‌پذیر است. تأیید نتیجه حاصل، این است که پارامترهای دیگری از جمله سهولت دسترسی مردم به شبکه توزیع آب شرب، کهولت سن افراد، پذیرش و مقبولیت اجتماعی مردم و نتایج نامطلوب حاصل‌شده از اجرای

نشان‌دهنده موفق بودن پروژه‌ها از نظر اقتصادی است. اما در رابطه با مقایسه قیمت واحد فروش آب شرب به‌ازای هر مترمکعب برای روش شبکه توزیع دوگانه آب (۶۳۹۰۰ ریال)، نسبت به روش جایگاه دولتی برداشت (۵۸۶۰۰ ریال) اختلاف اندکی وجود دارد. ولی در رابطه با میزان شاخص NPV، روش شبکه توزیع دوگانه آب NPV بالاتر و اقتصادی‌تری (۲۷۷/۴۰ میلیون ریال) نسبت به روش جایگاه دولتی برداشت آب (۳۹/۲۰ میلیون ریال) دارد. قیمت واحد فروش آب به‌ازای هر مترمکعب برای روش جایگاه خصوصی ۱۵۳۹۰۰ ریال و شاخص NPV به میزان ۶۶/۷۸ میلیون ریال است.

در رابطه با مقایسه قیمت واحد فروش آب، روش جایگاه خصوصی برداشت آب گران‌تر از سایر روش‌ها است. میزان شاخص NPV برای روش مذکور کم‌تر از روش شبکه توزیع دوگانه آب است، در نتیجه روش شبکه توزیع دوگانه آب نسبت به روش جایگاه خصوصی برداشت آب نیز اقتصادی‌تر و توجیه‌پذیر است. با توجه به این‌که پارامترهای دیگری از جمله سهولت دسترسی مردم به شبکه توزیع آب شرب، کهولت سن افراد، پذیرش و مقبولیت اجتماعی مردم و نتایج نامطلوب حاصل‌شده از اجرای روش جایگاه‌های دولتی برداشت آب در سایر نقاط کشور از جمله بجزستان نیز در انتخاب بهترین روش تفکیک آب شرب از آب غیرشرب دارای اهمیت فراوانی است، بهترین روش، شبکه توزیع دوگانه آب است. با اجرای این پروژه می‌توان با تعرفه پلکانی قیمت آب آشامیدنی و سهمیه‌بندی آب بهداشتی، فرهنگ مصرف و توزیع آب با کیفیت را به‌مراتب عادلانه‌تر و آسان‌تر از وضعیت کنونی مدیریت کرد.

۵- پی‌نوشت‌ها

1- Net Present Value

۶- مراجع

اسکونژاد، م.، (۱۳۹۵)، *اقتصاد مهندسی (ارزیابی اقتصادی پروژه‌های صنعتی)*، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۴۵۵ ص.

پهلوانی، م.، جلیلی قاضی‌زاده، م.، و فاضلی، م.، (۱۳۹۱)، "بررسی مبانی هیدرولیکی و کیفی شبکه‌های دوگانه آبرسانی (مطالعه موردی شهر اسکو، استان آذربایجان شرقی)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مهندسی آب و فاضلاب، دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور، تهران.

سربندی فراهانی، م.، (۱۳۸۸)، "احداث شبکه مجزای آب شرب از آب بهداشتی در شهر قم"، چهارمین کنفرانس بین‌المللی

صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های تصفیه آب بسیار مؤثر باشد. در رابطه با مقایسه تحلیل نتایج اقتصادی پژوهش حاضر با نتایج سایر پژوهش‌ها می‌توان بیان کرد برآورد اقتصادی که در طرح پژوهشی بررسی اجرای مناسب‌ترین روش تفکیک آب شرب از سایر مصارف در شهرهای منتخب استان یزد (۱۳۹۶) انجام گرفت، نشان داد که روش جایگاه برداشت دولتی در شهر اردکان نسبت به شبکه توزیع دوگانه تا درب منزل اقتصادی‌تر است و با نتایج تحقیق حاضر مطابقت ندارد. نتایج تحقیق فتوحی و همکاران (۱۳۹۸) در مورد بررسی اقتصادی روش‌های توزیع دوگانه و جایگاه‌های دولتی برداشت آب در منطقه صفائیه نشان داد که هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای روش‌های توزیع دوگانه و جایگاه‌های دولتی برداشت آب به‌ترتیب برابر با ۲۰۳۶/۷ و ۲۹۱/۱ میلیون تومان است. میزان هزینه جاری سالیانه برای روش‌های توزیع دوگانه آب و جایگاه‌های دولتی برداشت آب به‌ترتیب ۴۶/۵ و ۱۳۰/۹ میلیون تومان است. هزینه توزیع هر مترمکعب آب در منطقه برای توزیع دوگانه آب و جایگاه‌های دولتی برداشت آب به‌ترتیب ۸۷۶۳ و ۹۱۹۱ تومان است. در نهایت روش شبکه توزیع دوگانه را نسبت به جایگاه‌های دولتی برداشت آب، هم از لحاظ پارامترهای اقتصادی و هم از نظر پارامترهای فرهنگی و اجتماعی برتر دانستند. از این لحاظ نتایج فتوحی و همکاران (۱۳۹۸) با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد.

۴- نتیجه‌گیری

برای بررسی فنی و اقتصادی سه سناریوی شبکه توزیع دوگانه، جایگاه دولتی و خصوصی برداشت آب، منطقه گازرگاه به‌عنوان پایلوت شهرستان یزد انتخاب شد. نتایج بررسی‌های اقتصادی نشان داد که هزینه‌های سرمایه‌گذاری (هزینه خرید و اجرای لوله) برای روش‌های توزیع دوگانه آب، جایگاه‌های دولتی و خصوصی برداشت آب به‌ترتیب برابر با ۲۲۹۴۹۹/۹۹، ۳۵۱۶۰/۹ و ۴۸۹۹۳/۲ میلیون ریال است. میزان هزینه جاری سالیانه برای روش‌های توزیع دوگانه آب، جایگاه‌های دولتی و خصوصی برداشت آب به‌ترتیب ۸۵۹۷۱/۱۵، ۱۵۷۶۹/۸۸ و ۲۰۷۰۵/۷۳ میلیون ریال است. هزینه توزیع هر مترمکعب آب در محدوده مطالعاتی برای توزیع دوگانه آب، جایگاه‌های دولتی و خصوصی برداشت آب به‌ترتیب ۱۴۳۰۸۸۱/۵۲، ۱۳۱۲۳۴۹/۱۴ و ۳۴۴۶۲۰۸/۴۴ ریال است. نتایج حاصل از تحلیل اقتصادی روش‌های تفکیک آب آشامیدنی از آب غیرآشامیدنی با استفاده از شاخص ارزش فعلی خالص (NPV) نشان داد که هر سه روش دارای شاخص NPV مثبت هستند که این

- <https://doi.org/10.52547/jwmr.13.26.215>. معاون نظارت و راهبردی ریاست جمهوری، (۱۳۹۲)، "ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی"، نشریه ۳-۱۱۷ (بازنگری اول)، دفتر مهندسی و معیارهای فنی وزارت نیرو.
- Apostolidis, N., Hertle, C., and Young, R., (2011), "Water recycling in Australia", *Water*, 3, 869-881, <https://doi.org/10.3390/w3030869>.
- Garcia-Cuerva, L., Berglund, E.Z., and Binder, A.R., (2016), "Public perceptions of water shortages, conservation behaviors, and support for water reuse in the U.S.", *Resources Conservation and Recycling*, 113(3), 106-115, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.006>.
- Grigg, N.S., Rogers, P.D., and Edmiston, S., (2013), "Dual water systems: Characterization and performance for distribution of reclaimed water", Water Research Foundation, Denver, CO, USA.
- Kandiah, V.K., Berglund, E.Z., and Binder, A.R., (2019), "An agent-based modeling approach to project adoption of water reuse and evaluate expansion plans within a sociotechnical water infrastructure system", *Sustainable Cities and Society*, 46, 101412, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.12.040>.
- Kotwicki, V., and Al-Otaibi, M., (2011), "Drinking water saving potential of dual networks in Kuwait", *Management of Environmental Quality*, 22(6), 743-756, <https://doi.org/10.1108/14777831111170849>.
- Lam, C.M., Leng, L., Chen, P., Lee, P., and Hsu, SH., (2017), "Eco-efficiency analysis of non-potable water systems in domestic buildings", *Applied Energy*, 202, 293-307, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.095>.
- Ilemobade, A.A., Adewumi, J.R., and JE, V.Z., (2008), "Assessment of the feasibility of using a dual water reticulation system in South Africa", Water Research Commission Report, 1701.
- Mainali, B., Hao Ngo, H., Guo, W., Nga Pham, T., and Johnston, A., (2011), "Feasibility assessment of recycled water use for washing machines in Australia through SWOT analysis", *Resources, Conservation and Recycling*, 56(1), 87-91, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.007>.
- Menge, J., (2010), "Treatment of wastewater for re-use in the Drinking Water System of Windhoek", *Water Institute of Southern Africa Conference*, Midrand, Southern Africa.
- Nairizi, S., (1994), "Dual water distribution system: A final solution for freshwater shortages", In: Tsakiris, G., and M.A., Santos, (eds.), *Advances in Water Resources Technology and Management*, 102-120, Rotterdam, The Netherlands.
- Nguyen, B., (2003), "Operation of dual drinking and non-potable water networks in Paris: Advantages and constraints", *Water Science and Technology: Water Supply*, 3(3), 193-200, <https://doi.org/10.2166/ws.2003.0026>.
- مدیریت پروژه، تهران، ایران.
- شرکت مهندسين مشاور تمدن کاریزی، (۱۳۹۶)، "بررسی اجرای مناسب‌ترین روش تفکیک آب شرب از سایر مصارف در شهرهای منتخب استان یزد"، یزد، ایران.
- عبدالمنافی، ن. و مظاهری، م.، (۱۳۹۲)، "گزارش شبکه‌های دوگانه توزیع آب"، مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، مطالعات زیربنایی (گروه آب)، تهران، ایران.
- فتوحی فیروزآباد، ف.، اختصاصی، م.، و نگارش، ع.، (۱۳۹۹)، "بررسی و مقایسه فنی و اقتصادی شبکه توزیع دوگانه آب در بافت قدیم و جدید شهر یزد"، پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۱(۲۱)، ۹۸-۱۰۷.
- <https://doi.org/10.52547/jwmr.11.21.98>.
- فتوحی فیروزآباد، ف.، (۱۳۹۶)، "مدیریت راهبردی ایجاد شبکه دوگانه آب آشامیدنی و غیرآشامیدنی در محدوده شهر یزد با استفاده از تحلیل SWOT"، رساله دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی دانشگاه یزد، یزد، ایران.
- فتوحی فیروزآباد، ف.، و اختصاصی، م.، (۱۳۹۵)، "ضرورت و روش‌های تفکیک آب شرب از سایر مصارف در شهرستان یزد"، اولین همایش ملی عرضه و تقاضای آب شرب، بهداشت، چالش‌ها و راه‌کارها، دانشگاه صنعتی اصفهان. اصفهان.
- فتوحی فیروزآباد، ف.، اختصاصی، م.، سفید، م.، و مروتی شریف‌آبادی، ع.، (۱۳۹۸)، "بررسی فنی و مقایسه اقتصادی روش‌های جداسازی آب آشامیدنی از آب غیرآشامیدنی در شهرستان یزد (مطالعه موردی: منطقه صفائیه یزد)"، مجله مهندسی منابع آب، ۱۲(۴۳)، ۷۶-۸۶.
- گلابچی، م.، (۱۳۸۸)، "بررسی سیستم‌های مختلف آبرسانی و توزیع آب شهری"، سومین همایش ملی آب و فاضلاب (با رویکرد اصلاح الگوی مصرف)، ایران، تهران. ۱-۹.
- محمدزاده، ف.، اختصاصی، م.، حسینی، ز.، نگارش، ع.، و علایی، م.، (۱۴۰۲)، "تعیین میزان سرانه شرب در راستای اجرای پروژه جداسازی آب شرب و بهداشتی (مطالعه موردی: حوزه شهری بجستان)"، نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۸(۱)، ۴۹-۵۹.
- <https://doi.org/10.22112/JWWSE.2022.323869.1303>.
- محمدزاده، ف.، اختصاصی، م.، حسینی، ز.، نگارش، ع.، هاشمی، ح.، و علایی، م.، (۱۴۰۱)، "بررسی اثر جداسازی آب شرب و بهداشتی بر کیفیت آب آشامیدنی و تهیه نقشه کیفیت منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بجستان)"، پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۳(۲۶)، ۲۱۵-۲۲۹.

- Oesterholt, F., Martijnse, G., Medema, G., and Van der Kooij, D., (2007), "Health risk assessment of non-potable domestic water supplies in the Netherlands", *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, 56(3), 171-179, <https://doi.org/10.2166/aqua.2007.043>.
- Rasoulkhani, K., Mostafavi, A. Cole, J., and Sharvelle, S., (2019), "Resilience-based infrastructure planning and asset management: Study of dual and singular water distribution infrastructure performance using a simulation approach", *Sustainable Cities and Society*, 48(5), 101577, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101577>.
- Rogers, P.D., and Grigg, N.S., (2007), "Alternative approaches for water distribution: Dual and decentralized systems", *World Environmental and Water Resources Congress*, Florida, U.S.A.
- Satterfield, Z., (2009), "Dual water systems", *Tech Brief*, The National Environmental Services Center, 9(3), 1-4.
- Shang, S., Uber, J.G., and Rossman, L.A., (2008), *EPANET multi-species extension user's manual*, Environmental Protection Agency, United States. EPA/600/S-07/021.
- Storey, M.V., Deere, D., Davison, A., Tam, T., and Lovell, A.J., (2007), *Risk management and cross-connection detection of a dual reticulation system*, *Water reuse and recycling*, UNSW Publishing, Sydney, Australia, 459-466.
- Tang, S.L., Yue, D.P.T., and Ku, D.C.C., (2007), *Engineering and costs of dual water supply systems*, IWA Publishing, London, U.K., <https://doi.org/10.2166/9781780402062>.
- Varbanets, M., Zurbrugg, C., Swartz, C., and Pronk, W., (2009), "Decentralized systems for potable water and the potential of membrane technology", *Water Research*, 43(2), 245-265, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.10.030>.
- Yang, CH., Shen., ZH., Chen., H., Zeng, G., and Zhong, Y., (2006), "Dual water distribution systems in China", *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium*, Ohio, [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)137](https://doi.org/10.1061/40941(247)137).
- Yi, I., Jiao., W., Chen., X., and Chen, W., (2011), "An overview of reclaimed water reuse in China", *Journal of Environmental Sciences*, 23(10), 1585-1593. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60627-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60627-4).



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

Research Paper

مقاله پژوهشی

Determining the Instantaneous Peak Factor in Water Distribution Networks

تعیین ضریب حداکثر تقاضای لحظه‌ای در شبکه‌های توزیع آب

Ramtin Mazaheri¹, Mohammadreza Jalili Ghazizadeh^{2*} and Homayoun Motiee²

رامتین مظاهری^۱، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده^{۲*} و همایون مطیعی^۲

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

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

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

۲- دانشیار 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: 24/04/2023

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۴

Revised: 05/09/2023

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴

Accepted: 10/09/2023

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۹

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

Water Distribution Networks (WDNs) are typically designed based on the Hourly Peak Factor (HPF), which represents the ratio between the maximum and average hourly flow during a day. However, to achieve optimal WDN operation, it is necessary to analyze water demand changes at sub-hourly (instantaneous) time intervals. Due to the lack of data on sub-hourly Peak Factors (PFs), this study calculates PFs for various sub-hourly intervals using flow field data from different WDNs. The results indicate that the PF increases as both population size and time interval decrease. For instance, in populations of 1,000 and 10,000, the PF increases by 53% and 33%, respectively, when the time interval is reduced from one hour to half an hour. Based on the findings, a new equation is proposed to estimate PF based on population and time interval parameters. Additionally, the HPFs in WDNs were compared with those from various references, including the 117-3 standard. The findings of this study can be applied to the design and operation of WDNs.

شبکه‌های توزیع آب معمولاً براساس ضریب حداکثر ساعتی تقاضای آب طراحی می‌شوند. این ضریب نسبت بین جریان حداکثر به متوسط ساعتی را در یک شبانه‌روز نشان می‌دهد. اما برای دستیابی به اهداف بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع آب، بررسی نوسان تقاضا در گام‌های زمانی کم‌تر از یک ساعت (لحظه‌ای) نیز لازم است. با توجه به نبودن اطلاعات کافی برای تعیین ضرایب حداکثر تقاضا برای گام‌های زمانی کم‌تر از یک ساعت، در این مقاله با اندازه‌گیری جریان ورودی به شبکه آب در پروژه‌های مورد مطالعه، ضریب حداکثر تقاضای آب در گام‌های زمانی کم‌تر از یک ساعت محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که ضریب حداکثر تقاضا با کاهش هر دو مشخصه جمعیت و گام زمانی، افزایش می‌یابد. برای نمونه در جمعیت ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ نفر، مقدار ضریب حداکثر تقاضا در گام زمانی نیم ساعته نسبت به یک ساعته به ترتیب حدود ۵۳ و ۳۳ درصد افزایش می‌یابد. برپایه نتایج به دست آمده، رابطه جدیدی برای برآورد ضریب حداکثر تقاضا براساس جمعیت و گام‌های زمانی مختلف ارائه شد. همچنین ضریب حداکثر تقاضای ساعتی در پروژه‌های مورد مطالعه، با مراجع گوناگون همانند نشریه ۱۱۷-۳ مقایسه شد. نتایج تحقیق حاضر برای طراحی و بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

Keywords: Peak Factor, Maximum Hourly Demand, Design and Operation of Water Distribution Network.

کلمات کلیدی: ضریب حداکثر تقاضا، حداکثر تقاضای ساعتی، بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب.

(Gan, 2012). مطالعات نشان می‌دهد که مقدار ضرایب ساعتی با توجه به جمعیت ناحیه، تغییر خواهد کرد (DVGW, 2004, 2007; Zhang, 2005; Martínez-Solano et al., 2008; Tricarico et al., 2007; Balacco et al., 2017). به‌عنوان نمونه در یک پژوهش، یک رابطه معکوس بین ضریب حداکثر تقاضای ساعتی با جمعیت معرفی شد (Diao et al., 2010). هم‌چنین با بررسی داده‌های میدانی سه روستا با جمعیت مختلف در جنوب ایتالیا، منحنی‌های تغییرات جریان در مدت ۲۴ ساعت در گام‌های زمانی ۱۰ دقیقه با مقدار مشترکین موجود در هر ناحیه ارائه شده و با برآزش توزیع گامیل^۴ برای مقادیر ضریب حداکثر تقاضای آب، رابطه‌ای بین ضریب حداکثر تقاضای لحظه‌ای^۵ و جمعیت ارائه شد (Balacco et al., 2018). با افزایش جمعیت مقدار ضریب حداکثر تقاضای لحظه‌ای و نوسانات تقاضا (اختلاف مقدار حداکثر و حداقل ضریب تقاضا در الگوی روزانه تقاضای آب) کاهش می‌یابد. براساس نشریه ۱۱۷-۳، در شرایط نبودن اطلاعات جریان ورودی به ناحیه مورد نظر، مقادیر ضریب حداکثر تقاضا متناسب با جمعیت مطابق جدول ۱ خواهد بود (معاون نظارت و راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۹۲، سازمان برنامه و بودجه، ۱۳۷۱). در جدول ۱، مقادیر ضریب حداکثر تقاضای ساعتی در نشریه ۳-۱۱۷ با مراجع دیگر (Brière, 2014; Adams, 1961; Ippolito and De Martino, 1995) مقایسه شده است.

از آن‌جا که جریان در شبکه‌های توزیع آب تابع مصارف مشترکین در ساعات مختلف شبانه‌روز و روزهای مختلف سال است، حداکثر مقدار تقاضای مورد انتظار در یک شبکه توزیع آب شاخص مهمی به‌منظور دستیابی به اهداف طراحی و بهره‌برداری از شبکه محسوب می‌شود (Tricarico et al., 2014). حداکثر تقاضای آب، به‌صورت بیش‌ترین حجم جریان آب در طول یک دوره زمانی نسبتاً کوتاه (به‌عنوان مثال یک ثانیه، یک دقیقه یا یک ساعت) تعریف می‌شود. روش‌های مختلفی برای برآورد حداکثر تقاضای آب از دستورالعمل‌های طراحی و گزارش‌های تحقیقاتی در دسترس است که رایج‌ترین آن‌ها، استفاده از ضریب حداکثر بدون بعد^۱ است (Research, 2003). ضریب حداکثر تقاضا (PF)^۲، نسبت بین حجم حداکثر به متوسط جریان آب در طول یک گام زمانی نسبتاً کوتاه (مثلاً ساعت) برای یک دوره بررسی زمانی نسبتاً طولانی (مثلاً شبانه‌روز یا سال) است. لذا حداکثر حجم تقاضای آب در مدت یک ساعت به متوسط حجم تقاضای آب ساعتی در یک روز، به‌عنوان ضریب حداکثر تقاضای ساعتی^۳ تعریف می‌شود. مقادیر ضریب حداکثر تقاضا با توجه به جنبه‌های اجتماعی و اقتصادی موجود در هر ناحیه مورد مطالعه قرار گرفته است (Balacco et al., 2017; Zhang et al., 2005; Gargano et al., 2010; Gato-Trinidad and

جدول ۱- مقادیر ضریب حداکثر تقاضا بر اساس مراجع مختلف

ضریب حداکثر ساعتی					جمعیت (نفر)
Ippolito and De Martino (1995)	Adams (1961)	Brière (2014)	سازمان برنامه و بودجه (۱۳۷۱)	معاون نظارت و راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۹۲)	
۵-۴	۵/۹-۲/۲	۳/۵-۳/۴	۲/۵-۲	۳-۲	کم‌تر از ۵۰۰۰
۹-۲/۴	۴/۵-۲/۲	۹/۳-۲/۳	۵-۱/۲	۸-۱/۲	۲۰۰۰۰-۵۰۰۰
۲/۹-۲	۲/۲-۱/۴	۶/۹-۲/۲	۴/۸-۱/۱	۶/۸-۱/۱	۱۰۰۰۰۰-۲۰۰۰۰
۵-۱/۲	۲/۱-۲	۵/۶-۲/۲	۲/۶-۱/۱	۴/۶-۱/۱	۳۰۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰
۱/۵	۹-۱/۲	۲/۵-۲/۲	۲/۴-۱/۱	۲/۴-۱/۱	بیش از ۳۰۰۰۰۰

معیارهای پیشنهادی استانداردها و مراجع ملی و بین‌المللی، اهمیت منطقه‌ای کردن ضرایب حداکثر را نشان داد. برای مثال، در خصوص کوچک‌ترین شبکه مورد مطالعه، ضریب حداکثر پیشنهادی نشریه ۳-۱۱۷، به‌مقدار ۲۷/۳ درصد کم‌تر از ضریب حداکثر واقعی به‌دست آمده در پژوهش یادشده است (مرادی سبزکوهی و همکاران، ۱۳۹۳). روابط ضریب حداکثر تقاضای ساعتی (PF_H) متناسب با جمعیت هر ناحیه برحسب هزار نفر (P) یا تعداد مشترکین (N) در جدول ۲ ارائه شده است.

نتایج تحلیل داده‌های بررسی میدانی انجام شده در شهرستان کاشمر برای مطالعه ضریب حداکثر تقاضای آب، نشان داد که ضریب حداکثر ساعتی در شهرستان کاشمر در بازه ۱/۳ تا ۱/۴ متغیر است که با مقادیر پیشنهادی نشریه ۳-۱۱۷ بازنگری اول، کمی تفاوت دارد (تابش و همکاران، ۱۳۹۴). بررسی میدانی ضریب حداکثر تقاضا در شبکه‌های توزیع آب روستایی در شمال شرق خوزستان با اندازه‌گیری جریان تقاضا در گام‌های زمانی ۷/۵ دقیقه به‌مدت یک سال، تفاوت قابل‌ملاحظه بین ضرایب حداکثر نتیجه‌شده از این تحقیق با

جدول ۲- روابط ضریب حداکثر تقاضای ساعتی

مرجع	ضریب حداکثر تقاضای ساعتی (PF_t)	ردیف
Metcalf and Eddy (1915)	$\begin{cases} 4 & P \leq 5 \\ \frac{4.8}{p^{0.113}} & P > 5 \end{cases}$	۱
Harmon (1918)	$\frac{18 + \sqrt{P}}{4 + \sqrt{P}}$	۲
Babbitt (1928)	$5P^{-0.2}$	۳
Johnson (1942)	$\frac{5.2}{p^{0.15}}$	۴
Giffit (1945)	$\frac{5}{p^{0.167}}$	۵
DVGW (2004)	$-0.75 \ln P + 6.498$	۶
Zhang (2005)	$\begin{cases} 9.0 & P \leq 0.22 \\ \frac{7}{p^{0.167}} & P > 0.22 \end{cases}$	۷
DVGW (2007)	$5.663P^{-0.1682}$	۸
Tricarico et al. (2007)	$11 N^{-0.2}$	۹
Martínez-Solano et al. (2008)	$\frac{17.12}{\sqrt{N}} + 2.185$	۱۰

تقاضای آب در گام زمانی مشخص با محاسبه سطح زیر منحنی جریان تقاضای آب نسبت به زمان تعیین می‌شود. بنابراین اگر گام زمانی بزرگ‌تر شود، متوسط حجم تقاضای آب در آن گام زمانی کاهش و لذا ضریب حداکثر تقاضا نیز کاهش می‌یابد. بنابراین محاسبه حجم متوسط تقاضای آب در طول گام زمانی انتخابی علت تغییرات میزان حداکثر تقاضا است (Diao et al., 2010).

جدول ۳- ضریب حداکثر تقاضای t روزه در سال (Tchobanoglous and Schroeder, 1987)

ضریب حداکثر تقاضا	مدت زمان، روز
۱/۴-۱/۱	ماه ($t = 30 \text{ d}$)
۲/۷-۱/۱	هفته ($t = 7 \text{ d}$)
۶/۲-۱/۲	روز ($t = 1 \text{ d}$)
۲/۳-۲/۲	ساعت ($t = \frac{1}{24} \text{ d}$)

در محاسبه حجم متعادل‌سازی مخازن ذخیره آب شهری، معمولاً گام زمانی یک ساعت انتخاب می‌شود؛ چنانچه گام زمانی بیش از این مقدار انتخاب شود، با کاهش مقدار تقاضا در گام زمانی مشخص، حجم متعادل‌سازی، کم‌تر محاسبه می‌شود و این موضوع موجب کمبود آب در مخازن ذخیره در ساعات پیک تقاضا خواهد شد. اگر گام زمانی بزرگ‌تر از این مقدار باشد حجم متعادل‌سازی بیش‌تر می‌شود. لذا با توجه به انتخاب یک حجم بهینه از نظر اقتصادی و هم‌چنین حجم مناسب هیدرولیکی، گام زمانی مناسب برای محاسبات هیدرولیکی انتخاب می‌شود. در نتیجه در طراحی شبکه‌های توزیع آب شهری گام زمانی یک ساعت، و در بررسی نشت و جریان شبانه، کسری از یک ساعت در نظر گرفته می‌شود

بزرگی ضریب حداکثر تقاضا در الگوی روزانه تقاضای آب علاوه بر مقدار جمعیت ناحیه، به مقدار انتخابی گام زمانی در الگوی تقاضای آب نیز بستگی دارد. لازم به ذکر است در روابط (۱) الی (۱۰) گام زمانی ثابت (یک‌ساعت) بوده و تنها عامل تغییر در ضریب حداکثر تقاضا، جمعیت است. به‌عنوان مثال با توجه به تغییرات نرخ جریان در طول روز، معمولاً میانگین ضریب حداکثر جریان تعیین‌شده در یک گام زمانی ۱۰ ثانیه‌ای در مقایسه با ضریب حداکثر جریان تعیین‌شده در یک گام زمانی ۵ دقیقه‌ای بیش‌تر است. رابطه تجربی (۱۱) برای محاسبه ضریب حداکثر در شهرهای مسکونی کوچک پیشنهادشده است (Goodrich, 1942):

$$PF_t = 1.8t^{-0.10} \quad (11)$$

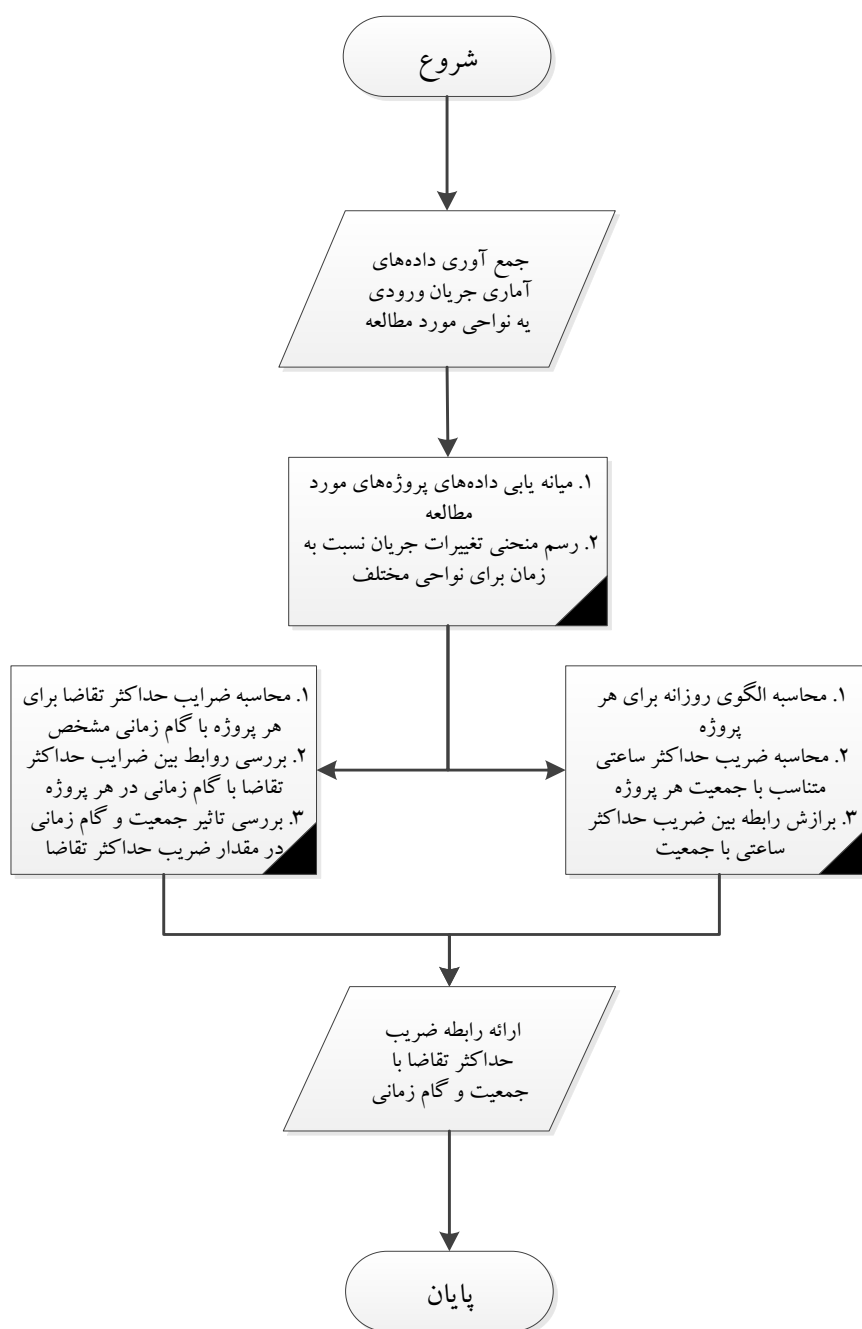
که t : گام زمانی برحسب روز است که مقدار آن می‌تواند از ۲ ساعت (معادل $\frac{1}{12}$ روز) تا ۳۶۵ روز، متغیر باشد.

این رابطه برای گام‌های زمانی کوچک‌تر از ۲ ساعت، قابل استفاده نیست. جدول ۳ نیز مقدار ضریب حداکثر تقاضای t روزه در سال را برای مدت زمان‌های یک ساعت، روز، هفته و ماه نشان می‌دهد (Tchobanoglous and Schroeder, 1987).

با توجه به رابطه (۱۱) و جدول ۳، با کاهش مقادیر گام‌های زمانی، مقدار ضریب حداکثر تقاضا افزایش خواهد یافت. هم‌چنین مقدار ضریب حداکثر تقاضا با کاهش گام مدت زمانی، افزایش می‌یابد (Johnson, 1999). مقدار ضریب حداکثر تقاضا با گام زمانی اندازه‌گیری جریان یک شبکه توزیع آب مرتبط است؛ زیرا حجم

زمانی کم‌تر از یک ساعت ضروری است. در مطالعه حاضر با هدف تحقیق رابطه ضریب حداکثر تقاضای متناسب با جمعیت و گام زمانی، داده‌های میدانی در چند پروژه مختلف مطابق شکل ۱ ارزیابی شد. سپس الگوی تقاضای آب در گام زمانی یک ساعت به ازای جمعیت‌های مختلف اندازه‌گیری شد. همچنین با استفاده از نتایج الگوی روزانه، رابطه‌ای بین مقدار ضریب حداکثر ساعتی و جمعیت برآزش شد. با محاسبه الگوهای تقاضای آب برای گام‌های کوچک‌تر، ضرایب حداکثر تقاضا محاسبه و رابطه بین مقدار ضریب حداکثر تقاضا با تغییرات گام زمانی کم‌تر از یک ساعت بررسی شده است.

(Davis and Sorensen, 1980; Hammer, 1986; Clark et al., 1969). این موضوع تأیید می‌کند که چنانچه مقدار گام زمانی جریان لحظه‌ای تقاضا بیش از حد بزرگ باشد، ممکن است ضریب حداکثر به دست آمده نتواند نماینده مناسبی از حداکثر تقاضای آب مورد نظر برای تجزیه و تحلیل خاص شبکه توزیع آب شهری باشد. در تحلیل‌ها به خصوص به منظور بهره‌برداری بهینه از شبکه توزیع آب شهری، مقدار حداکثر تقاضا با تغییرات گام زمانی کم‌تر از یک ساعت نیز مورد نیاز است. در دستورالعمل‌های موجود، معمولاً ضرایب نوسان تقاضا برای فواصل زمانی کم‌تر از یک ساعت ارائه نشده است؛ لذا بررسی مقدار حداکثر تقاضای مشترکین در گام‌های



شکل ۱- روندنمای پژوهش حاضر

۲- مواد و روش‌ها

۲-۲- محاسبه ضرایب حداکثر تقاضا برای گام‌های زمانی

متفاوت

با توجه به این که یکی از اهداف این مطالعه بررسی تأثیر گام‌های زمانی مختلف (۵/۰ تا ۶۰ دقیقه) در محاسبه ضرایب حداکثر تقاضا است، از داده‌های مربوط به پروژه‌های ۱، ۲، ۵ و ۸ (جدول ۴) که دارای دقت بالای اندازه‌گیری با گام‌های زمانی ۵/۰ و ۵ دقیقه هستند، استفاده شد. به منظور محاسبه ضرایب حداکثر تقاضا در بازه ۵/۰ تا ۶۰ دقیقه، هشت گام زمانی مختلف مطابق جدول ۵ انتخاب شد.

۲-۱- مورد مطالعه

در مطالعه حاضر هشت شبکه توزیع آب در استان‌های مختلف کشور با توجه به ویژگی‌های تنوع مقادیر جمعیت، گام زمانی اندازه‌گیری و حداقل مقدار نشت به شرح جدول ۴ مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور تغییرات مقدار دبی ورودی با نصب دبی‌سنج در ورودی زیر نواحی مورد مطالعه، اندازه‌گیری شد. بازه زمانی اندازه‌گیری برای هر پروژه در جدول ۴ بیان شده است.

جدول ۴- مشخصات نواحی مورد مطالعه

شماره پروژه	جمعیت تقریبی (نفر)	نام زیر ناحیه	محل پروژه	گام‌های زمانی ثبت داده‌ها (دقیقه)	بازه زمانی اندازه‌گیری
۱	۳۵۰	خسروی ۱	خراسان رضوی، شهر مشهد	۵/۰	بهمن ۱۳۹۸ تا اردیبهشت ۱۴۰۰
۲	۶۵۰	نماز ۴	خراسان رضوی، شهر مشهد	۵/۰	فروردین ۱۴۰۰ تا شهریور ۱۴۰۰
۳	۸۵۰	شیدان	اصفهان، روستای شیدان	۳۰	مهر ۱۴۰۰ تا اردیبهشت ۱۴۰۱
۴	۱۷۰۰	کبوترآباد	اصفهان، روستای کبوترآباد	۳۰	آبان ۱۴۰۰ تا اردیبهشت ۱۴۰۱
۵	۳۵۰۰	خسروی ۵	خراسان رضوی، شهر مشهد	۵/۰	فروردین ۱۴۰۰ تا اسفند ۱۴۰۰
۶	۸۰۰۰	معصومیه	خراسان جنوبی، شهر بیرجند	۶۰	فروردین ۱۳۹۹ تا اردیبهشت ۱۴۰۰
۷	۱۱۰۰۰	زون ۱ طیس	خراسان جنوبی، شهر طیس	۶۰	تیر ۱۴۰۰ تا دی ۱۴۰۰
۸	۱۰۰۰۰۰	زون II	خراسان رضوی، شهر مشهد	۵	دی ۱۳۹۹ تا شهریور ۱۴۰۰

جدول ۵- ضرایب حداکثر تقاضا برای گام‌های زمانی مختلف

$PF_{\Delta t}$	$PF_{\Delta t/5}$	PF_1	$PF_{2/5}$	PF_5	PF_{10}	PF_{15}	PF_{30}	PF_{60}
گام زمانی (دقیقه)	۵/۰	۱	۲/۵	۵	۱۰	۱۵	۳۰	۶۰

در شکل ۲ تغییرات مقدار جریان لحظه‌ای برای یک منطقه مسکونی در بازه زمانی پنج دقیقه ارائه شده است. این نمودار مثالی از محاسبات انجام شده توسط رابطه (۱۲) با میانگین تقاضای ۴۳۲ مترمکعب است (Scheepers, 2012). ضریب حداکثر تقاضا در گام زمانی ده ثانیه و پنج دقیقه‌ای نیز در یک دوره زمانی ۲۴ ساعت با استفاده از محاسبه حجم متوسط تقاضای آب ($V_{\Delta t}$) در گام زمانی مشخص (۱۰ ثانیه و ۵ دقیقه) تعیین شده است. با توجه به منحنی تغییرات جریان (آبی رنگ) در شکل ۲، مقدار سطح زیر منحنی برای محاسبه حجم متوسط تقاضای آب برای گام‌های زمانی ۱۰ ثانیه، ۵ دقیقه و ۲۴ ساعت، به ترتیب ۰/۲، ۵/۱ و ۴۳۲ مترمکعب است. بنابراین حجم متوسط تقاضای آب روزانه ($\bar{V}_{\Delta t}$) در گام زمانی ۱۰ ثانیه برابر ۰/۰۵ مترمکعب در هر ۱۰ ثانیه ($\frac{432}{24 \times 60 \times 6} = 0.05$) و در گام زمانی ۵ دقیقه برابر ۱/۵ مترمکعب در هر ۵ دقیقه ($\frac{432}{24 \times 12} = 1.5$) است. لذا مقدار ضریب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی ۱۰ ثانیه ($\frac{0.2}{0.05} = 4$) و پنج دقیقه ($\frac{5.1}{1.5} = 3.8$) محاسبه می‌شود.

بر اساس اطلاعات پروژه‌های مذکور، گام‌های محاسباتی زیر به منظور استخراج ضرایب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی مختلف انجام شد:

۱. حجم متوسط تقاضای آب با استفاده از سطح زیر منحنی نمودار جریان لحظه‌ای در گام زمانی مشخص (جدول ۵) محاسبه شد؛

۲. برای گام زمانی مورد نظر با محاسبه متوسط حجم تقاضای آب و تعیین مقدار حداکثری آن، ضریب حداکثر تقاضا با نسبت حداکثر حجم متوسط تقاضای آب به حجم متوسط تقاضای آب روزانه طبق معادله (۱۲) تعیین شد (Scheepers, 2012):

$$PF_{\Delta t} = \frac{(V_{\Delta t})_{max}}{(\bar{V}_{\Delta t})} \quad (12)$$

که $(V_{\Delta t})_{max}$: بیشترین مقدار حجم متوسط تقاضای آب و $(\bar{V}_{\Delta t})_{avg}$: حجم متوسط تقاضای آب روزانه در گام زمانی مشخص هستند.



شکل ۲- مثالی از تغییرات نرخ جریان لحظه‌ای روزانه در یک منطقه مسکونی

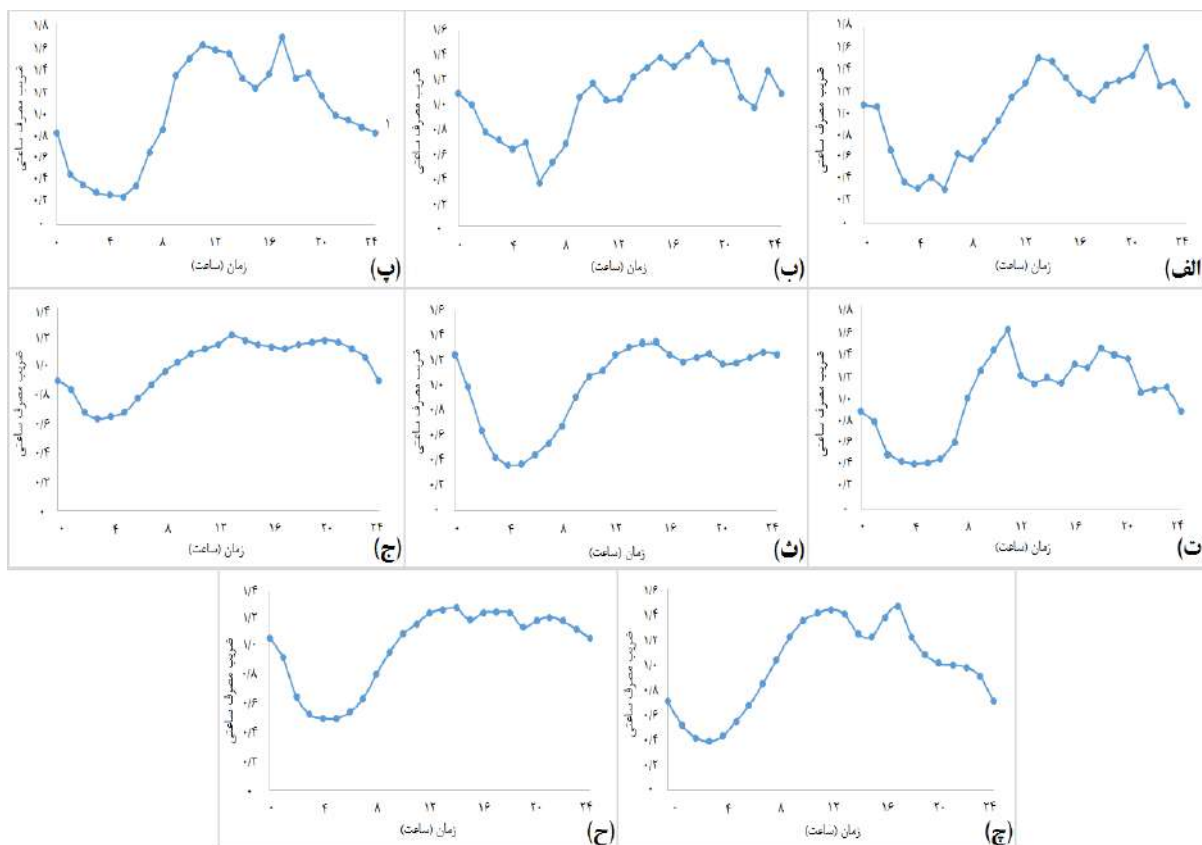
۳- نتایج

هم‌چنین زمان وقوع مقدار حداکثر تقاضای ساعتی در طول مدت زمان بررسی برای هر پروژه متفاوت است.

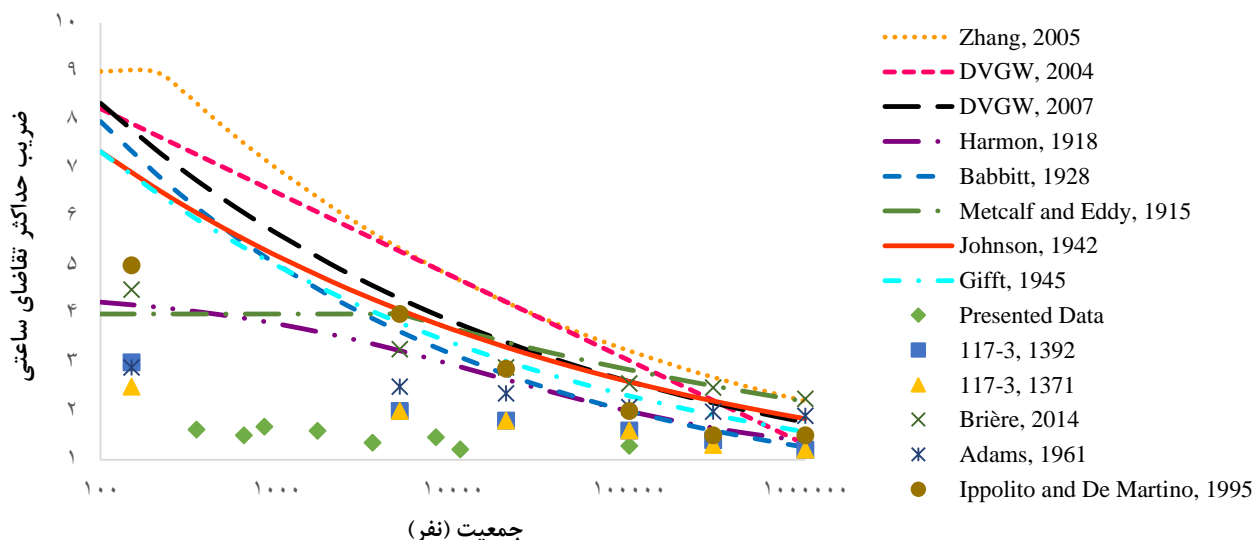
مقادیر عددی ضریب حداکثر تقاضای ساعتی متناسب با جمعیت هر پروژه از الگوی تقاضای آب هر ناحیه (شکل ۳) استخراج شده و در شکل ۴ با عنوان "داده‌های حاضر" نمایش داده شده است. در این نمودار محور قائم، ضریب حداکثر ساعتی و محور افقی، جمعیت برحسب نفر است. هم‌چنین در این شکل روابط (۱) الی (۹) و مراجع جدول ۱ نیز نشان داده شده است.

۳-۱- تأثیر جمعیت بر ضریب حداکثر تقاضای ساعتی

الگوی تقاضای آب برای نواحی مورد مطالعه با بررسی سالیانه داده‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. در نمودارهای شکل ۳ محور قائم، مقادیر ضرایب ساعتی و محور افقی، زمان برحسب ساعت است. مقادیر ضرایب ساعتی در الگوی تقاضای آب در نواحی مورد مطالعه، متناسب با جمعیت، مقادیر متفاوتی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- الگوی تقاضای آب در گام زمانی یک ساعته برای پروژه‌های شماره: الف) یک؛ ب) دو؛ پ) سه؛ ت) چهار؛ ث) پنج؛ ج) شش؛ چ) هفت؛ و) هشت



شکل ۴- مقادیر ضریب حداکثر تقاضای ساعتی محاسبه‌شده در نواحی مورد مطالعه

درصد نسبت به واقعیت کاهش دهد (مرادی سبزوکی و همکاران، ۱۳۹۳).

۳-۲- تأثیر گام زمانی بر ضریب حداکثر تقاضا

به منظور بررسی تأثیر گام زمانی بر ضریب حداکثر تقاضا، در شکل ۵ ضرایب حداکثر تقاضا براساس گام‌های زمانی مختلف مطابق جدول ۵ برای پروژه‌های شماره ۱، ۲، ۵ و ۸ نشان داده شده است. سایر پروژه‌ها به علت عدم امکان اندازه‌گیری ضریب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی کوچک‌تر، در این بخش از پژوهش مورد استفاده قرار نگرفته است.

نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که تفاوت بین ضریب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی مختلف (شیب منحنی) وابسته به جمعیت و مقدار گام زمانی است؛ به طوری که با افزایش جمعیت و هم‌چنین افزایش مقدار گام زمانی، شیب نمودارها کاهش می‌یابد. در شکل ۶ نیز تغییرات نسبت مقدار ضریب حداکثر تقاضا به ضریب تقاضای ساعتی برای گام‌های زمانی مختلف تقسیم بر ۶۰ در مقیاس لگاریتمی (محور x) نمایش داده شده است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش گام‌های زمانی، نسبت بین حداکثر حجم متوسط تقاضای آب در گام زمانی مشخص و حجم متوسط تقاضای آب در گام زمانی یک ساعت، کاهش می‌یابد و لذا تغییرات جریان کم‌تر و الگوی تقاضای آب متعادل‌تر می‌شود. در شکل ۷ بازه تغییرات ضرایب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی ذکر شده در جدول ۵، با توجه به جمعیت هر ناحیه (جدول ۱) به شکل جعبه‌ای نمایش داده شده است. در این شکل محور قائم، ضریب حداکثر ساعتی و محور افقی، جمعیت برحسب نفر است. با توجه به شکل ۷، نتایج نشان می‌دهد که بازه

اگر به داده‌های اندازه‌گیری در شکل ۴ داده‌های حاضر یک نمودار برازش داده شود، رابطه (۱۳) پیشنهاد می‌شود.

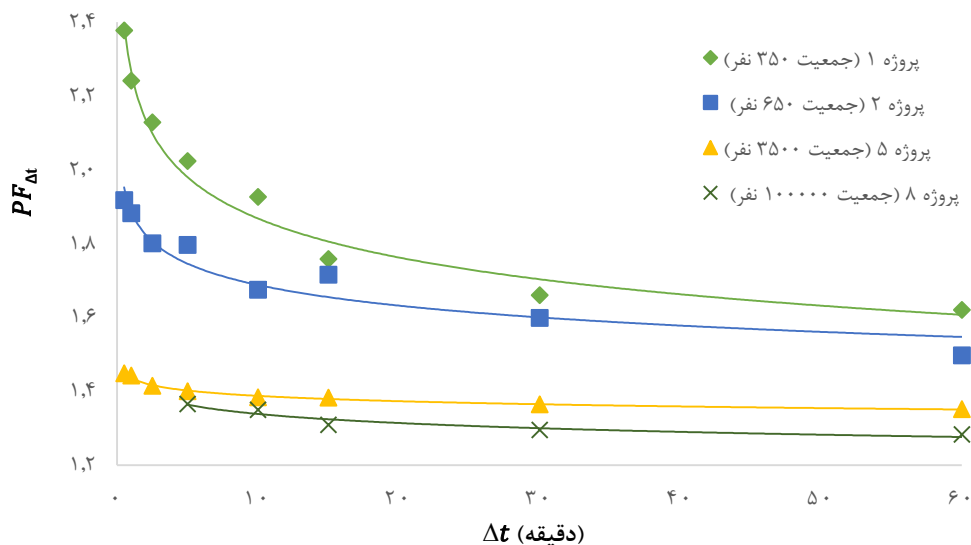
$$PF_h = 0.526P^{-0.173} + 1 \quad (13)$$

که P : جمعیت برحسب هزار نفر و مقدار ضریب رگرسیون (R^2) این رابطه برابر ۰/۶ است.

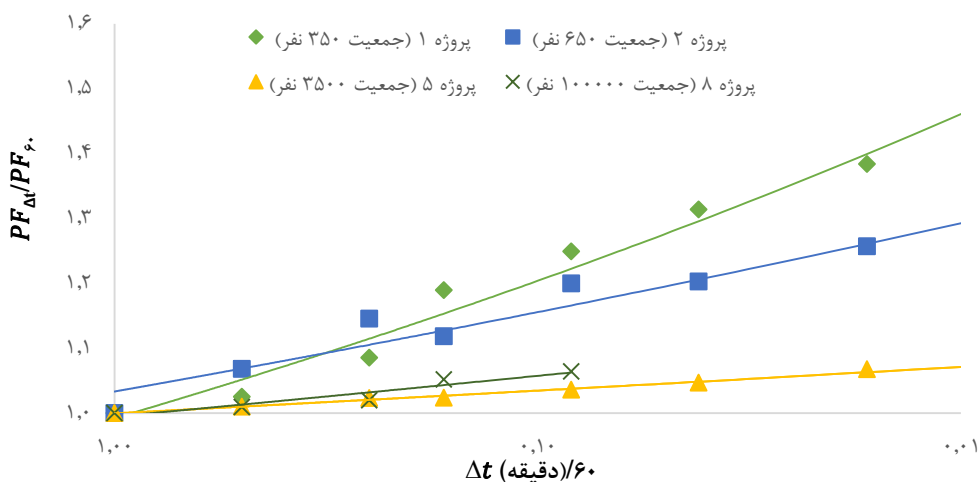
در شکل ۴، بین مقادیر ضرایب حداکثر تقاضای ساعتی محاسبه‌شده توسط داده‌های واقعی و مقادیر ارائه‌شده در سایر مراجع، تفاوت مشاهده می‌شود. از جمله مواردی که مقدار نوسان در الگوی تقاضای روزانه آب یا ضریب حداکثر تقاضای ساعتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، میزان جریان ۲۴ ساعت نشت در نواحی مورد مطالعه و وجود مخازن خانگی است. در پروژه شماره ۵، مشترکین دارای مخزن خانگی ۱۳ درصد بوده‌اند. هم‌چنین در پروژه ۶، آب بدون درآمد حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد است. در مقایسه پروژه‌های ۶ و ۷، نمودار الگوی تقاضای آب در پروژه ۶ دارای نوسان کم‌تری است. عوامل ذکر شده باعث ایجاد یک جریان تقاضای متفاوت با الگوی تقاضای مشترکین در مدت ۲۴ ساعت می‌شود. با ترکیب جریان نشت و جریان ورودی به مخازن ذخیره آب خانگی در مدت زمان ۲۴ ساعت با جریان تقاضای آب مشترکین، الگوی تقاضای ورودی به این نواحی دارای نوسان کم‌تری خواهد شد. بنابراین این موضوع باعث متعادل‌سازی جریان تقاضای آب شده و باعث کاهش مقادیر ضریب حداکثر تقاضای ساعتی می‌شود. در همین راستا بررسی میدانی ضریب حداکثر تقاضا در شبکه‌های توزیع آب روستایی در شمال شرق خوزستان نشان داده است که در محاسبه ضریب حداکثر تقاضا بدون توجه به اثر هدررفت‌های واقعی، می‌تواند نتایج را بین ۱۴/۵ تا ۲۴/۵

و ۶ درصد است. بنابراین بازه تغییرات ضرایب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی مختلف با افزایش مقدار جمعیت، کاهش می‌یابد.

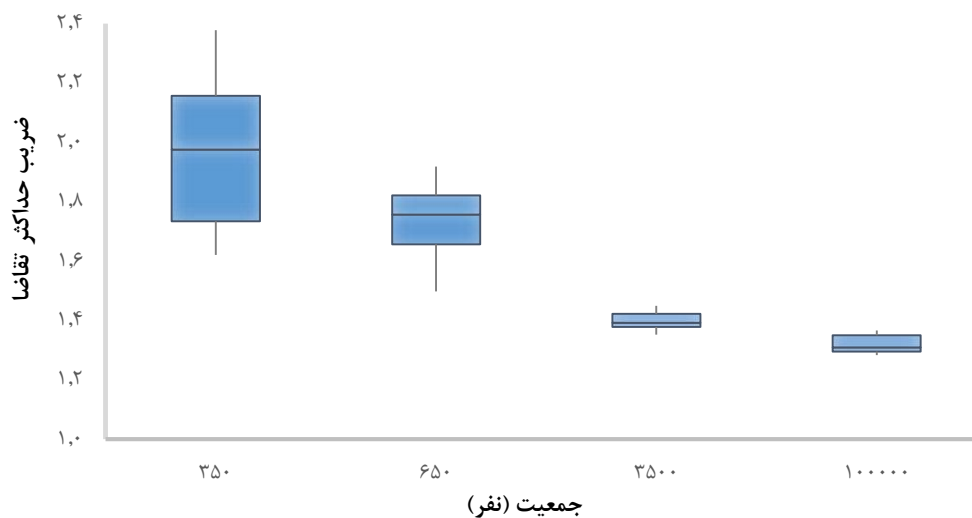
تغییرات ضرایب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی مختلف، برای جمعیت ۳۵۰، ۶۵۰، ۳۵۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ نفر، به ترتیب ۴۷، ۲۸، ۷،



شکل ۵- ضرایب حداکثر تقاضا بر اساس بازه‌های زمانی مختلف برای پروژه‌های مورد مطالعه



شکل ۶- تغییرات ضرایب حداکثر تقاضا با گام‌های زمانی مختلف برای پروژه‌های مورد مطالعه



شکل ۷- بازه تغییرات ضرایب حداکثر تقاضا متناسب با تغییرات جمعیت

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر داده‌های جریان پیوسته، مربوط به پروژه‌های مختلف در بازه زمانی سال ۱۳۹۹-۱۴۰۱ مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از درون‌یابی و محاسبه حجم متوسط تقاضای آب در مدت یک ساعت، الگوی تقاضای آب ۲۴ ساعته محاسبه شد. براساس نتایج به‌دست آمده یک رابطه جدید بین ضریب حداکثر تقاضا و مشخصه‌های جمعیت و گام زمانی ارائه شد. نتایج نشان داد که با افزایش جمعیت و گام زمانی، مقدار ضریب حداکثر تقاضا کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال مقدار ضریب حداکثر تقاضا در گام زمانی نیم ساعت در جمعیت ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ نفر به ترتیب حدود ۱/۵۳ و ۱/۳۳ برابر ضریب حداکثر تقاضا در گام زمانی یک ساعت خواهد بود و نیز با کاهش مقدار گام‌های زمانی، مقادیر ضرایب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی مختلف از یکدیگر دور می‌شوند. هم‌چنین نتایج حاصل نشان داد که مقادیر ضریب حداکثر تقاضای آب ساعتی اندازه‌گیری شده در شبکه‌های مختلف توزیع آب مورد مطالعه، با مراجع مورد استفاده در طراحی شبکه‌های توزیع آب کشور (نشریه ۳-۱۱۷) لزوماً یکسان نیست. لذا مطالعه بیشتر در مورد ضریب حداکثر تقاضا برای مقاصد طراحی و بهره‌برداری بهینه شبکه‌های آب ضروری است.

۵- پی‌نوشت‌ها

- 1- Dimensionless Peak Factor
- 2- Peak Factor
- 3- Hourly Peak Factor
- 4- Gumbel Distribution
- 5- Instantaneous Peak Factor
- 6- Presented Data

۶- مراجع

تابش، م.، قره‌خانی، ب.، و حیدرزاده، ر.، (۱۳۹۴). "بررسی میدانی ضرایب حداکثر مصرف آب (مطالعه موردی: تهران و کاشمر)"، کنفرانس و نمایشگاه مهندسی آب، تهران، ایران.
سازمان برنامه و بودجه، (۱۳۷۱). "ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی"، نشریه ۳-۱۱۷، دفتر مهندسی و معیارهای فنی وزارت نیرو.
مرادی سبزوکی، ع.، کاشفی‌پور، س.م.، و سلیمی چم‌کاکایی، آ.، (۱۳۹۳). "بررسی میدانی ضریب حداکثر تقاضا در شبکه‌های توزیع آب روستایی (شمال شرق خوزستان)"، مجله آب و

با توجه به نتایج شکل ۶ برای تعیین ضریب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی مختلف رابطه (۱۴) پیشنهاد می‌شود:

$$\frac{PF_{\Delta t}}{PF_{60}} = \left(\frac{\Delta t}{60}\right)^{-a} \quad (14)$$

که مقدار گام زمانی (Δt) برحسب دقیقه و توان a متغیر است. با توجه به نتایج شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان دریافت که ضریب a تابعی از جمعیت بوده و با استفاده از رگرسیون غیرخطی برای داده‌های پروژه‌های این مطالعه، مقدار این ضریب طبق رابطه (۱۵) پیشنهاد می‌شود.

$$a = 0.615P^{-0.17} \quad (16)$$

با جای‌گذاری مقدار ضریب a در رابطه (۱۴)، رابطه (۱۶) با ضریب رگرسیون برابر ۰/۹۲ حاصل می‌شود.

$$\frac{PF_{\Delta t}}{PF_{60}} = \left(\frac{\Delta t}{60}\right)^{-0.615P^{-0.17}} \quad (16)$$

با تعیین مقدار ضریب حداکثر تقاضای ساعتی (PF_{60}) با استفاده از رابطه‌های (۱) الی (۱۰) و جای‌گذاری در رابطه (۱۶)، مقدار ضریب حداکثر تقاضا در گام زمانی دلخواه ($PF_{\Delta t}$) مشخص می‌شود. با توجه به رابطه (۱۶) زمانی که جمعیت افزایش یابد، مقدار توان در رابطه به عدد صفر نزدیک می‌شود؛ بنابراین تأثیر مقدار گام زمانی بر ضریب حداکثر تقاضا کاهش می‌یابد ($PF_{\Delta t} = PF_{60}$). به‌عنوان مثال اگر از رابطه تجربی پیشنهادی (۱۳) برای محاسبه ضریب حداکثر تقاضای ساعتی (PF_{60}) استفاده شود رابطه (۱۷) حاصل می‌شود:

$$PF_{\Delta t} = (0.526P^{-0.173} + 1) \left(\frac{\Delta t}{60}\right)^{-0.615P^{-0.17}} \quad (17)$$

که P : مقدار جمعیت برحسب هزار نفر و (Δt): گام زمانی بر حسب دقیقه است.

باتوجه به رابطه (۱۷)، با افزایش جمعیت، مقدار ضریب حداکثر تقاضا به عدد ۱ نزدیک می‌شود؛ لذا حداقل مقدار ضریب حداکثر تقاضا برابر با عدد ۱ خواهد بود. طبق رابطه (۱۷) با افزایش جمعیت و گام زمانی، مقدار ضریب حداکثر تقاضا کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال برای جمعیت ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ نفر، با کاهش ۵۰ درصدی گام زمانی (نسبت به گام زمانی یک ساعته)، مقدار ضریب حداکثر تقاضا به ترتیب ۵۳ و ۳۳ درصد افزایش خواهد یافت.

- under dry weather conditions”, *Engineering News Record*, 80, 1233.
- Ippolito, G., and DE Martino, G., (1995), *Appunti di costruzioni idrauliche*, Liguori Editore, Italy.
- Johnson, C.F., (1942), “Relation between average and extreme sewage flow rates”, *Engineering News Record*, 129, 500-501.
- Johnson, E., (1999), “Degree of utilisation, The reciprocal of the peak factor, Its application in the operation of a water supply and distribution system, *WATER SA-PRETORIA*-, 25, 111-114.
- Martínez-Solano, J., Iglesias-Rey, P.L., Perez-García, R., and López-Jimenez, P.A. (2008), “Hydraulic analysis of peak demand in looped water distribution networks”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134, 504-510, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(2008\)134:6\(504\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2008)134:6(504)).
- Metcalf, L., and Eddy, H.P., (1915), *American sewerage practice*, Vol. 3, McGraw-Hill, New York, USA.
- Research, C.F.S.A.I., (2003), “Guidelines for human settlement and design”, A Report Compiled Under the Patronage of the Department of Housing by the CSIR, Pretoria, South Africa: CSIR Building and Construction Technology.
- Scheepers, H.M., (2012), “Deriving peak factors for residential indoor water demand by means of a probability based end-use model”, PhD. Thesis, Department of Civil Engineering, Stellenbosch University, South Africa.
- Tchobanoglous, G., and Schroeder, E., (1987), *Water Quality*, Addison and Wesley, Reading, MA.
- Tricarico, C., De Marinis, G., Gargano, R., and Leopardi, A., (2007), “Peak residential water demand”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, Thomas Telford Ltd, 115-121, <https://doi.org/10.1680/wama.2007.160.2.115>.
- Tricarico, C., Morley, M.S., Gargano, R., Kapelan, Z., De Marinis, G., and Savić, D., (2014), “The influence of the existing network layout on water distribution system redesign analysis”, *Journal of Hydroinformatics*, 16, 1375-1389, <https://doi.org/10.2166/hydro.2014.017>.
- Zhang, X., (2005), “Estimating peaking factors with Poisson rectangular pulse model and extreme value theory”, Ph.D. Thesis, Department of Environmental Engineering, University of Cincinnati, https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3638-9_3.
- Zhang, X., Buchberger, S.G., and Van Zyl, J.E., (2005), “A theoretical explanation for peaking factors”, *Impacts of Global Climate Change*, (pp. 1-12), [https://doi.org/10.1061/40792\(173\)51](https://doi.org/10.1061/40792(173)51).
- معاون نظارت و راهبردی ریاست جمهوری، (۱۳۹۲)، “ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی”، نشریه ۱۱۷-۳ (بازنگری اول)، دفتر مهندسی و معیارهای فنی وزارت نیرو.
- Adams, R.W., (1961), “The analysis of distribution systems”, *Institution of Water Engineering*, 15, 415-428.
- Babbitt, H.E., (1928), *Sewerage and sewage treatment*, John Wiley & Sons Inc, London, New York, USA.
- Balacco, G., Carbonara, A., Gioia, A., Iacobellis, V., and Piccinni, A.F., (2017), “Evaluation of peak water demand factors in Puglia (Southern Italy)”, *Water*, 9, 96, <https://doi.org/10.3390/w9020096>.
- Balacco, G., Carbonara, A., Gioia, A., Iacobellis, V., and Piccinni, A.F., (2018), “Investigation of peak water demand variability at local scale in Puglia (Southern Italy)”, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 2, 674, <https://doi.org/10.3390/proceedings2110674>.
- Briere, F.G., (2014), *Drinking-water distribution, sewage, and rainfall collection*, Third Edition, Presses inter Polytechnique, Canada.
- Clark, J.W., Viessman, W., and Hammer, M.J., (1969), *Water supply and pollution control*, Third Edition, John Wiley & Sons Inc, New York, USA.
- Davis, C.V., and Sorensen, K.E., (1980), *Handbook of applied hydraulics*, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York.
- Diao, K., Barjenbruch, M., and Bracklow, U., (2010), “Study on the impacts of peaking factors on a water distribution system in Germany”, *Water Science and Technology: Water Supply*, 10, 165-172, <https://doi.org/10.2166/ws.2010.168>.
- Deutscher Verein des Gas-und Wasserfaches (DVGW), (2004), *Worksheet W 400-1*, German Technical and Scientific Association for Gas and Water.
- Deutscher Verein des Gas-und Wasserfaches (DVGW), (2007), *Worksheet W 410*, German Technical and Scientific Association for Gas and Water.
- Gargano, R., Tricarico, C., and De Marinis, G., (2010), “Residential water demand-daily trends”, *Proceedings of the Annual International Symposium on Water Distribution Systems Analysis*, 1314-1323, [https://doi.org/10.1061/41203\(425\)118](https://doi.org/10.1061/41203(425)118).
- Gato-Trinidad, S., and Gan, K., (2012), “Characterizing maximum residential water demand”, *Urban Water*, 122, 15-24, <https://doi.org/10.2495/uw120021>.
- Giffit, H.M., (1945), “Estimating variations in domestic sewage flows”, *Water Works Sewerage*, Chicago, USA.
- Goodrich, R., (1942), “Capacity tests of ground-water sources at Laramie, Wyoming”, *Journal of American Water Works Association*, 1629-1634, <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1942.tb17293.x>.
- Hammer, M.J., (1986), *Water and wastewater technology*, John Wiley & Sons Inc, New York, USA.
- Harmon, W.G., (1918), “Forecasting sewage at Toledo



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

Numerical Study of the Flow Skew Angle Impact on the Flow Pattern of Complex Bridge Piers

Masoume Rostamabadi^{1*}, Hamidreza Sama² and
Seyed Hossein Mohajeri³

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering,
Buin Zahra Branch, Islamic Azad University, Buin Zahra,
Iran

2- Ph.D. Graduate, Department of Water Engineering,
Science and Research Unit, Islamic Azad University,
Tehran, Iran.

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering,
Faculty of Technology and Engineering, Kharazmi
University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author, Email: Rostamabadi@iau.ac.ir

Received: 16/12/2024

Revised: 03/03/2025

Accepted: 12/03/2025

© IWWA

شبیه‌سازی عددی تأثیر زاویه برخورد جریان بر الگوی جریان حول پایه‌های پل مرکب

معصومه رستم‌آبادی^{۱*}، حمیدرضا سما^۲ و سیدحسین مهاجر^۳

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بوئین زهرا، بوئین زهرا، ایران.

۲- دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول، ایمیل: Rostamabadi@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۶

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

Most studies on complex bridge piers have focused on scour around the piers, with less attention paid to the turbulent flow pattern resulting from changes in the flow impact angle. In the present study, a numerical simulation of the flow pattern around composite bridge piers was conducted for angles of 10, 30, 50, 70, and 90 degrees relative to the flow direction. The simulations were performed using Flow-3D software. After verifying the numerical model, the flow pattern and shear stress around the piers were examined. Velocity vector analysis showed that four regions can be distinguished around the column for all angles. First, the stagnation region, where the flow hits the column. Second and Third, regions on both sides of the column, where vortex flow is formed around the vertical axis; and Fourth, the saddle region, which is formed at the boundary between region two and the downstream flow. The change in the flow impact angle affected the extent and position of these areas; at an angle of 90 degrees, areas 2 and 3 are entirely similar, and at an angle of 10 degrees, area 4 is not formed. The investigation of shear stress showed that, in general, the shear stress around the piers increased with increasing angle. Specifically, compared to the zero-degree angle, the bed shear stress increased by 65, 135, 170, 173, and 202 percent for angles of 10 to 90 degrees, respectively. The shear stress around the first-row piers is always higher than that around the second-row piers; for an angle of 90 degrees, the average shear stress around the second-row piers is 45 percent of that around the first-row piers. However, this ratio is higher for other angles, reaching up to about 58 percent.

Keywords: Complex Bridge Piers, Shear Stress, Piers Skewed Angle, Flow3D.

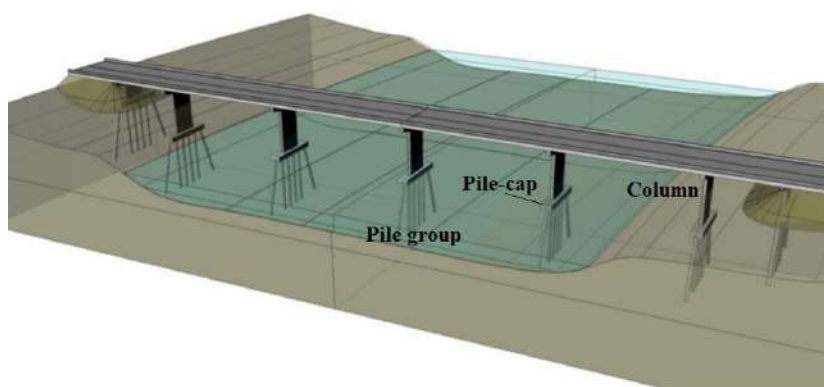
چکیده

اکثر مطالعات مربوط به پایه‌های پل مرکب بر آب‌شستگی حول پایه‌ها متمرکز بوده است و توجه کم‌تری بر الگوی جریان آشفته با تغییر زاویه برخورد جریان به پایه‌ها معطوف شده است. در مطالعه حاضر شبیه‌سازی عددی الگوی جریان حول پایه‌های پل مرکب با زوایای ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درجه نسبت به جهت جریان انجام شده است. برای این منظور، شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار Flow3D انجام شد و پس از صحت‌سنجی مدل عددی، الگوی جریان و تنش برشی حول پایه‌ها بررسی شد. برای کلیه زوایا، بررسی بردارهای سرعت نشان‌داد در اطراف ستون چهار ناحیه قابل تشخیص است. اول ناحیه سکون در محل برخورد جریان به ستون است، نواحی ۲ و ۳ در دو طرف ستون که جریان گردابی حول محور قائم در آن‌ها شکل گرفته است و ناحیه چهار که ناحیه زینی است و در مرز ناحیه شماره ۲ و جریان پایین دست به وجود آمده است. تغییر زاویه برخورد جریان با پایه‌ها، گستردگی و موقعیت این نواحی را تحت تأثیر قرار داده است، به طوری که در زاویه ۹۰ درجه نواحی ۲ و ۳ کاملاً مشابه و برای زاویه ۱۰ درجه، ناحیه ۴ تشکیل نشده است. بررسی تنش برشی نشان داد به طور کلی تنش برشی حول پایه‌ها با افزایش زاویه، بیش‌تر شده است؛ به طوری که از زاویه ۱۰ تا ۹۰ درجه به ترتیب ۶۵، ۱۳۵، ۱۷۰، ۱۷۳ و ۲۰۲ درصد تنش برشی بستر نسبت به زاویه صفر درجه افزایش یافته است. همواره تنش برشی حول پایه‌های ردیف اول بیش‌تر از تنش برشی حول پایه‌های ردیف دوم است؛ به طوری که به‌ازای زاویه ۹۰ درجه، تنش برشی متوسط حول پایه‌های ردیف دوم نسبت به پایه‌های ردیف اول ۴۵ درصد است، اما به‌ازای زوایای دیگر این نسبت بیش‌تر و تا حدود ۵۸ درصد است.

کلمات کلیدی: پایه‌پل مرکب، تنش برشی، زاویه برخورد جریان با پایه‌ها، Flow3D.

راستای گروه پایه‌های پل که عمود بر راستای عرشه هستند با جهت جریان زاویه‌دار می‌شوند. در این حالت زاویه برخورد جریان به گروه پایه‌ها از پارامترهای مهمی است که الگوی جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. محققان متعددی، درخصوص جریان و آب‌شستگی پایه‌های پل مرکب مطالعاتی انجام داده‌اند. برخی محققان روند آب‌شستگی و عمق آن با تغییر تعداد و فاصله بین پایه‌ها، شکل و فاصله سرشمع از بستر را بررسی کرده‌اند (Amini et al., 2011, Yang et al., 2018, 2024; Ferraro et al., 2013; 2012; Sheppard et al., 2023؛ خالدی و همکاران، ۱۳۹۹؛ محمدپور و همکاران، ۱۳۹۹).

ترکیبی از یک ستون دیوارمانند، یک سرشمع در زیر دیوار و گروهی از پایه‌های پل در زیر سرشمع، پایه پل مرکب^۱ نامیده می‌شود (Yang et al., 2024). در شکل ۱ طرح شماتیک یک جاده و پایه‌های پل مرکب روی آن نشان داده شده است. عبور جاده و یا راه‌آهن از روی رودخانه‌ها در محل‌های خاصی است که توسط مسیر کلی راه مشخص می‌شود. گاهی به دلیل شرایط جغرافیایی و مسیر راه، امکان عبور پل به صورت عمود بر مسیر جریان در رودخانه میسر نیست و عرشه پل، به صورت مورب عرض رودخانه را طی نموده و



شکل ۱- پل چنددهنه و پایه‌های پل مرکب روی سرشمع (Ettema et al., 2017)

اطراف پایه پل‌های مرکب انجام دادند. دو نوع مختلف از پایه‌های پل، بر مبنای پلهایی که در چند دهه اخیر در نیوزیلند خراب شدند، ساخته شد. ۹ تراز گوناگون برای سرشمع و هفت زاویه مختلف برای برخورد جریان با پایه‌ها انتخاب شد. زاویه‌ها از صفر تا ۹۰ درجه با فواصل ۱۵ درجه بود. نتایج مطالعات ایشان نشان داد تراز سرشمع و زاویه پایه‌های پل نسبت به مسیر جریان بر روی عمق آب‌شستگی تأثیر به‌سزایی دارد.

همان‌گونه که مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد، بیش‌تر پژوهش‌ها در زمینه پایه‌های پل مرکب بر تحلیل آب‌شستگی حول پایه‌ها و اثر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر روند آب‌شستگی متمرکز بوده است و توجه کمی بر الگوی جریان و تأثیر زاویه برخورد جریان با پایه‌ها بر الگوی جریان معطوف شده است. بررسی دقیق اثر زاویه پایه‌ها بر الگوی جریان و نیز مطالعه تنش‌های برشی بستر اطراف گروه پایه‌ها با تغییر زاویه به درک بهتر رفتار این سازه‌ها در مقابل جریان و تصمیم‌گیری درباره تعیین زاویه نصب پایه‌های پل منجر می‌شود. لذا در پژوهش حاضر به شبیه‌سازی عددی الگوی جریان حول پایه‌های پل مرکب با تغییر زاویه پرداخته شده است و پس از صحت‌سنجی مدل عددی، تغییرات سرعت و تنش برشی بستر با تغییر زاویه مورد بررسی قرار گرفته است. پنج زاویه مختلف از ۱۰ تا ۹۰ درجه با فواصل ۲۰ درجه در نظر گرفته شده است.

مطالعاتی در زمینه بررسی الگوی جریان اطراف پایه‌های پل مرکب انجام شده است (بهشتی و عطائی آشتیانی، ۱۳۸۹؛ اسدی پرتو و همکاران، بهروزی و همکاران، ۱۴۰۰). نتایج مطالعات بهشتی و عطائی آشتیانی (۱۳۸۹)، نشان داد جریان با برخورد به سرشمع در راستای قائم به دو قسمت تقسیم شده و بخشی به سمت ستون و بخش دیگر به سمت پایین سرشمع و پایه‌ها منحرف می‌شود. یک گردابه شبه‌نعل‌اسبی در کنار سرشمع و با محور چرخش در راستای جریان مشاهده شد. هم‌چنین دو گردابه با جهت چرخش مخالف در گوشه‌های بالادست و پایین‌دست سرشمع دیده شد. نتایج مطالعات اسدی پرتو و همکاران (۱۳۹۵)، نشان داد در مقایسه با پایه‌های ساده، جریان در نزدیکی سرشمع بسیار پیچیده است و جریان بسیار آشفته و گرداب‌های مختلفی ایجاد می‌شود که در اطراف پایه‌های ساده مشاهده نشده است. برخی محققان اثر زاویه گروه پایه‌ها را بر آب‌شستگی مورد بررسی قرار دادند (Nazariha, Yang et al., 2020; Sheppard et al., 2005; 1996). پورقاسم‌زاده و قمیشی (۱۴۰۱) با شبیه‌سازی فیزیکی، اثر زاویه گروه پایه‌های پل با جهت جریان بر حداکثر عمق آب‌شستگی گروه پایه‌ها را در زاویه‌های صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش زاویه، حداکثر عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. (Yang et al. (2018) آزمایشاتی را برای بررسی آب‌شستگی

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = 2\nu_T S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3)$$

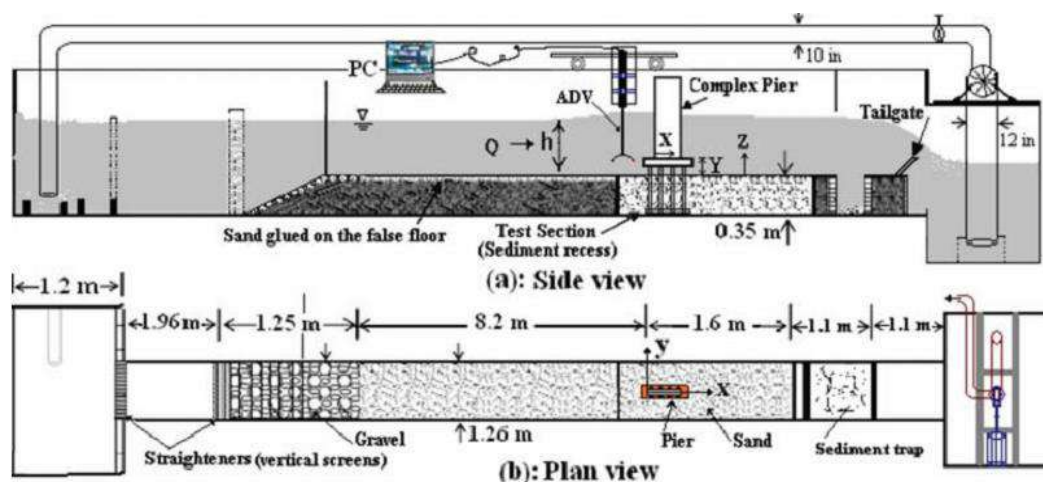
که t و p : به ترتیب زمان و فشار هستند. ρ : دانسیته سیال، σ_T : ضریب کشش سطحی، τ_{ij} : تنش رینولدز، ν_T : لزجت گردابه‌ای، k : انرژی جنبشی آشفتگی و δ_{ij} : دلتای کرونگر هستند (Flow Science Inc., 2016).

۲-۱- معرفی مدل عددی

Flow3D از مدل‌های سه‌بعدی شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی جریان است و دقت و سرعت خوبی برای پیش‌بینی جریان‌های با سطح آزاد دارد. در این مدل از روش حجم محدود در شبکه‌بندی منظم استفاده شده و معادلات حاکم بر جریان حل می‌شوند. همچنین مدل‌های آشفتگی مختلف مانند مدل طول اختلاط پرائنتل LES، $k-\epsilon$ و RNG برای حل ترم‌های آشفتگی در معادلات حاکم بر جریان را در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

۲-۲- صحت‌سنجی مدل عددی

به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، مدل آزمایشگاهی بهشتی و عطائی آشتیانی (۱۳۸۹) به کار رفته است. مطابق شکل ۲، مدل آزمایشگاهی مذکور شامل دو ردیف چهارتایی پایه پل با یک سرشمع مستطیلی و یک ستون مستطیلی روی سرشمع، در کانالی مستقیم به طول ۱۵ متر، عرض ۱/۲۵۴ متر و عمق ۰/۹ متر و به فاصله ۱۰ متری از بالادست کانال است.



شکل ۲- طرح شماتیک مدل آزمایشگاهی بهشتی و عطائی آشتیانی (۱۳۸۹): (a) مقطع طولی؛ و (b) پلان

سرشمع، L_c : طول ستون، D_c : عرض ستون، B_p : قطر هر پایه، G/B_p : فاصله پایه‌ها از هم، U : سرعت متوسط جریان در بالادست و h : عمق جریان است. Y : فاصله سرشمع تا کف کانال که ۶/۱۵ cm است، لذا ارتفاع پایه پل در زیر سرشمع ۲/۷۹ cm است.

به‌طور کلی مطالعه عددی الگوی جریان با تغییر زاویه برخورد جریان به پایه‌ها، نوآوری پژوهش حاضر است.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور شبیه‌سازی، از مدل عددی Flow3D استفاده شد. در مدل عددی مذکور معادلات حاکم بر حرکت سیال شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در جهات x ، y و z هستند. در پژوهش حاضر، الگوی جریان در بستر صلب شبیه‌سازی شده، لذا معادلات انتقال رسوب ارائه نشده است.

رابطه (۱) معادله پیوستگی با فرض تراکم ناپذیری جریان را نشان می‌دهد.

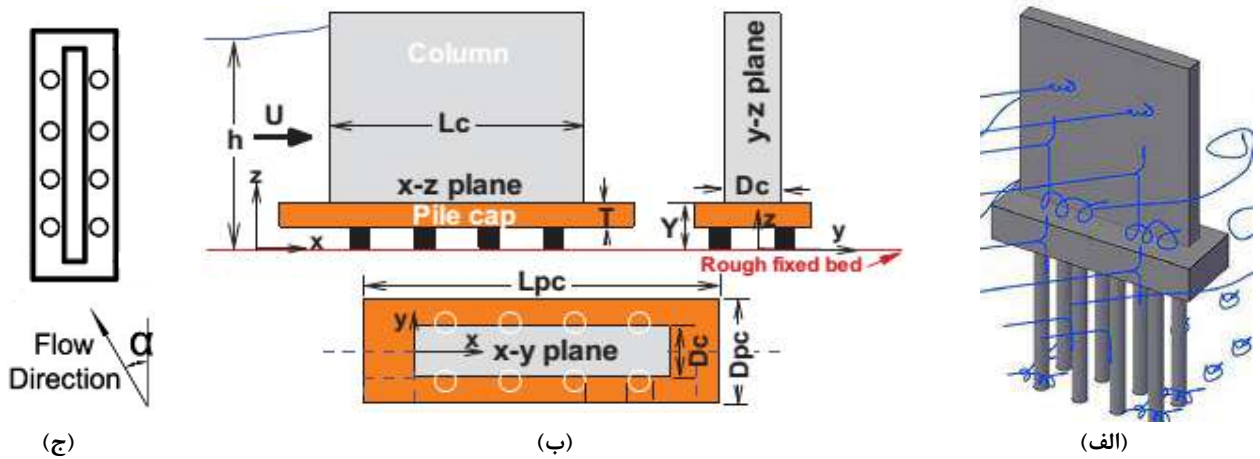
$$\frac{\partial a_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

که a_i : به‌ازای $i=1, 2, 3$ به ترتیب مؤلفه‌های سرعت u ، v و w در راستای x_i یعنی x ، y و z هستند.

معادله اندازه حرکت با فرض ثابت بودن ویژگی‌های سیال در امتداد محور x ها براساس رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial a_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial a_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial a_i}{\partial x_j} + \frac{\partial a_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\tau_{ij}}{\rho} \right] + \frac{\sigma_T K \gamma}{\rho} \frac{\partial \gamma}{\partial x_i} \quad (2)$$

در شکل ۳ هندسه پایه‌های پل، سرشمع و ستون نشان داده شده است. زاویه برخورد جریان با پایه‌ها صفر درجه است. مشخصات هندسی پایه‌ها نیز در جدول ۱ ارائه شده است. در جدول ۱، T : ضخامت سرشمع، L_{pc} : طول سرشمع، D_{pc} : عرض



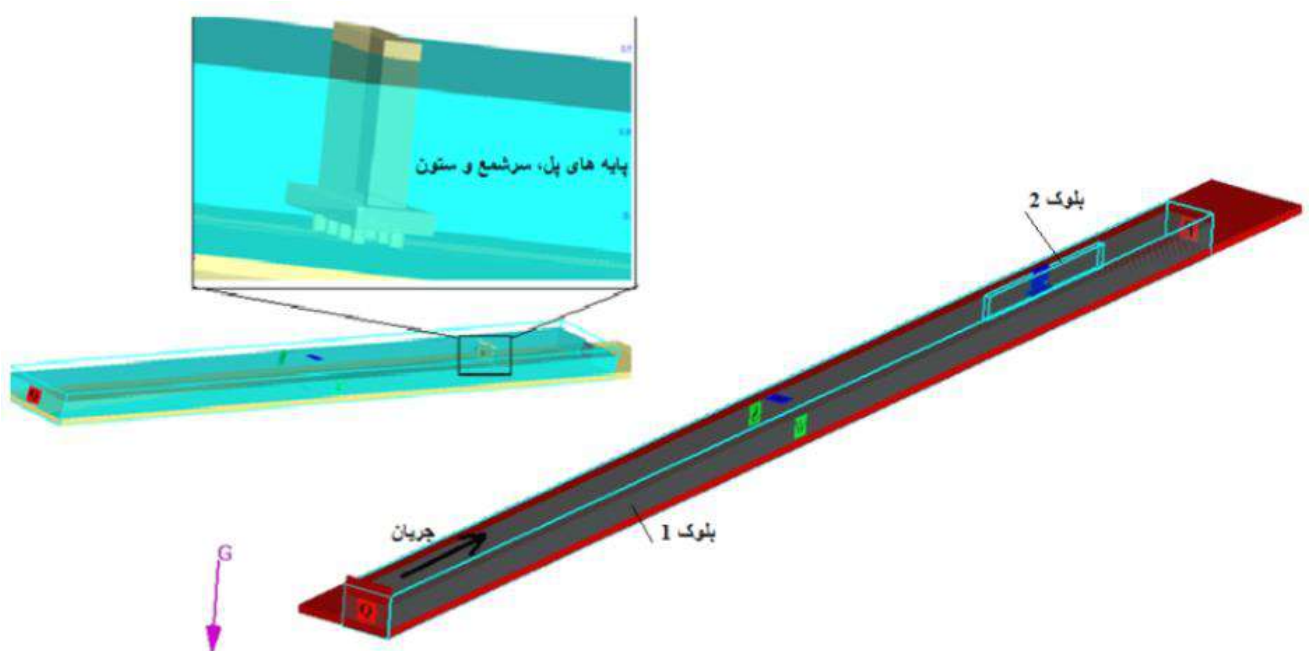
شکل ۳- پایه‌های پل مرکب با سرشمع و ستون: (الف) هندسه کلی؛ (ب) نمای طولی و پلان؛ و (ج) زاویه برخورد جریان با پایه‌ها (بهشتی و عطائی آشتیانی، ۱۳۸۹)

جدول ۱- مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی (بهشتی و عطائی آشتیانی، ۱۳۸۹)

$n \times m$	G/bp	Bp (cm)	Y (cm)	T (cm)	Lpc (cm)	Dpc (cm)	Lc (cm)	Dc (cm)	U (ms^{-1})	h (cm)
۲×۴	۲	۲/۵۴	۶/۱۵	۳/۳۶	۴۲	۱۴	۳۰/۳	۶/۸	۰/۳۷	۲۸/۵۳

کانال برهم منطبق شد (به دلیل رعایت اختصار از ارائه جزئیات خودداری شده است). لذا در شبیه‌سازی کانال دارای پایه‌های پل، طول کانال قبل از پایه‌ها ۱۵ متر در نظر گرفته شد. برای شبکه‌بندی مدل عددی، دو بلوک شبکه تو در تو^۳ در نظر گرفته شد. بلوک اصلی کل هندسه مدل را دربرمی‌گیرد، درحالی‌که بلوک دوم به منظور تقویت شبکه‌بندی اطراف هندسه پایه پل با هدف بهبود وضوح هندسه پایه‌ها و اجتناب از افزایش قابل توجه تعداد سلول‌های شبکه‌بندی به کار گرفته شد.

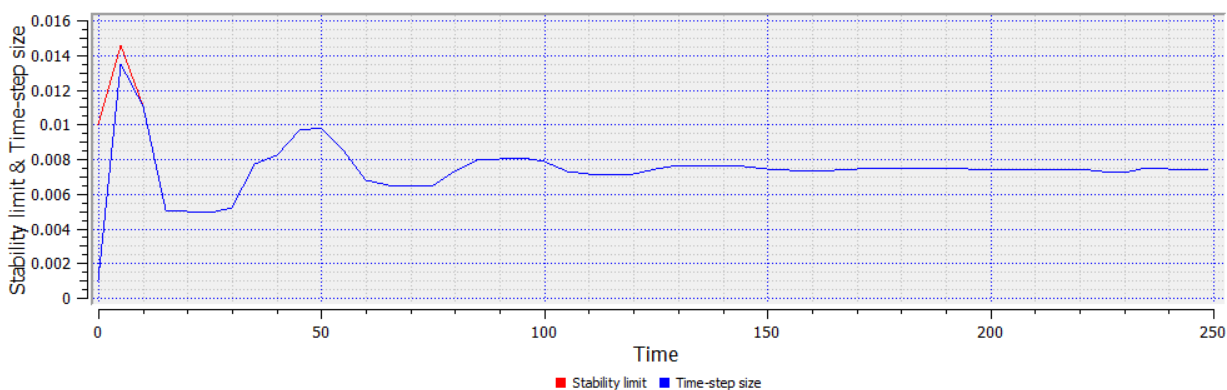
به منظور شبیه‌سازی جریان اطراف پایه‌ها، هندسه پایه‌های مرکب مدل آزمایشگاهی در اتوکد ترسیم شد و به صورت فایلی با پسوند stl به Flow3d فراخوانی شد. شکل ۴ هندسه کانال و پایه‌ها در مدل عددی را نشان می‌دهد. ابتدا به منظور اطمینان از توسعه یافتگی جریان قبل از رسیدن به گروه پایه‌ها، یک کانال ساده بدون در نظر گرفتن پایه‌های پل به طول ۲۰ متر برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد و پروفیل‌های بدون بعد شده سرعت جریان در فواصل طولی مختلف از ابتدای کانال با هم مقایسه شد. نتایج نشان داد پروفیل بی‌بعد سرعت در فواصل ۱۲ و ۱۴ متری از ابتدای



شکل ۴- هندسه پایه‌های پیچیده و شرایط مرزی در مدل عددی

در نظر گرفتن فشار اتمسفر روی سطح آزاد استفاده شد. برای بلوک دوم که در محدوده اطراف پایه‌ها است از شرط مرزی تقارن استفاده شد. در بخش تنظیمات مدل عددی، برای حل جملات آشفتگی در معادلات حاکم بر جریان از مدل آشفتگی RNG که در جریان‌های دارای جدایی از مرزها و جریان‌های چرخشی عملکرد بهتری از مدل k-ε دارد (Omara and Tawfik, 2018; Sicilian et al., 1987;) رستم‌آبادی و کاظمی، (۱۴۰۱) استفاده شد. بیشینه زمان شبیه‌سازی ۵۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. در شکل ۵ نمودار همگرایی مدل عددی نشان داده شده است. براساس شکل ۵، مدل عددی پس از حدود ۲۴۰ ثانیه به پایداری رسید و حل معادلات جریان متوقف شد. زمان اجرای مدل حدود ۱۲ ساعت طول کشید.

لازم است با انتخاب گام زمانی کوچک، استفاده از ضرایب زیرتخفیف مناسب و شرط مرزی مناسب بین دو بلوک، مانع از ناپایداری مدل عددی در مراحل اولیه شبیه‌سازی شد. نکته مهم دیگر در استفاده از شبکه‌های تودرتو، رعایت نسبت اندازه سلول‌های دو شبکه روی هم است که این نسبت نباید بیش‌تر از ۲ باشد؛ یعنی اندازه سلول‌های شبکه درشت‌تر، نمی‌تواند بیش‌تر از دو برابر اندازه سلول‌های شبکه ریزتر باشد؛ در غیر این صورت منجر به ناپایداری مدل عددی خواهد شد. شرایط مرزی به کار گرفته شده در مدل حاضر نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. در بالادست کانال از شرط مرزی دبی، در خروجی کانال شرط مرزی فشار معادل با عمق پایاب، برای دیواره‌های جانبی شرط مرزی دیواره و برای کف از شرط مرزی دیواره با زبری مشخص معادل با مقدار آزمایشگاهی و در نهایت برای مرز مشترک آب و هوا شرط مرزی تقارن برای



شکل ۵- نمودار همگرایی مدل عددی در شبیه‌سازی الگوی جریان حول پایه‌های پل مرکب (برگرفته از Flow3D)

جریان تحت تأثیر پایه‌ها نیست و جریان یکنواخت است. پروفیل سرعت مستقل از اندازه سلول‌های شبکه شده است. در مقطع پایین دست پایه‌ها ($x/D_c = 14.7$)، تفاوت زیادی بین نتایج شبکه‌بندی ۱ با دو شبکه دیگر وجود دارد، اما با تغییر شبکه‌بندی از ۲ به ۳، تغییر قابل توجهی در نتایج خروجی از شبیه‌سازی اتفاق نیفتاده است و نتایج نزدیک به یکدیگر هستند. مقدار کمی خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی (مقدار آزمایشگاهی منهای مقدار عددی تقسیم بر مقدار آزمایشگاهی) محاسبه و متوسط آن در جدول ۲ ارائه شده است.

در هر شبیه‌سازی عددی لازم است نتایج شبیه‌سازی مستقل از شبکه محاسباتی به دست آید. بدین منظور مشخصات سه شبکه‌بندی متفاوت به شرح جدول ۲ مورد استفاده قرار گرفت. برای مقایسه شبکه‌بندی‌های مذکور، مؤلفه افقی سرعت در راستای قائم در دو مقطع بالادست و پایین دست پایه‌های پل در شکل ۶ ترسیم شده است. در این شکل D_c عرض ستون و x فاصله طولی از شروع ستون (مطابق شکل ۳) است. در مقطع بالادست پایه‌ها ($x/D_c = -14.7$) پروفیل‌های سرعت در شبکه‌بندی ۱، ۲ و ۳ کاملاً بر یکدیگر منطبق هستند. در واقع در بالادست پایه‌ها که الگوی

جدول ۲- مشخصات شبکه‌های محاسباتی برای بررسی نتایج مستقل از شبکه

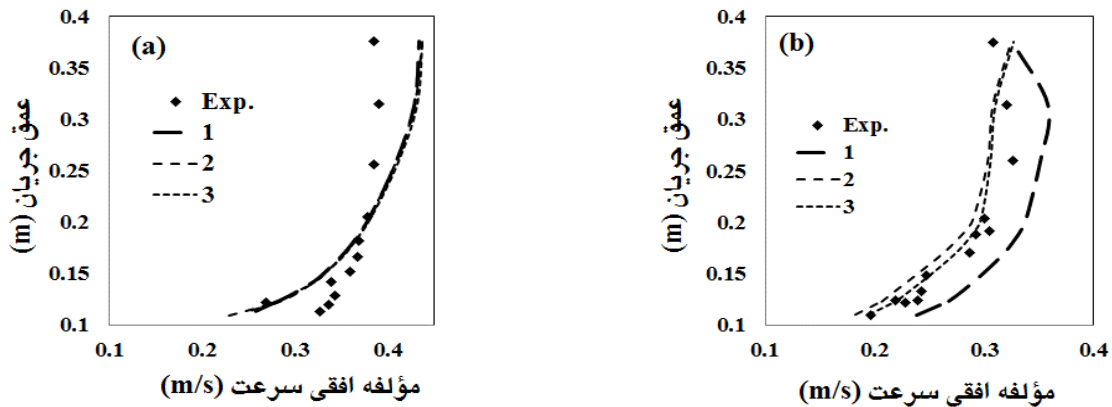
شماره شبکه	اندازه سلول شبکه در بلوک‌های ۱ و ۲ (متر)	تعداد کل سلول‌ها	زمان محاسباتی	درصد خطا
۱	۰/۰۲۵ و ۰/۱۲۵	۳۸۸۱۰۰	۲ ساعت و ۲۱ دقیقه	۱۳/۶
۲	۰/۰۲۱ و ۰/۱۰۵	۶۸۸۴۸۲	۴ ساعت	۶/۹
۳	۰/۰۱۸۵ و ۰/۰۹۲۵	۹۲۷۹۷۶	۷ ساعت و ۳۳ دقیقه	۳/۶

حدود ۳ درصد بهبود داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نتایج مدل عددی تحت تأثیر اندازه سلول شبکه‌بندی ۲ و ۳ قرار

نرخ کاهش خطای شبکه‌های محاسباتی بین شبکه ۱ با ۲ بیش‌تر از شبکه ۲ با ۳ است و با تغییر شبکه از ۲ به ۳، خطاها

متری بالادست لبه سرشمع قرار گرفته است. مطابق شکل ۷ به‌طور کلی روند نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی یکی است. در فاصله‌های ۰/۵ متری و ۱ متری بالادست سرشمع، پروفیل‌های سرعت طولی در مدل عددی و آزمایشگاهی انطباق بسیار خوبی دارند. در مقطع $x/Dc = -0/86$ یعنی در فاصله ۵ سانتی‌متری بالادست سرشمع نیز انطباق بسیار خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. در این مقطع در مدل آزمایشگاهی فقط در ترازهای بالاتر از سرشمع مؤلفه سرعت برداشت شده بود. لذا امکان مقایسه پروفیل سرعت از تراز سرشمع تا نزدیکی بستر وجود نداشت و فقط نتایج مدل عددی نشان داده شده است.

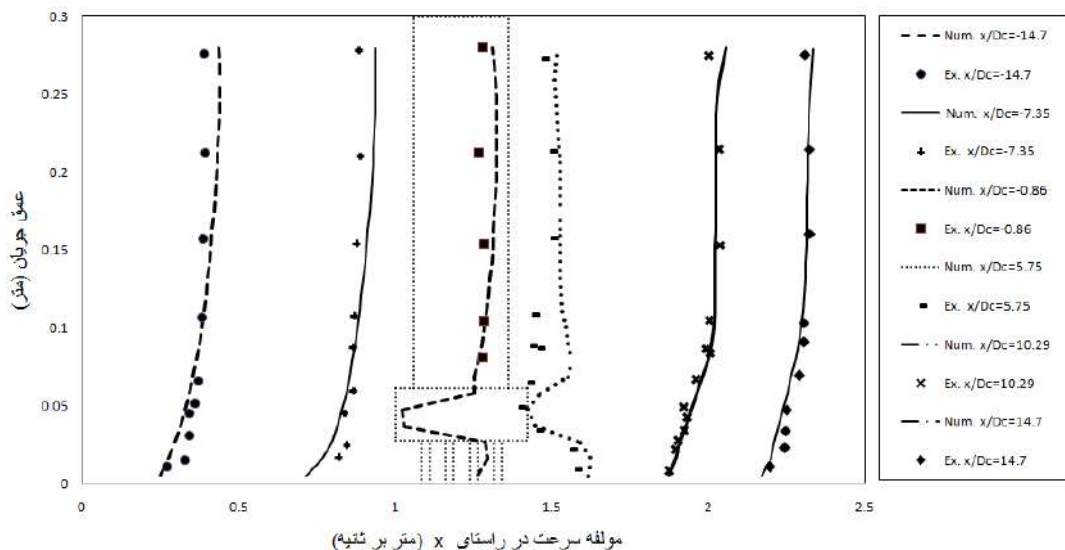
نمی‌گیرد. از طرفی زمان اجرای شبیه‌سازی در شبکه ۳ حدود ۸۷ درصد نسبت به زمان شبیه‌سازی شبکه ۲ بیش‌تر شده است. لذا در این پژوهش برای شبیه‌سازی‌های بعدی، شبکه‌بندی ۲ در نظر گرفته شد. به‌منظور صحت‌سنجی نتایج مدل عددی، پروفیل‌های سرعت طولی مدل عددی برای مقاطع بالادست و پایین‌دست پایه‌های مرکب در خط مرکزی کانال با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه و در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل موقعیت پایه‌ها، سرشمع و ستون نیز نشان داده شده است. پروفیل‌ها در x/Dc ‌های متفاوت ترسیم شده است. Dc : عرض ستون و معادل $6/8$ سانتی‌متر است. لذا $x/Dc = -14/7$ یعنی مقطعی که به فاصله یک



شکل ۶- بررسی نتایج مستقل از شبکه: (a) ۱ متری بالادست پایه‌ها؛ و (b) ۱ متری پایین‌دست پایه‌ها

مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی در مقاطع شکل ۷ به‌ترتیب از چپ به راست برابر $0/26$ ، $0/25$ ، $0/38$ ، $0/115$ و $0/115$ است. با توجه به دقت قابل قبول مدل عددی در پیش‌بینی سرعت طولی، نتایج مدل عددی در پیش‌بینی مکانیزم جریان اطراف پایه‌های پل با تغییر زاویه برخورد جریان با پایه‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

در پایین‌دست پایه‌ها نیز مدل عددی با دقت بسیار خوبی پروفیل سرعت طولی را پیش‌بینی نموده است. تنها مقطعی که پروفیل‌های سرعت عددی و آزمایشگاهی کمی اختلاف دارند، در لبه پایین‌دست ستون و در نزدیکی سرشمع است که می‌تواند به‌خاطر وجود جریان‌های گردابی در دنباله ستون و استفاده از مدل‌های آشفتگی دومعادله‌ای در شبیه‌سازی عددی باشد. بررسی کمی خطا با روش میانگین جذر مربعات نشان داد متوسط خطای



شکل ۷- مقایسه پروفیل سرعت طولی در مقاطع مختلف در مدل عددی و آزمایشگاهی (بهشتی و عطائی آشتیانی، ۱۳۸۹)

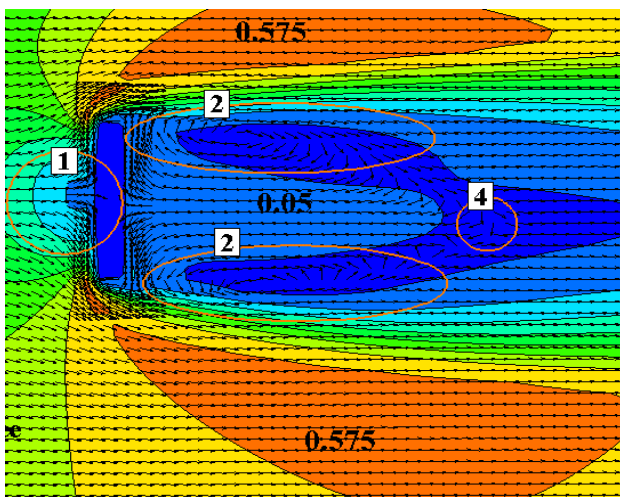
۳- نتایج و بحث‌ها

۳-۱- بررسی مکانیزم جریان با تغییر زاویه

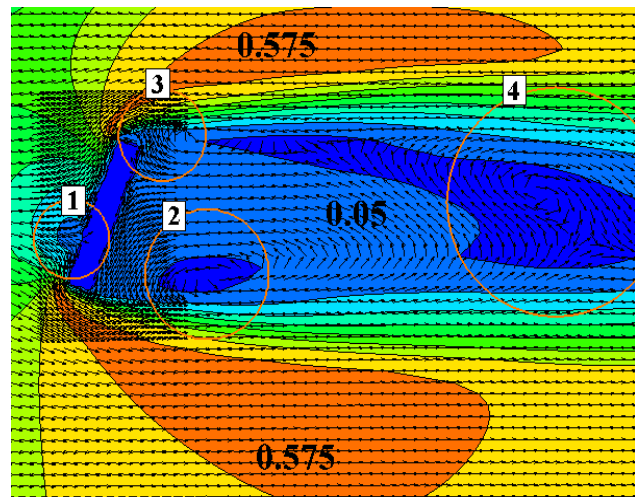
به‌منظور بررسی مکانیزم جریان، ابتدا بردارها و کانتورهای سرعت در ترازهای مختلف با تغییر زاویه مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۸ بردارها و کانتورهای سرعت در نزدیک سطح آزاد (به‌فاصله ۹۰ درصد عمق جریان از بستر) و در شکل ۹ بردارها و کانتورهای سرعت در زیر سرشمع (به فاصله ۱۰ درصد عمق جریان از بستر) نشان داده شده است. مطابق شکل ۸-۸ در زاویه ۹۰ درجه، با برخورد جریان به ستون که مانند مانعی در مقابل جریان است، و انحراف متقارن جریان به دو طرف چپ و راست، ناحیه زینی در وسط طول ستون تشکیل می‌شود (این ناحیه با شماره ۱ در شکل نشان داده شده است). این ناحیه همان ناحیه سکون^۴ است که در آن با برخورد جریان به ستون و توقف جریان، سرعت تبدیل به فشار شده و ناحیه با سرعت کمینه را شکل می‌دهد. جریان منحرف شده به سمت چپ و راست به پشت ستون کشیده می‌شود و ناحیه گردابی را در هر دو

سمت چپ و راست به‌صورت متقارن به‌وجود می‌آورد. این ناحیه با شماره ۲ در شکل نشان داده شده است. در مرز دو ناحیه شماره ۲ و جریان پایین‌دست نیز ناحیه زینی دیگری شکل گرفته است که با شماره ۴ در شکل قابل مشاهده است.

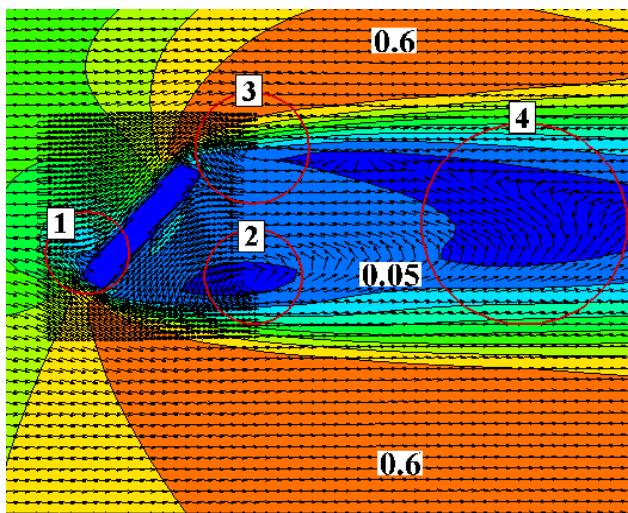
به‌ازای زوایای ۷۰، ۵۰ و ۳۰ درجه، برای جریان برخوردکننده به ستون، چهار ناحیه در اطراف ستون قابل تفکیک است. مانند زاویه ۹۰ درجه، ناحیه ۱ در محل برخورد جریان با ستون است و پس از آن جریان به دو طرف راست و چپ منحرف می‌شود. ناحیه دوم که از گوشه سمت راست ستون شروع شده، همان جریان منحرف شده از ناحیه ۱ به سمت راست است که به سمت پشت ستون کشیده می‌شود و جریان گردابی را به‌وجود می‌آورد. این جریان با برخورد به پشت ستون به سمت چپ هدایت می‌شود و با جریان منحرف شده به سمت چپ ناحیه ۱ تلاقی می‌کند و مجدداً یک جریان گردابی به‌وجود می‌آید، در قسمت‌های مختلف شکل ۸ به نام ناحیه شماره ۳ نشان داده شده است.



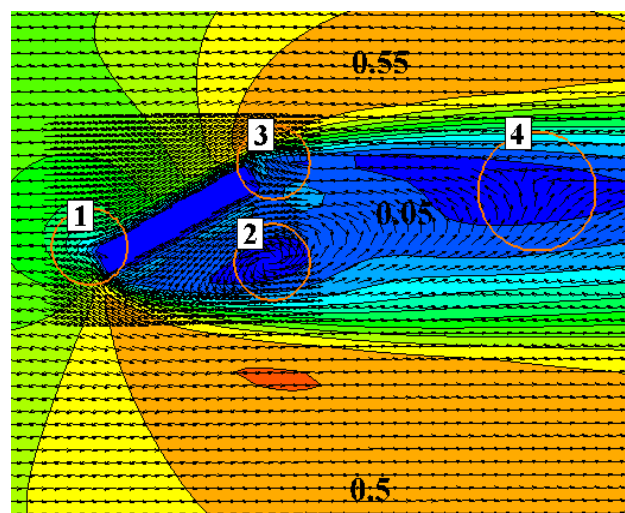
a) 90°



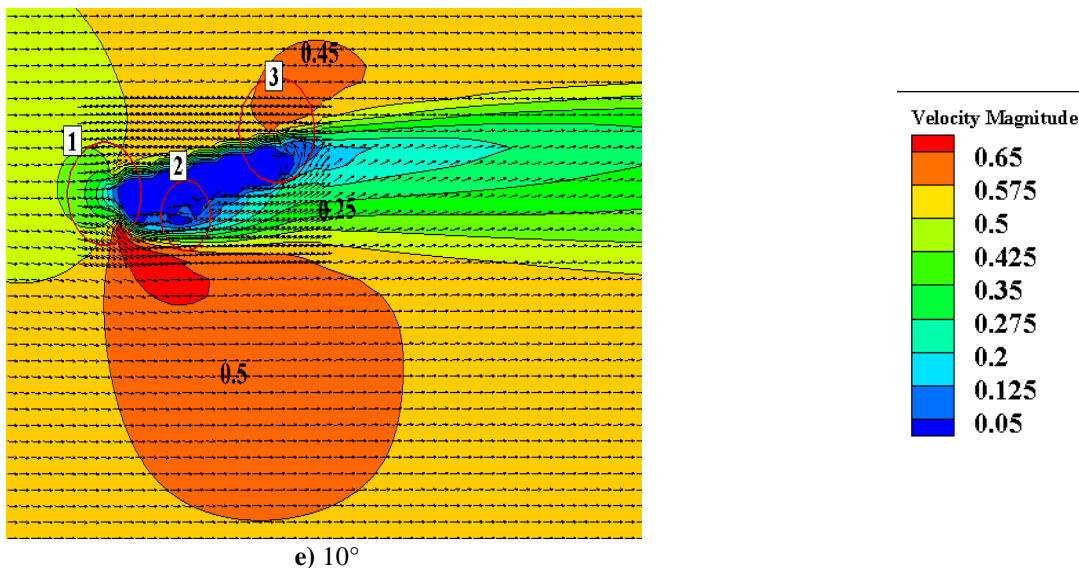
b) 70°



c) 50°



d) 30°

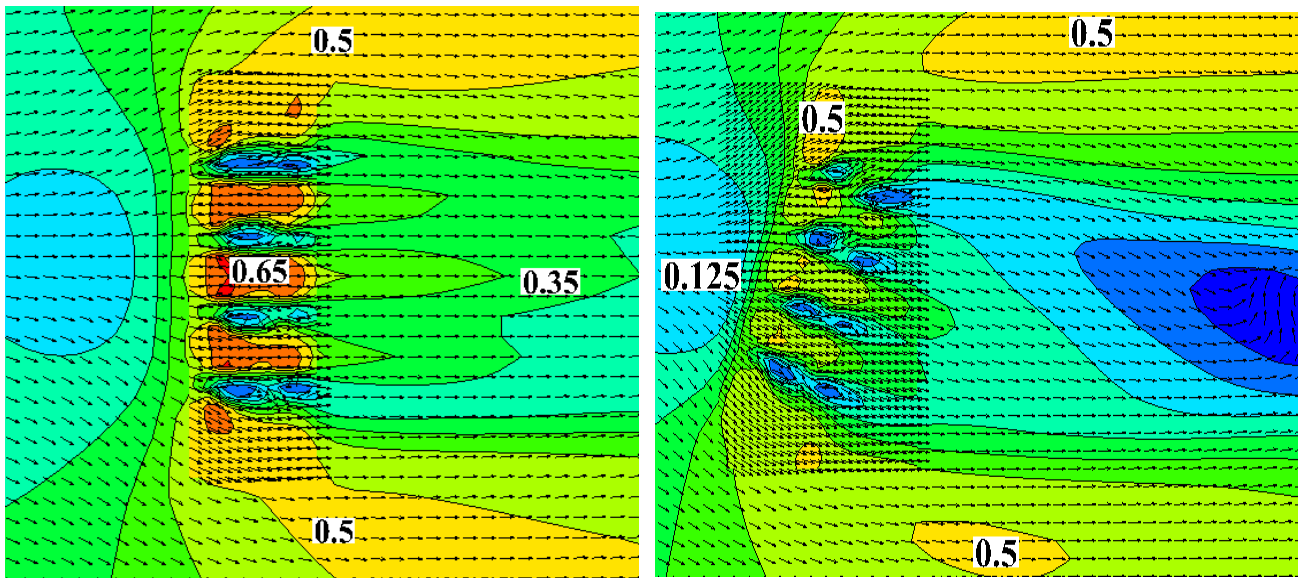


شکل ۸- بردارها و کانتورهای سرعت در نزدیک سطح آزاد

آبرفتی بیش‌ترین آب‌شستگی بین پایه‌های پل با زاویه ۹۰ درجه رخ دهد. از زاویه ۷۰ تا ۱۰ درجه در پایین‌دست پایه‌ها، ناحیه کم‌سرعت جریان مشاهده می‌شود که محل آن با کاهش زاویه، به پایه‌ها نزدیک‌تر شده است. در زاویه ۹۰ درجه این ناحیه کم‌سرعت دیده نمی‌شود. این قسمت می‌تواند در حالت بستر آبرفتی محل تجمع رسوب باشد.

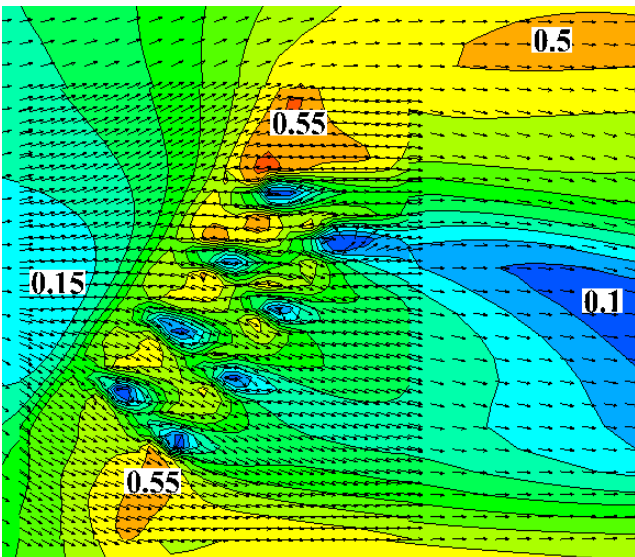
به‌منظور مقایسه کمی مقدار سرعت برآیند جریان برخوردی به هر پایه، در شکل ۱۰ تغییرات سرعت جریان برخورد کننده به هر پایه در زوایای مختلف نشان داده شده است. پایه‌های ردیف اول به ترتیب از سمت راست با شماره ۱ الی ۴ و پایه‌های ردیف دوم با شماره‌های ۵ الی ۸ نام‌گذاری شده‌اند. شکل ۱۰ نشان می‌دهد در زاویه ۹۰ درجه، بیش‌ترین سرعت جریان در نزدیکی پایه‌های ۲ و ۳ رخ داده است؛ در پایه ۱ و ۴ سرعت جریان یکسان است. کم‌ترین مقدار سرعت جریان برخوردی مربوط به پایه ۸ در زاویه ۹۰ درجه است. به ازای زوایای ۱۰ تا ۷۰ درجه، سرعت جریان در پایه‌های ۱ و ۲ کم است و با پیشروی جریان به سمت پایه‌های ۳ و ۴، سرعت افزایش یافته است، اما از پایه ۴ به ۵ یعنی از ردیف اول به ردیف دوم، کاهش محسوس سرعت جریان نزدیک به پایه‌ها دیده می‌شود. در زوایای ۱۰ تا ۷۰ درجه، بیش‌ترین مقدار سرعت جریان مربوط به پایه شماره ۴ است. به‌طور کلی، همواره سرعت جریان در ردیف دوم پایه‌ها کم‌تر از ردیف اول است که نشان‌دهنده پدیده حفاظتی^۵ پایه‌های ردیف اول روی ردیف دوم است. در مطالعات Nazariha (1996) نشان داده شد برای پایه‌های در راستای جریان، پایه‌های آخری توسط پایه‌های بالادست حمایت می‌شوند که منجر به کاهش سرعت جریان برخوردی به آن‌ها و کاهش عمق آب‌شستگی پیرامون پایه‌های پایین‌دست می‌شود.

در پایین‌دست ستون نیز مجدداً در مرز ناحیه ۲ و جریان پایین‌دست، ناحیه زینی شکل گرفته که با شماره ۴ نشان داده شده است. با کاهش زاویه از ۹۰ به ۱۰ درجه با توجه به تغییر محل برخورد جریان به ستون، محل ناحیه ۱ از وسط طول ستون به سمت راست ستون جابه‌جا شده است و به تبع آن ناحیه ۲ دارای سرعت کم‌تر و گردابه کوچک‌تری است که محدوده تحت‌تأثیر آن نیز محدودتر شده است. به‌طوری‌که در زاویه ۱۰ درجه ناحیه ۲ بسیار محدود است، اما در زاویه ۹۰ درجه محدوده وسیعی را در دو طرف ستون و به‌طور متقارن دربر گرفته است. به‌علت تقارن ناحیه ۲ در زاویه ۹۰ درجه، ناحیه ۳ وجود ندارد. هم‌چنین در زاویه ۱۰ درجه به‌دلیل محدود بودن ناحیه ۲، ناحیه ۴ دیده نمی‌شود. بررسی کانتور سرعت نشان می‌دهد، برخورد جریان به ستون و انحراف آن به طرفین، منجر به تشکیل ناحیه سکون با سرعت بسیار کم در محل برخورد جریان با ستون و ناحیه با سرعت زیاد در دو طرف ستون شده است. در پشت ستون که مانند مانعی در برابر جریان است ناحیه کم‌سرعت گسترده‌ای به‌وجود می‌آید که تا پایین‌دست کشیده شده است. با کاهش زاویه گسترده‌گی، ناحیه کم‌سرعت کاهش یافته و اختلاف سرعت بین ناحیه کم‌سرعت پشت ستون و ناحیه پرسرعت طرفین کم‌تر شده است. در شکل ۹ بررسی کانتورها و بردارهای سرعت در تراز زیر سرشمع نشان می‌دهد نواحی اشاره شده برای جریان برخوردکننده به ستون دیده نمی‌شود و فقط پایه‌ها مانند مانعی در برابر جریان هستند. جریان از لابلای پایه‌ها عبور می‌کند و تغییر زاویه پایه‌ها منجر به تغییر جهت جریان برخورد کننده به پایه‌ها شده است. بیش‌ترین سرعت جریان بین پایه‌های با زاویه ۹۰ درجه وجود دارد و با کاهش زاویه و تغییر مسیر جریان، سرعت جریان بین پایه‌ها کم شده است. لذا انتظار می‌رود در بستر

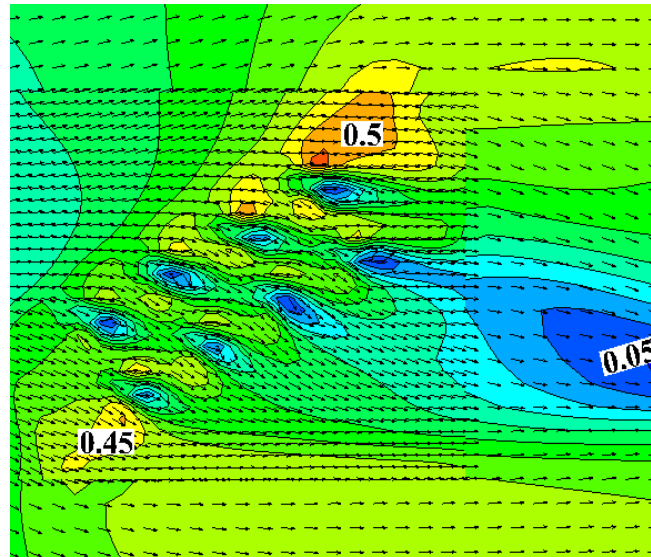


a) 90°

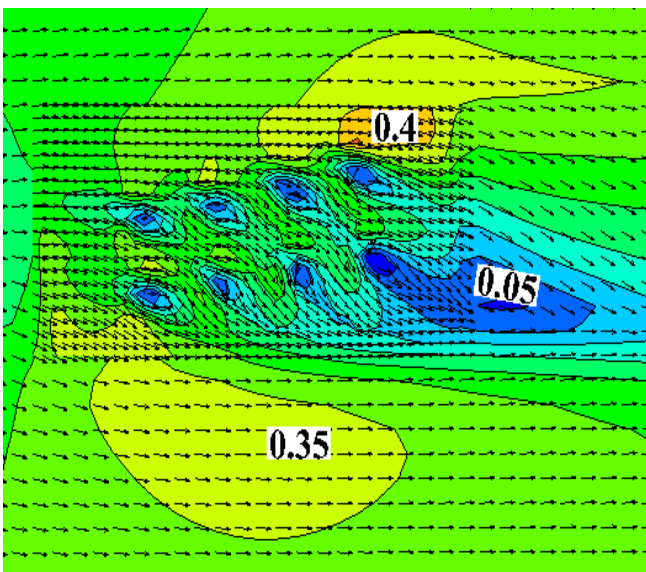
b) 70°



c) 50°

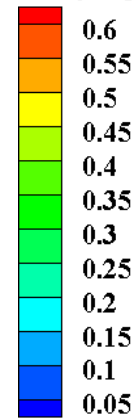


d) 30°

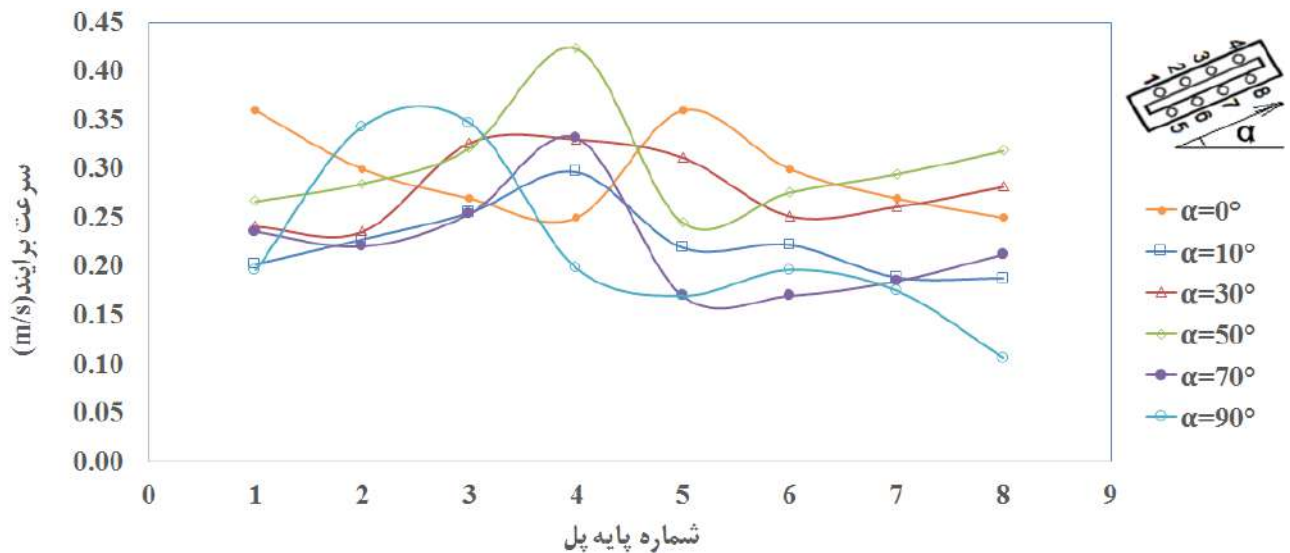


e) 10°

Velocity Magnitude



شکل ۹- بردارها و کانتورهای سرعت در زیر سرشمع

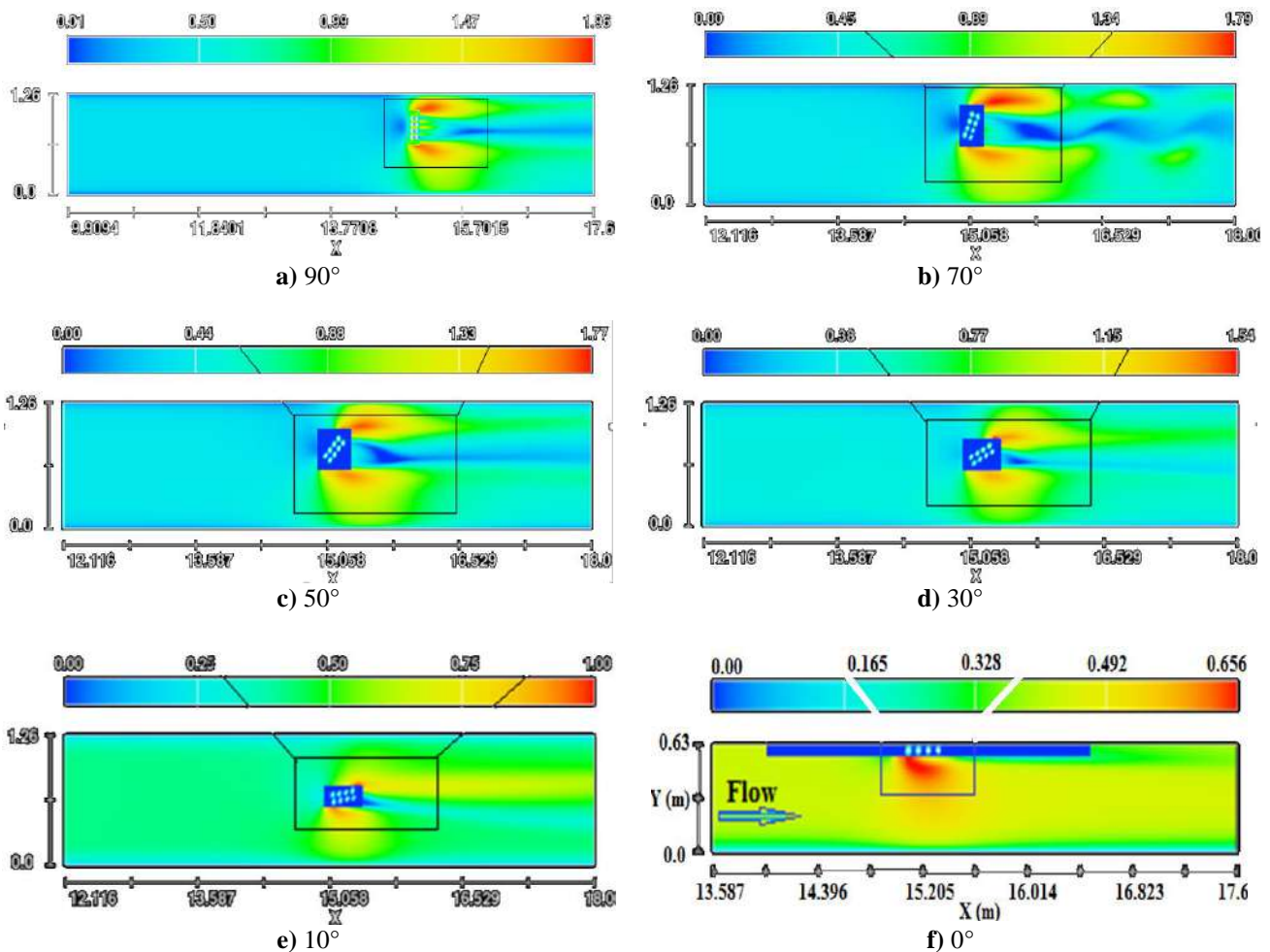


شکل ۱۰- تغییرات سرعت جریان نزدیک پایه‌ها

بستر، در شکل ۱۱ کانتورهای تنش برشی بستر نشان داده شده است.

۲-۳- بررسی تنش برشی کف

به منظور بررسی اثر زاویه برخورد جریان با پایه‌ها بر تنش برشی



شکل ۱۱- کانتور تنش برشی بستر در زوایای متفاوت برخورد جریان به گروه پایه‌ها

در حالتی که بستر آبرفتی باشد، بیشترین آبشستگی در اطراف سرشمع رخ دهد و کناره‌های هر پایه کم‌تر از اطراف سرشمع دچار

به‌ازای زوایای مختلف، تنش برشی بستر در دو طرف سرشمع، بیش‌تر از تنش برشی بستر حول پایه‌ها است؛ لذا انتظار می‌رود

در شکل ۱۳ تغییرات تنش برشی بستر اطراف هر پایه با تغییر زاویه برخورد جریان به پایه‌های مرکب نشان داده شده است. بیش‌ترین تنش برشی بستر حول پایه‌های پل با زاویه برخورد ۹۰ درجه و کم‌ترین آن به‌ازای زاویه ۱۰ درجه رخ داده است. پایه‌های شماره ۲، ۳ و ۴ در معرض بیش‌ترین تنش برشی بستر در زوایای مختلف هستند. جریان برخورد کننده به این پایه‌ها دارای سرعت بیش‌تری نسبت به پایه‌های ردیف بعدی است؛ لذا به‌ازای همه زوایه‌ها، پایه‌های ردیف دوم (پایه‌های شماره ۵ الی ۸) تنش برشی بستر کم‌تری نسبت به پایه‌های ردیف اول (پایه‌های شماره ۱ الی ۴) دارند. علت این مسئله همان پدیده حفاظتی پایه‌های بالادست روی پایه‌های پایین‌دست است که مانع برخورد جریان پرسرعت به پایه‌های پایین‌دست شده و تنش اطراف آن‌ها را کاهش می‌دهد. با افزایش زاویه برخورد جریان به پایه‌ها، اختلاف تنش برشی بستر ردیف اول با ردیف دوم، بیش‌تر شده است. بررسی کاهش تنش برشی بستر متوسط ردیف دوم نسبت به ردیف اول به‌ازای زوایای مختلف از ۱۰ تا ۹۰ درجه نشان داد به‌ازای زوایای ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درجه، نسبت تنش برشی بستر متوسط حول پایه‌های ردیف دوم به‌ترتیب ۴۵، ۵۵، ۵۷، ۵۸/۳ و ۵۸ درصد تنش برشی بستر متوسط حول پایه‌های ردیف اول است. به‌طورکلی چون تنش برشی بستر به ازای زاویه ۱۰ درجه کم‌تر از زوایای دیگر است، می‌توان نتیجه گرفت برای نصب پایه پل زاویه‌دار با جهت جریان، پایه‌های با زوایای کم‌تر با مسیر جریان در معرض تنش برشی بستر کم‌تری هستند و انتظار می‌رود در شرایط بستر آبرفتی، دچار آب‌شستگی کم‌تری شوند.

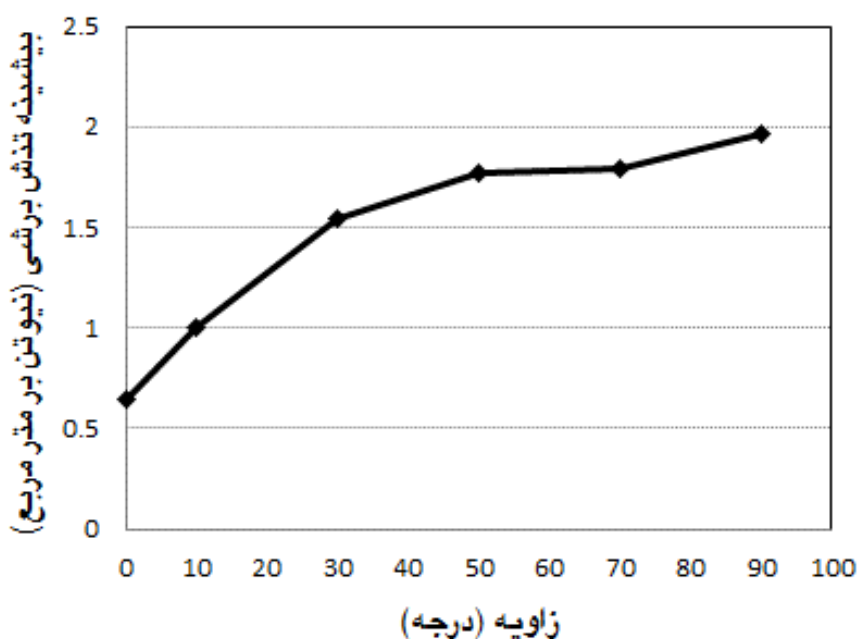
آب‌شستگی شود. علت بیش‌تر بودن تنش در اطراف سرشمع نسبت به پایه‌ها مانع بودن ستون و سرشمع در مقابل جریان و انحراف کامل جریان به طرفین است؛ درحالی‌که پایه‌ها ممانعت کم‌تری نسبت به سرشمع و ستون برای جریان ایجاد می‌کنند و سرعت اطراف آن‌ها کم‌تر از اطراف سرشمع است.

ناحیه با تنش برشی بستر بسیار کم در پایین‌دست پایه‌ها وجود دارد و با افزایش زاویه برخورد جریان با پایه‌ها، محل آن از پایه‌ها دورتر شده است و به پایین‌دست انتقال یافته است. علت دور شدن این ناحیه با افزایش زاویه، آن است که در زاویه‌های بیش‌تر، زاویه انحراف جریان نیز بیش‌تر خواهد بود و اتصال مجدد جریان دو طرف پایه‌ها در پایین‌دست در فاصله دورتری از پایه‌ها رخ می‌دهد. لذا انتظار می‌رود در حالتی که بستر آبرفتی باشد، آب‌شستگی پس از گروه پایه‌ها رخ ندهد و حتی این ناحیه کم سرعت و کم تنش، ناحیه‌ای برای تجمع رسوبات ایجاد شده باشد. به‌منظور مقایسه کمی مقدار تنش برشی بستر در کانال در حالت‌های مختلف زاویه گروه پایه‌ها، در شکل ۱۲ بیشینه تنش برشی بستر در کانال ترسیم شده است که با توجه به آن می‌توان نوشت:

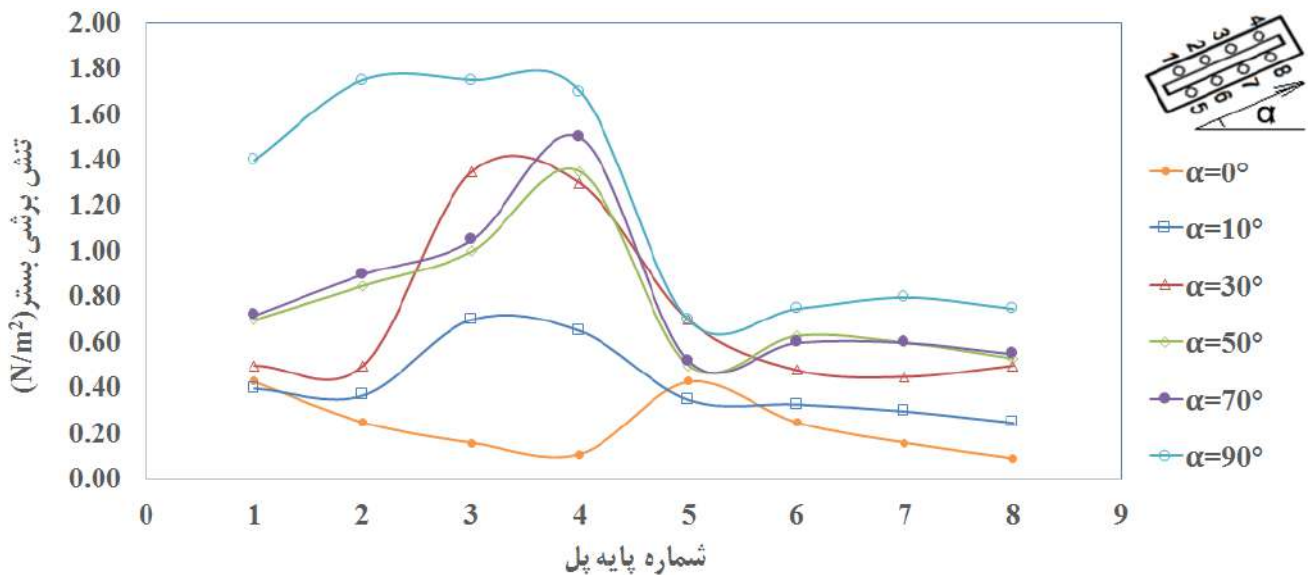
الف) با افزایش زاویه نصب گروه پایه‌ها، تنش برشی بستر نیز افزایش یافته است؛ به‌طوری‌که از زاویه ۱۰ تا ۹۰ درجه به‌ترتیب ۶۵، ۱۳۵، ۱۷۰، ۱۷۳ و ۲۰۲ درصد تنش برشی بستر نسبت به زاویه صفر درجه افزایش نشان داده است.

ب) از زاویه صفر درجه تا زاویه ۵۰ درجه، تغییرات بیشینه تنش برشی بستر بسیار زیاد و نمودار با شیب تند صعودی است.

ج) بیشینه تنش برشی بستر در زوایای ۵۰ و ۷۰ درجه بسیار به هم نزدیک است.



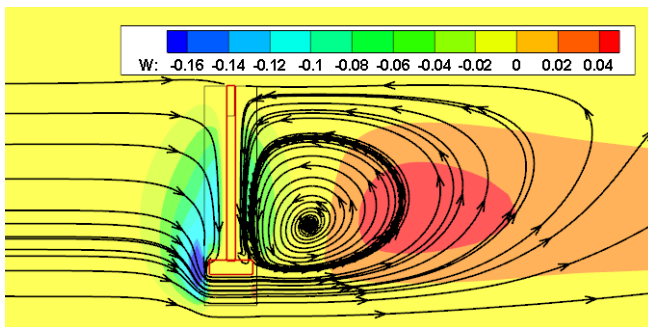
شکل ۱۲- تغییرات بیشینه تنش برشی بستر در کل کانال



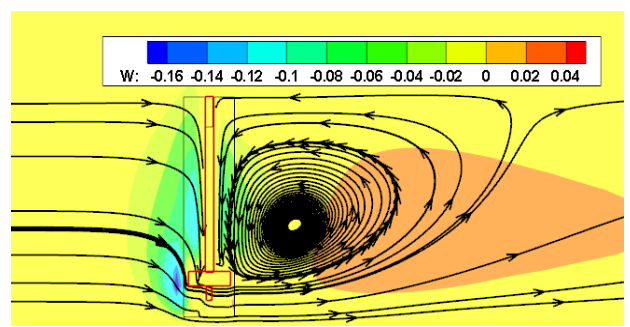
شکل ۱۳- تنش برشی بستر اطراف هر پایه با تغییر زاویه برخورد جریان به پایه های مرکب

و مؤلفه عمودی سرعت مثبت است. این جریان منحرف شده به سمت سطح تحت تأثیر مکش پس از ستون قرار گرفته و منجر به تولید جریان گردابی حول محور عرضی در پایین دست ستون شده است. مطابق شکل ۱۴ بیشترین مقدار منفی مؤلفه عمودی سرعت مربوط به جریان پایین رونده زیر سرشمع است که در حالت بستر آبرفتی، می‌تواند منجر به آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل شود.

۳-۲-۱- بررسی میدان جریان اطراف پایه‌ها به ازای زاویه ۹۰ درجه به منظور بررسی بیش‌تر میدان جریان، در شکل ۱۴ در مقاطع طولی بین دو پایه مجاور (شکل ۱۴-الف) و در محل هر پایه (شکل ۱۴-ب) خطوط جریان و کانتورهای مؤلفه عمودی سرعت به‌ازای بیش‌ترین زاویه پایه (۹۰ درجه) نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۴، در تراز بالای سرشمع، جریان با برخورد به ستون به سمت سرشمع و بستر منحرف می‌شود و لذا مؤلفه عمودی سرعت مقدار منفی دارد. پس از پایه‌ها، جریان به سمت سطح منحرف می‌شود



ب) در مقطع عرضی گذرنده از درون هر پایه



الف) در مقطع عرضی گذرنده از حد فاصل بین پایه‌ها

شکل ۱۴- تغییرات مؤلفه عمودی سرعت در برخورد جریان به پایه‌ها با زاویه ۹۰ درجه

- در نزدیکی سطح آزاد با برخورد جریان به ستون، چهار ناحیه در اطراف ستون قابل‌تفکیک است. ناحیه ۱ در محل برخورد جریان با ستون است. ناحیه دوم و سوم به‌ترتیب در گوشه سمت راست و چپ ستون هستند که دارای جریان گردابی هستند. در پایین دست ستون نیز در مرز ناحیه ۲ و جریان پایین دست، ناحیه زینی به نام ناحیه ۴ شکل گرفته است
- بررسی سرعت جریان در نزدیکی پایه‌ها نشان داد سرعت جریان بین پایه‌های با زاویه ۹۰ درجه بیش‌تر از زوایای دیگر است. بیش‌ترین

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر الگوی جریان اطراف پایه‌های پل مرکب با زوایای مختلف نسبت به جهت جریان با استفاده از مدل عددی Flow3D بررسی شد. پس از صحت‌سنجی نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی، الگوی جریان و تنش برشی بستر اطراف پایه‌های پل مرکب با ۵ زاویه مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد:

مرکب"، دانش آب و خاک، ۲۶ (۲)، ۱-۱۲.

بهروزی، ز، حمیدی‌فر، ح، و زمردیان، م.ع.، (۱۴۰۰)، "شبیه‌سازی عددی سرعت جریان در اطراف پایه‌های پل تکی و دو قلو با چیدمان‌های مختلف با استفاده از مدل فلوئنت"، نشریه مهندسی عمران/امیرکبیر، ۵۳(۹)، ۳۸۸۳-۳۸۹۶ <https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18136.6777>.

خالدی، و.، امینی، ع.، و بهرامی، ج.، (۱۳۹۹)، "اثر شکل سرشمع در ابعاد حفره آب‌شستگی در پایه پل‌ها با هندسه مرکب"، پژوهش آب/ایران، ۱۴(۲)، ۱۰۱-۱۰۹.

محمدپور، ر.، تقی شاهبازی، ع.، سبزواری، ت.، و کرمی مقدم، م.، (۱۳۹۹)، "بررسی تغییرات زمانی آب‌شستگی در اطراف پایه‌های مرکب مستطیلی"، تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۲۱(۸۱)، ۲۵-۴۶. <https://doi.org/10.22092/idser.2021.341672.1424>.

Abadi, M.R., and Mohsenabadi, S.K., (2022), "Numerical study of the weir angle on the flow pattern and scour around the submerged weirs", *International Journal of Modern Physics C*, 33(08), 2250110. <https://doi.org/10.1142/S0129183122501108>.

Amini, A., Melville, B.W., Ali, T M., and Ghazli, A.H., (2012), "Clear-water local scour around pile groups in shallow-water flow", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 138(2), 177-185, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000488](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000488).

Ata Amini, S., Mohammad, T.A., Aziz, A.A., Ghazali, A.H., and Huat, B.B., (2011), "A local scour prediction method for pile caps in complex piers", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 164(2), 73-80, Thomas Telford Ltd, <https://doi.org/10.1680/wama.900064>.

Beheshti, A.A., and Ataie-Ashtiani, B., (2010), "Experimental study of three-dimensional flow field around a complex bridge pier", *Journal of Engineering Mechanics*, 136(2), 143-154, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000073](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000073).

Ettema, R., Constantinescu, G., and Melville, B.W., (2017), "Flow-field complexity and design estimation of pier-scour depth: Sixty years since Laursen and Toch", *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(9), 03117006, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001330](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001330).

Ferraro, D., Tafarajnoruz, A., Gaudio, R., and Cardoso, A.H., (2013), "Effects of pile cap thickness on maximum scour depth at a complex pier", *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(5), 482-491. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000704](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000704).

Flow Science Inc., (2016), *FLOW-3D V 11.2 user's manual*, Santa Fe, New Mexico.

Ghods, H., Najafzadeh, M., Khanjani, M.J., and Beheshti, A., (2021), "Effects of different geometric

تنش برشی بستر حول پایه‌های پل به‌ازای زاویه برخورد ۹۰ درجه و کم‌ترین آن به‌ازای زاویه برخورد ۱۰ درجه رخ داده است.

- بررسی تغییرات سرعت جریان و تنش برشی بستر در نزدیکی هر پایه در زوایای مختلف نشان داد به‌علت پدیده حفاظتی پایه‌های ردیف اول روی ردیف دوم، همواره سرعت جریان و تنش برشی بستر در ردیف دوم پایه‌ها کم‌تر از ردیف اول است.

- به‌ازای زوایای مختلف، بیشینه تنش برشی بستر در دو طرف سرشمع بیش‌تر از تنش برشی بستر حول پایه‌ها است؛ لذا انتظار می‌رود در شرایط آبرفتی، کناره‌های هر پایه کم‌تر از اطراف سرشمع دچار آب‌شستگی شود و پایداری گروه پایه‌ها بهتر حفظ شود. هم‌چنین ناحیه با تنش برشی بستر بسیار کم در پایین دست پایه‌ها وجود دارد که در شرایط بستر آبرفتی می‌تواند محلی برای تجمع رسوب باشد.

- همواره مقدار بیشینه تنش برشی بستر اطراف پایه‌ها از بیشینه تنش برشی بستر در کل کانال کم‌تر است. این پدیده نشان می‌دهد با وجود سرشمع برای گروه پایه‌ها، بیشینه تنش برشی بستر اطراف پایه‌ها نسبت به تنش برشی بستر در کانال کم‌تر شده است؛ لذا انتظار می‌رود در حالت بستر آبرفتی آب‌شستگی اطراف پایه‌ها کم‌تر از آب‌شستگی کل کانال باشد که منجر به پایداری گروه پایه‌های پل می‌شود. به‌منظور تأیید یا رد این نتیجه، لازم است الگوی جریان اطراف گروه پایه‌ها بدون سرشمع شبیه‌سازی شود؛ لذا این امر می‌تواند به عنوان پیشنهادی برای ادامه کار مطرح شود.

۵- قدردانی

مقاله حاضر بخشی از طرح پژوهشی است که با حمایت مالی دانشگاه خوارزمی انجام شده است. بدین وسیله نویسندگان مراتب سپاسگزاری خود را از دانشگاه خوارزمی اعلام می‌دارند.

۶- پی‌نوشت

- 1- Complex Bridge Pier
- 2- Large Eddy Simulation
- 3- Nested
- 4- Stagnation Point
- 5- Sheltering

۷- مراجع

اسدی پرتو، ا.، امینی، ع.، اقبال‌زاده، ا.، و جوان، م.، (۱۳۹۵)، "مدل‌سازی عددی میدان جریان اطراف پایه پل با هندسه

- parameters of complex bridge piers on maximum scour depth: Experimental study”, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 147(5), 04021021, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000645](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000645).
- Nazariha, M., (1996), “Design relationships for maximum local scour depth for bridge pier groups”, Ph.D. Dissertation, University of Ottawa, Canada.
- Omara, H., and Tawfik, A., (2018), “Numerical study of local scour around bridge piers”, In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, (151(1), 012013), IOP Publishing, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/151/1/0>.
- Pourghasemzadeh, B., and Ghomeshi, M., (2022), “Experimental investigation of the angle effect of the cylindrical bridge group piers relative to the flow direction on the maximum scour depth of the piers”, *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(3), 131-145, <https://doi.org/10.22055/jise.2017.19147.1379>.
- Sheppard D.M., and Renna R., (2005), “Bridge scour manual”, Florida Department of Transportation, Tallahassee, Florida.
- Sheppard, D.M., Yang, Y., and Melville, B., (2023), “Method for estimating clear-water local scour rate at complex piers”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 149(10), 04023039, <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-13656>.
- Sicilian, J.M., Hirt C.W., and Harper R.P., (1987), “FLOW-3D: Computational modeling power for scientists and engineers”, Report FSI-87-00-1, Flow Science. Los Alamos. NM, US.
- Yang, Y., Melville, B.W., Sheppard, D.M., and Shamseldin, A.Y., (2018), “Clear-water local scour at skewed complex bridge piers”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(6), 04018019, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001458](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001458).
- Yang, Y., Melville, B.W., Macky, G.H., and Shamseldin, A.Y., (2020), “Temporal evolution of clear-water local scour at aligned and skewed complex bridge piers”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(4), 04020026. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001732](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001732).
- Yang, Y., Li, J., Zou, W., and Chen, B., (2023), “Numerical investigation of flow and scour around complex bridge piers in wind-wave-current conditions”, *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 23, <https://doi.org/10.3390/jmse12010023>.



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

**Mathematical Analysis of Sub-
Atmospheric Vapor Pipeline (SAVP)
Transmission for Seawater Desalination**

**تحلیل ریاضی انتقال خط لوله بخار زیراتمسفری
در نمک‌زدایی آب دریا**

Mona Shojaei^{1*} and Mohsen Nosrati²

منا شجاعی^{۱*} و محسن نصرتی^۲

1- Assistant Professor of Research, Faculty Member of Water and Wastewater Research Center, Water Research Institute, Tehran, Iran.

۱- استادیار پژوهشی، عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات آب و فاضلاب، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران.

2- Associate Professor, Biochemical Engineering Department, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

۲- دانشیار گروه مهندسی شیمی-بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*Corresponding Author, Email: m.shojaei@wri.ac.ir

*نویسنده مسئول، ایمیل: m.shojaei@wri.ac.ir

Received: 31/12/2024

Revised: 26/01/2025

Accepted: 03/03/2025

© IWVA

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

A mathematical analysis of seawater desalination via the Sub-Atmospheric Vapor Pipeline (SAVP) method has been conducted, encompassing both theoretical and practical investigations in a natural field setting. The SAVP process facilitates vapor transfer by utilizing the temperature difference between a warm source and a cold environment. Owing to its demonstrated advantages, this technology holds potential for industrial and field-scale applications. Advancements in SAVP knowledge require studying the phenomenon under dynamic conditions, where the temperatures of the heat source and sink, as well as the thermal conditions along the SAVP path, are inherently functions of time and space. This scenario introduces novel and compelling research challenges. The analysis begins with a review and simplification of the fundamental convection-diffusion equation, leading to a solution for the temperature profile within the pipe using advanced engineering mathematics. A mathematical approach involving Eigen functions is employed to solve the temperature differential equation. The output of this mathematical model was validated in a real-world natural environment, specifically along a 16 km pipeline between a hot source (the city of Ramsar) and a cold source (the Takhte Soleiman heights).

تحلیل ریاضی شیرین‌سازی آب دریا از طریق خط لوله بخار زیراتمسفری معروف به SAVP، که یکی از روش‌های شیرین‌سازی آب دریا است، به صورت تئوری و کاربردی در یک میدان طبیعی، تحلیل شده است. انتقال بخار زیراتمسفری براساس اختلاف دما بین یک منبع گرم و یک محیط سرد اتفاق می‌افتد و به علت مزایای اثبات شده‌ای که دارد، می‌تواند کاربردهایی در ابعاد صنعتی و میدانی داشته باشد. مواردی که برای توسعه دانش SAVP مدنظر است، عبارتند از مطالعه این پدیده در حالت دینامیک که در آن دمای منبع گرم و سرد و شرایط گرمایی مسیر SAVP تحت عواملی قرار می‌گیرند که ذاتاً تابعی از زمان و مکان هستند. در چنین حالتی، بحث‌های جدید و جالبی به وجود می‌آیند که ورود به آن، از مرور و ساده‌سازی معادله اساسی همرفت-نفوذ شروع شده و به حل پروفایل دما در لوله با پشتوانه ریاضیات مهندسی پیشرفته می‌انجامد. رویکردی ریاضی برای حل معادله دیفرانسیل دما به وجود می‌آید که از طریق توابع ویژه قابل حل هستند. نتایج خروجی این تحلیل ریاضی در یک میدان واقعی و طبیعی در حد فاصل ۱۶ کیلومتری یک منبع گرم (شهر رامسر) و یک منبع سرد (ارتفاعات تخت سلیمان) ارائه می‌شود.

Keywords: Sub-Atmospheric Vapor Pipeline (SAVP), Seawater Desalination, Mathematical Analysis, Eigen Functions, Temperature Difference.

کلمات کلیدی: خط لوله بخار زیراتمسفری، شیرین‌سازی آب دریا، آنالیز ریاضی، توابع ویژه، اختلاف دما.

انتقال بخار زير-اتمسفرى^۱، توسط لوله و ميعان بخار در مقصد به بهانه نمک‌زدایی آب شور دريا و تأمين آب شرب بعد از سال ۲۰۰۰ مورد توجه واقع شده است و به لحاظ تجربى و تئورى، تحقيقاتى بر روى آن انجام گرفته است (Zarzo and Prats, 2018). استفاده از پتانسيل‌هاى طبيعى، نمک‌زدایی و انتقال آب دريا در مناطق خشک و کم‌آب را به شدت جذاب و توجه‌پذير مى‌نمايد. البته نرخ محدود انتقال آب شيرين و لزوم يافتن منبع طبيعى گرم و سرد براى مطالعه و اجرا، از محدوديت‌هاى طبيعى و بارز روش انتقال بخار زير-اتمسفرى است ولى از طرف ديگر مزايای و نقاط قوت متعددى براى اين روش به لحاظ صنعتى و اقتصادى مترتب است (Del Amo and Antonio, 2012). از ديده‌گاه کاهش شديد يا حذف مصرف انرژى، مزايایى مانند: شيرين‌سازى آب دريا با حداقل انرژى از طريق حذف منبع گرمایى و ادوات مکانیکی، کاهش شديد مصرف انرژى (يا حذف آن) مربوط به انتقال آب، امکان دست‌يابی مجدد به انرژى در مقصد انتقال به وسيله توربين آبی و در آخر استفاده از مزايای کنوانسيون پاریس براى امتياز عدم توليد دی‌اکسید کربن، نمک‌زدایی به روش خط لوله بخار را نسبت به روش‌هاى ديگر بسيار متمایز و ارجح نموده است (Eggleston et al., 2006). از جمله نمک‌زداهاى با مصرف انرژى کم، مى‌توان به تحقيقاتى اشاره نمود که در آن نوآوری شامل دو ستون ده مترى است که يکى به عنوان تبخير کننده و ديگرى به عنوان ميعان کننده طراحى و نصب شده‌اند (Levine and Raton, 2005). قسمتى از آب شيرين با فشار از يک اجکتور گذشته و سپس طبق قانون برنولى در مقطع همگرای اجکتور سرعت سيال زياد شده و به تبع آن فشار کم مى‌شود. آب دريا که توسط يک گرم کننده درجه حرارتش بالا رفته، آماده تبخير شده و همراه آب شيرين از اجکتور عبور مى‌کند. مجموعه دوفازى بخار و آب شيرين سپس در يک مبادله کننده حرارتى خنک و ميعان مى‌شود. عامل اصلى اين انتقال، اختلاف دماى مبدأ و مقصد است. دما، فشار و چگالی سيال تراکم‌پذير (که همان بخار آب باشد) در طى مسير افت پيدا مى‌کند و به همين ترتيب بخارى که به منطقه سرد راه پيدا کرده است، به آرامى ميعان شده و آب شيرين توليد و انباشت مى‌شود. اين تکنیک مى‌تواند از يک کارخانه يا يک ساختمان بلند (مقياس صنعتى) گرفته تا يک بازه ميدانى چندين كيلومترى بين يک شهر ساحلى و ارتفاعات خنک اطرافش (مقياس ميدانى) مانند آنچه قبلاً براى برخى از شهرهاى خاورميانه مطالعه شد، کاربرد داشته باشد (Shojaei et al., 2020; Aghazadeh and Attarnejad, 2020). در مطالعات انجام شده با توجه به موازنه جرم بخار انتقال يافته (Inoue et al., 2024; Aghazadeh and Attarnejad, 2020) يا معادله بقاى مومنتوم (Shojaei et al., 2020; Aghazadeh and Attarnejad, 2020) برخى

افزايش رشد جمعيت، توسعه صنعت و کشاورزى، کاهش منابع آب قابل‌استحصال، آلودگى منابع آب موجود شيرين و تاثيرات محيط‌زىستى، سوء مديریت منابع آب، گرم شدن زمين و تغييرات آب و هوايى همگى عواملی هستند که اخيراً منجر به تشديد مسائل آبی شده است. با توجه به موارد مطرح شده و از آن‌جا که بيش از ۹۷ درصد آب جهان، آب دريا است، نمک‌زدایی آب‌هاى لب‌شور و آب دريا اهميت زيادى در حل بحران آب شيرين دارد؛ به گونه‌اى که در سال‌هاى اخير ظرفيت نمک‌زدایی آب در جهان افزايش چشمگيرى داشته است. در نتيجه تصفيه و شيرين‌سازى آب با استفاده از انرژى‌هاى تجديدپذير براى تأمين آب آشاميدنى از اهميت بالايى برخوردار است (پرهيزگار و پورعلى، ۱۳۹۶؛ جمالى کيخا و همکاران ۱۴۰۱؛ حداديان و همکاران ۱۳۹۹؛ سامى و همکاران ۱۳۹۸). امروزه از فناورى‌هاى نوينى به دليل پيشرفت در دانش استفاده مى‌شود که کاهش چشمگيرى در به حداقل رساندن مصرف انرژى دارند. يکى از اين روش‌هاى نوين، استفاده از سامانه انتقال بخار زيراتمسفرى (SAVP) است. سامانه انتقال بخار زيراتمسفرى، يک روش جديد براى نمک‌زدایی از آب دريا است که براساس اختلاف دما بين دو منبع طبيعى گرم و سرد عمل مى‌کند. در اين فرآيند، بخار آب توليدشده در يک تبخيرکننده، در مسير يک خط لوله به سمت منبع سرد حرکت مى‌کند. اين خط لوله به صورت عايق طراحى شده و امکان انتقال بخار با کم‌ترين اتلاف حرارتى را فراهم مى‌کند. در انتهاى مسير، بخار در يک ميعان کننده به مايع تبديل شده و آب شيرين توليد مى‌شود.

استفاده از اين سامانه به‌ويژه در مناطق ساحلى و کوهستانى با اختلاف دماى محسوس، از منظر بهره‌ورى انرژى بسيار قابل توجه است. مزايایى مانند عدم نياز به منابع انرژى فسيلى، کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، و حذف تجهيزات مکانیکی سنگين از جمله برترى‌هاى اين روش نسبت به ساير روش‌هاى نمک‌زدایی هستند. اگرچه تاکنون مطالعات مختلفى پيرامون تحليل حرارتى اين فرآيند انجام شده، اما بيش‌تر آن‌ها دماى مرزها را به صورت ثابت در نظر گرفته‌اند. اين فرض با واقعيت عملکرد سيستم در محيط طبيعى مغايرت دارد؛ زيرا دماهاى مرزى در طول شبانه‌روز و فصول تغيير مى‌کنند. در مطالعه حاضر، با بهره‌گيرى از روش تحليل رياضى برپايه توابع ويژه، رفتار دينامیکی دما در طول لوله انتقال مدل‌سازى شده است تا بتوان به درک دقيق‌ترى از پايدارى ترمودينامیکی سيستم دست يافت. اين رويکرد امکان تحليل دقيق‌تر سامانه در شرايط متغير و واقعى را فراهم مى‌سازد.

از حقایق این انتقال کشف شد. در اولی، تنها موازنه جرم بخار و آن هم از طریق معدودی از روابط تجربی مورد بررسی واقع شد و در مرجع بعدی حل معادله مومنتوم به کمک سه معادله آنتوان، پیوستگی و حالت، منجر به استخراج پروفایل دما و فشار شد. مسلماً، هنوز برای انتقال بخار زیر-اتمسفیری، نتایج کامل‌تری مورد انتظار است. اولاً: هر کدام از این دو مورد، به‌نحوی با معادلات تجربی سروکار داشته‌اند و هم‌چنان نیازمند یک پایه ریاضی یا تئوری مستقل و محکم هستند و ثانیاً: این تحقیقات با پیش‌فرض ثابت بودن دما در مبدأ و مقصد انجام شده‌اند و معلوم است که به‌لحاظ کاربردی چنین پیش‌فرضی یک برداشت ناقص از ماهیت طبیعی انتقال بخار زیر-اتمسفیری است. چه در یک مطالعه میدانی که فصول در آن مرتباً تغییر می‌کنند و چه در یک مطالعه صنعتی که دماهای مبدأ و مقصد حتی با سرعت بیش‌تری در نوسان هستند، دیگر ممکن نیست از معادلاتی که از موازنه جرم یا مومنتوم حاصل شده، استفاده کرد و انتظار نتایج درست و دقیق نیز داشت. روش حل از طریق ریاضی برای چنین صورت مسئله‌ای، شامل بررسی انتقال بخار زیر-اتمسفیری طی معادله دیفرانسیل پاره‌ای است که دمای مرزهای آن طی یک الگوی شناخته شده یا قابل‌اعمال، تغییر کند. حل چنین مسئله‌ای چالش‌های ریاضی و مهندسی خاصی را به‌همراه می‌آورد که از طریق حل‌های ساده برای معادلات دیفرانسیل پاره‌ای قابل‌دسترسی نیستند. مطالعه حاضر با استمداد از داده‌های تجربی و آزمایشگاهی که قبلاً انجام شده سعی می‌کند روش ریاضی قابل‌قبولی را برای پیدا کردن پروفایل دما در مسیر انتقال بخار در آب‌شیرین‌کن‌های SAVP در دو مقیاس صنعتی و میدانی ارائه دهد.

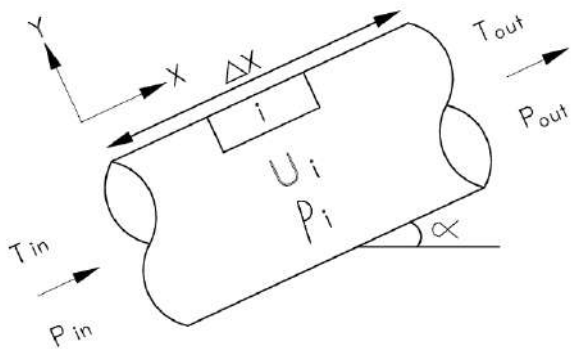
۲- روش انجام کار و مطالعه موردی

۲-۱- توصیف سامانه انتقال بخار زیر-اتمسفیری

پیش از مدل‌سازی ریاضی انتقال بخار زیر-اتمسفیری برای شیرین‌سازی آب، لازم است توصیفی از مواد و تجهیزاتی که برای این کار نیاز است، انجام شود. یک تبخیر کننده که معمولاً با انرژی گرمایی خورشید در منبع گرم کار می‌کند، موجب تولید بخار می‌شود. فقط طی یک‌بار خلاء در طول عمر چنین آب‌شیرین‌کنی، که به‌صورت مصنوعی انجام می‌شود، بخار در طول لوله صعود می‌کند و در منبع سرد میعان می‌شود. جزئیات انتقال در مقیاس میدانی و صنعتی قبلاً در مراجع آمده و پروفایل‌های دما، فشار و سرعت در سامانه صنعتی موجود است که در این مقاله برای صحت‌سنجی مدل ریاضی مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

۲-۲- مدل‌سازی پدیده انتقال مومنتوم در سامانه بخار زیر-اتمسفیری

بخار به‌عنوان سیال تراکم‌پذیر در لوله انتقال بخار زیراتمسفیری حرکت می‌کند و طی افت فشار و افت دما، به‌تدریج رقیق‌تر شده تا به میعان کننده برسد. به‌دلیل تراکم‌پذیر بودن بخار، سرعت سیال در این انتقال افزایش پیدا می‌کند. شرح کاملی از مدل‌سازی انتقال مومنتوم در (Shojaei et al. (2020) آمده است. در این مدل‌سازی، طول لوله انتقال بخار به قطعات بسیار کوچکی تقسیم شده و معادله موازنه مومنتوم همراه با برخی از معادلات تجربی مانند معادله آنتوان، معادله پیوستگی و یک معادله حالت برای گازها با یک تکنیک سعی و خطا حل شد. شکل ۱ و معادله (۱)، مربوط به محاسبات مومنتوم است. حاصل این مدل‌سازی معلوم شدن پروفایل دما، فشار و سرعت در شرایط مرزی با دماهای ثابت و متغیر بود.



شکل ۱- تصویر المانی از لوله انتقال برای محاسبات موازنه جرم و مومنتوم

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

شکل ۱ شامل عنصر یا المانی از خط لوله شیب‌دار (با زاویه ثابت α) با قطر ثابت، مصادقی از SAVP است که در آن معادله مومنتوم در حالت کلی طی معادله (۱) نوشته می‌شود. انتقال به‌طور عمومی از نقطه ۱ صورت می‌گیرد و تا نقطه ۲ ادامه پیدا می‌کند. فشار، چگالی، سرعت و دمای سیال به‌ترتیب با u ، ρ ، P و T نشان داده شده است.

۲-۳- معادله همرفت-نفوذ

در معادله (۲) منظور شود، به صورت "±" است که نشان دهنده دریافت یا از دست دادن گرما است. منظور از "سیستم" در این جا لوله انتقال بخار است. معادله (۲) را به طور ساده شده ای که منطبق بر انتقال بخار زیراتمسفیری بوده و مناسب برای اعمال حل ریاضی باشد، می توان به صورت معادله (۳) نوشت.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \frac{Q}{\rho c} \quad (3)$$

بدیهی است چنانچه لوله انتقال به صورت عایق کامل فرض شود، ترم Q (عامل حرارتی خارجی) حذف خواهد شد. در معادله (۳)، انتقال حرارت بخار که دمای آن با T نشان داده شده، هم به صورت نفوذ^۲ یا پخش حرارت (α) صورت می گیرد و هم به صورت همرفتی^۴ (با سرعت V_x)، همان طور که در مقدمه نیز اشاره شد، روش توابع ویژه در قسمت های آتی توضیح داده خواهد شد. در این روش، باید تکنیکی برای حذف سرعت V_x ، حل معادله دیفرانسیل پاره ای و سپس جایگذاری سرعت در حل نهایی، معرفی و به کار گرفته شود. خاصیت ترموفیزیکی α ، در معادله (۳) می تواند برای ساده سازی و درک بهتر مطلب (به خصوص در مقوله جداسازی متغیرها) از عبارت جعلی یا قراردادی α^2 استفاده شود.

۲-۴- روش حل از طریق توابع ویژه^۵

در مدل سازی سامانه انتقال بخار زیراتمسفیری، شرایط مرزی سامانه (دمای تبخیر کننده و میعان کننده) به صورت تابعی از زمان تغییر می کنند. این مسئله باعث می شود که نتوان از روش های کلاسیک جداسازی متغیرها که برای شرایط مرزی ثابت طراحی شده اند، استفاده نمود. بنابراین، برای تحلیل دقیق تر و واقعی تر رفتار سامانه، از "روش توابع ویژه" بهره گرفته شده است. روش توابع ویژه توسعه ای از روش جداسازی متغیرها است که قابلیت حل معادلات دیفرانسیل با شرایط مرزی غیرهمگن و وابسته به زمان را دارد. در این روش، ابتدا شرایط مرزی تابع زمان، به صورت ترکیبی از توابع پایه تحلیل می شوند و سپس حل معادله در قالب ترکیب این توابع، به شکل سری بی نهایت ارائه می شود. با این کار می توان رفتار زمانی و مکانی دما را به طور دقیق در طول لوله مدل سازی نمود.

از آن جا که در سامانه SAVP شرایط مرزی به دلیل تأثیرات شبانه روزی و فصلی در حال تغییر هستند، استفاده از این روش، نه تنها ضروری بلکه بسیار مؤثر است. مزیت اصلی این رویکرد نسبت به سایر روش ها، توانایی در نمایش دقیق تغییرات زمانی دما، پیش بینی پروفایل های حرارتی، و تحلیل پایداری سیستم در حالت دینامیکی است.

۲-۳-۱- هندسه معادله همرفت-نفوذ در SAVP

انرژی جنبشی سیال، برخی خواص فیزیکی آن (مانند چگالی)، اصطکاک، تنش های برشی و فشار استاتیک در قالب سه هندسه شناخته شده کارتزین (x, y, z) ، استوانه ای (r, θ, z) و کروی (r, θ, φ) با هم در توازن قرار می گیرند. نسبت طول به قطر لوله، بی نهایت است. بنابراین، اگرچه شکل لوله به صورت استوانه است، ولی به دلیل کم اهمیت بودن پروفایل دما در جهت شعاع r و اصالت تغییر دما در جهت x ، سیستم کارتزین برای مطالعه و مدل سازی انتخاب شده است.

۲-۳-۲- معادله همرفت-نفوذ و عملیات ریاضی در SAVP

انتقال بخار در لوله، می تواند با معادله عمومی همرفت-نفوذ بیان شود. تغییرات دما با زمان و مکان، در این معادله با تغییرات دما ناشی از تغییر سرعت سیال، نفوذ آن و اثرپذیری آن از منابع حرارتی یا برودتی خارجی بیان می شود. رابطه (۲)، معادله همرفت-نفوذ را در خط انتقال بخار نشان می دهد.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{\rho c} \quad (2)$$

که T : دمای بخار، t : زمان (دقیقه)، α : ضریب بخش حرارت در حالت انتقال حرارت نفوذی (در توده سیال)، ρ : چگالی بخار و c : ظرفیت حرارتی بخار هستند. α ، از جمله خواص فیزیکی سیال بوده و برابر کسر $k/(\rho.c)$ است که در آن k ضریب هدایت گرمایی است. α دارای واحد سطح بر زمان است (مثلاً: m^2/sec) که نشان دهنده کمیت پخش حرارتی^۲ است. برای بخار آب (به عنوان یک گاز)، عدد پخش حرارتی تابعی از دما است و بین ۲۵ تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد در بازه $1/22 \times 10^{-6}$ تا $1/32 \times 10^{-6}$ مترمربع بر ثانیه تغییر می کند. چنین تغییرات اندکی، به محققین چنین القا می کند که این خاصیت فیزیکی، به خصوص برای انتقال بخار سرد، در واقع فقط یک عدد ثابت است که از سیالی به سیال دیگر، بسته به جنس سیال متغیر خواهد بود (Datta, 2015).

سرعت حرکت سیال (V) می تواند در هر سه جهت طول (V_x)، عرض (V_y) و ارتفاع (V_z) مصداق داشته باشد. Q عامل حرارتی خارجی است که می تواند بر حسب تغییرات زمان و مکان (یا هر دو) روی حل معادله (۲) اثرگذار باشد. علامت جبری این عامل حرارتی (Q)، چنانچه به صورت گرمابخش باشد، مثبت و چنانچه از گرمای سیستم بکاهد، منفی خواهد بود. علامت اصلی که باید

$$\begin{aligned} PDE \quad U(x,t) &= W(x,t) \cdot \exp\left\{\frac{v(x-\frac{vt}{2})}{2\alpha^2}\right\}; 0 < x < L, t > 0 \\ BC_1 \quad U(0,t) &= W(0,t) \cdot \exp\left\{\frac{-V^2 t}{4\alpha^2}\right\}; t > 0 \\ BC_2 \quad W(L,t) &= W(0,t) \cdot \exp\left\{\frac{V(L-\frac{Vt}{2})}{2\alpha^2}\right\}; t > 0 \\ IC \quad U(x,0) &= W(x,0) \cdot \exp\left\{\frac{V \cdot x}{2\alpha^2}\right\}; t = 0, 0 \leq x \leq L \end{aligned} \quad (6)$$

آن‌گاه، دستگاه معادله دیفرانسیل جدیدی (دستگاه معادلات (Y)) برحسب $W(x,t)$ ، با مشخصات زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} PDE \quad \frac{\partial W}{\partial t} &= \alpha^2 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}; 0 < x < L, t > 0 \\ BC_1 \quad W(0,t) &= f_1(t) / \exp\left\{\frac{-V^2 t}{4\alpha^2}\right\} = g_1(t); t > 0 \\ BC_2 \quad W(L,t) &= f_2(t) / \exp\left\{\frac{V(L-\frac{Vt}{2})}{2\alpha^2}\right\} = g_2(t); t > 0 \\ IC \quad W(x,0) &= \frac{\Phi(x)}{\exp\left\{\frac{V \cdot x}{2\alpha^2}\right\}} = K(x); t = 0, 0 \leq x \leq L \end{aligned} \quad (7)$$

دستگاه معادله دیفرانسیل (Y)، در حالت کلی می‌تواند دربرگیرنده اثرات همرفتی در مرز پایانی نیز باشد. برای تبخیرکننده به دلیل تغییرات دمایی محدود آب دریا و همچنین شروع حرکت بخار از سرعت صفر، معمولاً عوامل همرفت تأثیر کمی در دمای بخار نو وجود دارد. درحالی‌که برای میعان‌کننده، سرعت بخار در نقطه میعان به حداکثر خود رسیده، بنابراین هر دو عامل همرفت و نفوذ در این قسمت، تأثیرگذار و قابل‌بحث هستند. عدد پکله^۶ (که نسبت پدیده انتقال همرفتی به پدیده انتقال نفوذی است)، را در دو مکان تبخیرکننده و میعان‌کننده، می‌توان به ترتیب به اعداد کوچک و بسیار بزرگ نسبت داد.

$$\begin{aligned} PDE \quad \frac{1}{\alpha^2} W_t &= W_{xx}; 0 < x < L, t > 0 \\ BC_1 \quad W(0,t) &= g_1(t); t > 0 \\ BC_2 \quad W_x(L,t) + hW(L,t) &= g_2(t); t > 0 \\ IC \quad W(x,0) &= J(x); t = 0, 0 \leq x \leq L \end{aligned} \quad (8)$$

وقتی شرایط مرزی تابع زمان باشد، آن‌گاه حل $W(x,t)$ را می‌توان مجموع دو تابع گذرا^۷ $Wtr(x,t)$ و پایا^۸ $S(x,t)$ دانست. عبارت tr و S به ترتیب بیان‌گر حل گذرا و پایا هستند. این مفهوم در معادله (۹) منعکس شده است.

$$W(x,t) = Wtr(x,t) + S(x,t) \quad (9)$$

چنان‌چه ملاحظه می‌شود، حل پایا با عبارت $S(x,t)$ نشان داده شده و تابعیت زمان (t) در آن مشهود است و این می‌تواند یک تناقض محسوب شود. جواب این مطلب این‌گونه است که به دلیل تغییرات محدود دما در ابتدا و انتهای SAVP که به ترتیب، تبخیرکننده و میعان‌کننده در آن قرار دارد در درازمدت، شرایط

روش حل از طریق توابع ویژه، به‌طورکلی یک توسعه ریاضی از روش شناخته شده جداسازی متغیرها است که برای شرایط مرزی ناهمگن، به‌کار می‌رود. شرایط مرزی ناهمگن، معمولاً به شرایطی اطلاق می‌شود که یک شرط مرزی یا هر دو، تابعی از زمان باشند. به دلیل محدود بودن SAVP به لحاظ مکانی و مشخص بودن ابتدا و انتهای آن، شرایط مرزی منطبق با شرایط دمایی تجهیزات تبخیرکننده و میعان‌کننده خواهد بود. در شرایط ناپایا، دمای این دو تجهیز تابع زمان است. به دلیل تغییرات شب و روز و همچنین افت و خیزهایی که برای دما در طول فصول متصور است، چنین حالتی با طبیعت و واقعیت SAVP منطبق است. از این‌رو دستگاه معادلات دیفرانسیل پاره‌ای متناظر با مطلب ذکر شده را می‌توان به وسیله دستگاه معادلات (۴) بیان نمود.

$$\begin{aligned} PDE \quad \frac{\partial U}{\partial t} + V_x \frac{\partial U}{\partial x} &= \alpha^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}; 0 < x < L, t > 0 \\ BC_1 \quad U(0,t) &= f_1(t); t > 0 \\ BC_2 \quad U(L,t) &= f_2(t); t > 0 \\ IC \quad U(x,0) &= \Phi(x); t = 0, 0 \leq x \leq L \end{aligned} \quad (4)$$

تابع وابسته U در این قسمت، برای انجام و تبیین عملیات ریاضی، نشان دهنده دما است. دستگاه معادله دیفرانسیل پاره‌ای فوق، می‌تواند به‌عنوان واقعی‌ترین و طبیعی‌ترین معادله همرفت-نفوذ برای توصیف پروفایل دما در یک SAVP در نظر گرفته شود و چنان‌که ملاحظه می‌شود ترم سرعت تک‌بعدی در جهت X در آن دیده می‌شود. برای راحتی در نوشتن و انجام عملیات ریاضی، اندیس X از V_x حذف می‌شود و طرفین معادله بر α^2 تقسیم می‌شود (رابطه (۵)).

$$\begin{aligned} PDE \quad \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial U}{\partial t} &= \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{v}{\alpha^2} \frac{\partial U}{\partial x}; 0 < x < L, t > 0 \\ BC_1 \quad U(0,t) &= f_1(t); t > 0 \\ BC_2 \quad U(L,t) &= f_2(t); t > 0 \\ IC \quad U(x,0) &= \Phi(x); t = 0, 0 \leq x \leq L \end{aligned} \quad (5)$$

ترم $\frac{v}{\alpha^2} \frac{\partial U}{\partial x}$ باعث می‌شود حل معادله (۵) با موانع جدی روبه‌رو شود. با حذف ضریب $\frac{v}{\alpha^2}$ حالتی به وجود می‌آید که طی آن حل این معادله دیفرانسیل ممکن خواهد شد. به عبارت دیگر، معادله (۵) تا هنگامی که ترم $\frac{\partial U}{\partial x}$ را به‌عنوان ضریب $\frac{v}{\alpha^2}$ در خود دارد، از طریق تحلیلی قابل‌حل نیست. تکنیک حذف ترم $\frac{\partial U}{\partial x}$ از طریق یک تغییر متغیر نوآورانه به شرح زیر (دستگاه معادلات (۶)) ممکن خواهد بود که هم برای معادله دیفرانسیل (PDE) و هم شرایط مرزی (BCs) و هم شرایط اولیه (IC) اعمال می‌شود.

۲-۴-۱- روش حل معادلات دیفرانسیل ناهمگن در PDE

مربوط به SAVP از طریق توابع ویژه

حسب وجود ترم ناهمگن $f(x,t)$ در معادلات دیفرانسیل مربوط به SAVP دستگاه رابطه (۱۵) در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} PDE \quad J_t &= \alpha^2 J_{xx} + f(x,t); 0 < x < L, t > 0 \\ BC_1 \quad J(0,t) &= 0; t > 0 \\ BC_2 \quad J(L,t) &= 0; t > 0 \\ IC \quad J(x,0) &= \Phi(x); t = 0, 0 \leq x \leq L \end{aligned} \quad (15)$$

همان‌طور که J (در حالتی که $f(x,t)$ صفر باشد در روش جداسازی متغیرها از جنس حاصل ضرب $X(x)T(t)$ انگاشته می‌شود، با توجه به حضور خطی $f(x,t)$ در PDE فوق، می‌توان این تابع را نیز حاصل ضرب دو تابع مکان و زمان فرض کرد (رابطه (۱۶)).

$$f(x,t) = f(t).X(x) \quad (16)$$

تابع مکانی هم‌چنان از جنس سینوس فرض می‌شود. بنابراین، ترم ناهمگن به صورت معادلات (۱۷) بیان می‌شود.

$$\begin{aligned} f(x,t) &= f(t). \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \\ f(x,t) &= \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t). \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \end{aligned} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)، تنها $f_n(t)$ مجهول است که از روی تعامد Sin به صورت رابطه (۱۸) حاصل خواهد شد.

$$f_n(t) = \frac{2}{L} \int_{\xi=0}^{\xi=L} f(\xi,t). \sin\left(\frac{m\pi}{L}\xi\right) d\xi \quad (18)$$

اکنون حل $J(x,t)$ (و به عبارتی حل Wtr) را می‌توان به صورت رابطه (۱۹) نوشت.

$$J(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t). \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \quad (19)$$

مشتق‌های J یعنی J_t و J_{xx} با معادلات (۲۰) و (۲۱) معرفی می‌شود.

$$J_t = \sum_{n=1}^{\infty} T'_n(t). \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \quad (20)$$

$$J_{xx} = - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 . T_n(t). \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \quad (21)$$

پس از جای‌گذاری در معادله $J_t = \alpha^2 J_{xx} + f(x,t)$ رابطه (۲۲) به دست می‌آید.

دمایی محدودی را به لوله خط انتقال، تحمیل می‌نماید. از این رو، محدود بودن برد تابع $S(x,t)$ را می‌توان هم ارز با پایابودن آن در نظر گرفت. قبلاً نیز چنین استنباطی در مراجع دیده شده است و از آن به عنوان یک حل با پایه متقن تئوری استفاده شده است (Demirel and Sandler, 2004; Farlow, 1982). بدیهی است حل پایا بیش‌تر از حل گذرا، تابع شرایط مرزی است (رابطه (۱۰)).

$$S(x,t) = A(t). \left(1 - \frac{x}{L}\right) + B(t). \left(\frac{x}{L}\right) \quad (10)$$

تابع $S(x,t)$ از جنس W است. بنابراین، می‌توان آن را مانند دستگاه معادلات (۱۱) نوشت.

$$\begin{aligned} PDE \quad \frac{1}{\alpha^2} S_t &= S_{xx}; 0 < x < L, t > 0 \\ BC_1 \quad S(0,t) &= g_1(t); t > 0 \\ BC_2 \quad S_x(L,t) + hS(L,t) &= g_2(t); t > 0 \end{aligned} \quad (11)$$

شرایط اولیه S ، مانند شرایط اولیه W است. توابع زمانی $B(t)$ و $A(t)$ و حتی خود تابع پایایی $S(x,t)$ پس از جاگذاری‌های لازم به صورت رابطه (۱۲) استخراج می‌شوند.

$$\begin{aligned} A(t) &= g_1(t) \\ B(t) &= \frac{1}{1+Lh} [g_1(t) + Lg_2(t)] \\ S(x,t) &= g_1(t) \left(1 - \frac{x}{L}\right) + \frac{1}{1+Lh} [g_1(t) + Lg_2(t)] \left(\frac{x}{L}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

قسمت گذرای حل یعنی $Wtr(x,t)$ معادل رابطه (۱۳) خواهد شد.

$$Wtr(x,t) = W(x,t) - S(x,t) \quad (13)$$

حال می‌توان یک معادله دیفرانسیل جدید برای قسمت گذرا مانند دستگاه معادلات (۱۴) در نظر گرفت.

$$\begin{aligned} PDE \quad W_{tr,t} &= \alpha^2 W_{tr,xx} - S_t(x,t); 0 < x < L, t > 0 \\ BC_1 \quad W_{tr}(0,t) &= g_1(t) - g_1(t) = 0; t > 0 \\ BC_2 \quad W_{x,tr}(L,t) + hW_{tr}(L,t) &= 0; t > 0 \\ IC \quad W_{tr}(x,0) &= \Phi(x) - S(x,0) = \Phi_{tr}(x); t = 0, \\ &0 \leq x \leq L \end{aligned} \quad (14)$$

دستگاه معادلات (۱۴) نشان می‌دهد که شرایط مرزی، همگن شده است ولی ناهمگنی در قالب ترم $S_t(x,t)$ به داخل PDE نفوذ کرده و در آن ظاهر شده است. با معلوم بودن $\Phi(x)$ و $S(x,0)$ ، عبارت $\Phi_{tr}(x)$ نیز معلوم شده و به دست خواهد آمد. توسط روش حل توابع ویژه که در قسمت بعد توضیح داده می‌شود، ابتدا $Wtr(x,t)$ محاسبه شده و از آن‌جا توابع اصلی $W(x,t)$ و $U(x,t)$ نیز تعیین می‌شود.

$$y(t) = e^{-a(t).t}.y(0) + \int_{\tau=0}^{\tau=t} b(\tau).e^{-a(t).(t-\tau)}d\tau \quad (29)$$

اکنون، حل ODE های $T_n(t)$ برارابطه (۳۰) است.

$$T_n(t) = T_n(0).e^{-\left(\frac{n\pi}{L}\alpha\right)^2 t} + \int_0^t f_n(\tau).e^{-\left(\frac{n\pi}{L}\alpha\right)^2 (t-\tau)}d\tau \quad (30)$$

پس از جای‌گذاری رابطه (۳۱) حاصل می‌شود.

$$T_n(t) = \frac{2}{L} \left(\int_0^L \sin\left(\frac{n\pi}{L}\xi\right) \cdot \Phi(\xi) d\xi \right) e^{-\left(\frac{n\pi}{L}\alpha\right)^2 t} + \frac{2}{L} \left(\int_0^t e^{-\left(\frac{n\pi}{L}\alpha\right)^2 (t-\tau)} \cdot \int_0^L f(\xi, \tau) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L}\xi\right) d\xi d\tau \right) \quad (31)$$

در نتیجه حل نهایی به‌صورت معادله (۳۲) ارائه می‌شود.

$$J(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \quad (32)$$

۲-۵- مطالعه موردی

هنگامی که قرار است SAVP در میدان طبیعی اعمال شود، میزان اختلاف دمای منبع سرد و گرم و هم‌چنین فاصله بین این دو منبع پارامترهای بسیار مهمی از نظر امکان‌سنجی محیط هستند. اختلاف دمای بیش‌تر و فاصله کم‌تر، باعث انتقال بیش‌تر بخار می‌شود. در صورت رعایت این دو اولویت، تنها نگرانی فنی و عملیاتی اختلاف ارتفاع بین دو منبع دما خواهد بود. یک مطالعه موردی با نتایج رضایت‌بخش در انتقال آب شیرین‌شده به‌روش SAVP از شهر ساحلی رامسر (شمال ایران) به منطقه سرد ۲۰۰۰ متری تخت سلیمان واقع در حدود ۱۶ کیلومتری انجام شد. اطلاعات داده‌های هواشناسی مربوط به دمای سطح دریا در رامسر (منبع گرم) و ارتفاعات تخت سلیمان (منبع سرد) در جدول ۱ آمده است. دمای سطح دریا در رامسر و ارتفاعات تخت سلیمان در طول یک‌سال در شکل ۲ نمایش داده شده است. هر دمایی که با یک نقطه نشان داده شده، میانگین دمای ثبت‌شده در طول یک ماه است. در ارتفاعات تخت سلیمان، میانگین دمای روزانه (حداکثر) و شبانه (حداقل) هر ماه گزارش شده است، در حالی که برای رامسر به‌دلیل تفاوت ناچیز دمای شبانه‌روز در سطح دریا، تنها یک میانگین ماهانه دما گزارش شده است (Climate-Data.org; Weather).

$$\sum_{n=1}^{\infty} T'_n(t) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) = -\alpha^2 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 T_n(t) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) + \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \quad (22)$$

پس از فاکتورگیری، معادله (۲۳) ظاهر خواهد شد.

$$\sum_{n=1}^{\infty} [T'_n(t) + \left(\frac{n\pi}{L}\alpha\right)^2 \cdot T_n(t) - f_n(t)] \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) = 0 \quad (23)$$

با توجه به استقلال خطی Sin که کمان‌های آن به‌گونه‌ای است که Sinها همگی با هم صفر نمی‌شوند. بنابراین:

$$T'_n(t) + \left(\frac{n\pi}{L}\alpha\right)^2 \cdot T_n(t) - f_n(t) = 0 \quad (24)$$

اکنون تعداد n تا ODE ظاهر شده باید با تعداد n شرط اولیه حل شوند. اما این n شرط اولیه به‌صورت رابطه (۲۵) به‌دست می‌آیند.

$$J(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \\ \Phi(x) = J(x, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(0) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \\ \int_{x=0}^{x=L} \Phi(x) \cdot \sin\left(\frac{m\pi}{L}x\right) dx \\ = \int_{x=0}^{x=L} T_n(0) \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \cdot \sin\left(\frac{m\pi}{L}x\right) dx \quad (25)$$

که رابطه (۲۶) حاصل می‌شود.

$$T_n(0) = \frac{2}{L} \int_{\xi=0}^{\xi=L} \Phi(\xi) \cdot \sin\left(\frac{m\pi}{L}\xi\right) d\xi ; n = 0, 1, 2, \dots \quad (26)$$

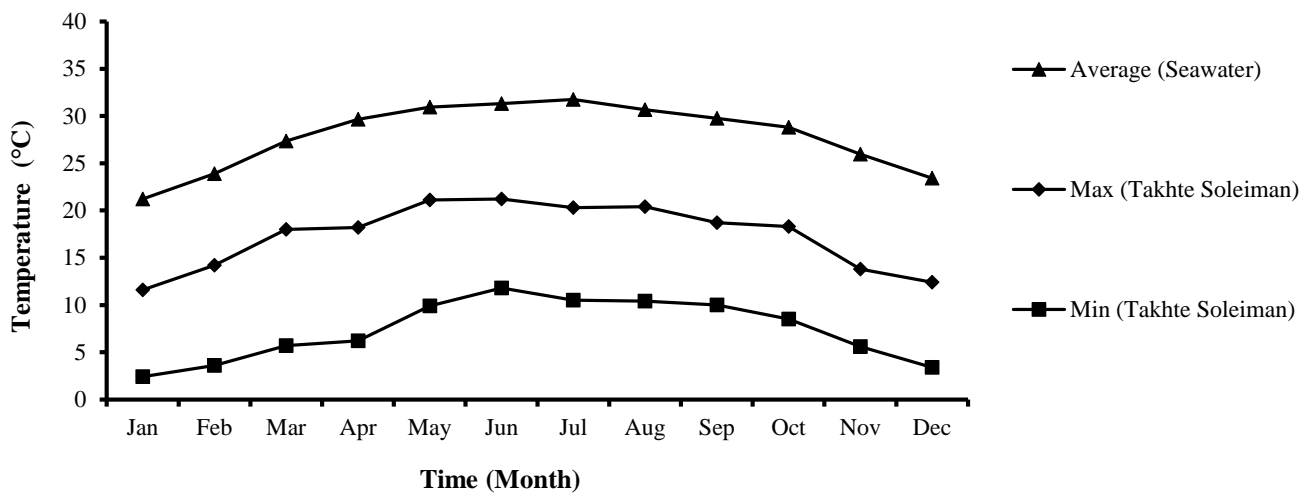
اکنون دستگاه ODE (رابطه (۲۷)) باید حل شود.

$$T'_n(t) + \left(\frac{n\pi}{L}\alpha\right)^2 \cdot T_n(t) - f_n(t) = 0 \\ T_n(0) = \frac{2}{L} \int_{\xi=0}^{\xi=L} \Phi(\xi) \cdot \sin\left(\frac{m\pi}{L}\xi\right) d\xi ; n = 0, 1, 2, \dots \quad (27)$$

حل این دستگاه ODE با معادلات الگوی (۲۸) انجام خواهد شد.

$$ODE \quad y'(t) + a(t).y(t) = b(t); t > 0 \\ IC \quad y(0) = Known; t = 0 \quad (28)$$

بنابراین رابطه (۲۹) به‌دست می‌آید.



شکل ۲- دمای سطح دریا در رامسر و ارتفاعات تخت سلیمان در طول یک سال

جدول ۱- دمای هوا و دمای آب دریا برای مناطق موردنظر (برحسب سانتی گراد)

ماه‌های سال	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	جون	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
ماکزیمم دمای هوا (تخت سلیمان)	۲/۴	۳/۶	۵/۷	۶/۲	۹/۹	۱۱/۸	۱۰/۵	۱۰/۴	۱۰	۸/۵	۵/۶	۳/۴
مینیمم دمای هوا (تخت سلیمان)	۱۱/۶	۱۴/۲	۱۸	۱۸/۲	۲۱/۱	۲۱/۲	۲۰/۳	۲۰/۴	۱۸/۷	۱۸/۳	۱۳/۸	۱۲/۴
متوسط دمای هوا (تخت سلیمان)	۷	۸/۹	۱۱/۸۵	۱۲/۲	۱۵/۵	۱۶/۵	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۴/۳۵	۱۳/۴	۹/۷	۷/۹
ماکزیمم دمای آب دریا (رامسر)	۱۴/۸	۱۹/۵	۲۳/۲	۲۴/۲	۲۵/۷	۲۶/۲	۲۶/۴	۲۴/۹	۲۳/۶	۲۲/۶	۱۹/۸	۱۸/۲
مینیمم دمای آب دریا (رامسر)	۲۷/۶	۲۸/۳	۳۱/۵	۳۵/۱	۳۶/۲	۳۶/۴	۳۷/۱	۳۶/۴	۳۵/۹	۳۵	۳۲/۱	۲۸/۶
متوسط دمای آب دریا (رامسر)	۲۱/۲	۲۳/۹	۲۷/۳۵	۲۹/۶۵	۳۰/۹۵	۳۱/۳	۳۱/۷۵	۳۰/۶۵	۲۹/۷۵	۲۸/۸	۲۵/۹۵	۲۳/۴

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- محاسبات و بحث SAVP از طریق معادله انرژی

برای سیستم آزمایشگاهی

در تحلیل نتایج سیستم SAVP، رسیدن به یک وضعیت پایدار از اهمیت بالایی برخوردار است. براساس نتایج مدل‌سازی و تحلیل‌های عددی، مشاهده شد که پس از اعمال تغییرات دمایی در مرزهای سیستم، در یک بازه زمانی مشخص (مثلاً دو ساعت در مدل آزمایشگاهی)، شرایط ترمودینامیکی به تعادل می‌رسند. این رفتار در نمودارهای پروفایل دما (شکل ۳ و ۴) به خوبی مشهود است.

از سوی دیگر، تغییرات دمایی ناشی از نوسانات شبانه‌روزی و فصلی، به‌ویژه در مقیاس‌های میدانی با طول زیاد لوله، تأثیر قابل توجهی بر نرخ انتقال حرارت، میعان و در نتیجه عملکرد کلی سیستم می‌گذارد. به‌همین دلیل، فرض دمای ثابت در مرزها نمی‌تواند رفتار واقعی سیستم را نمایش دهد. این نکته در تحلیل‌های میدانی این مقاله نیز مدنظر قرار گرفته و مدل‌سازی با در نظر گرفتن شرایط مرزی متغیر در طول زمان انجام شده است. این تغییرات باعث می‌شود که حل گذرا و پایدار سیستم به‌صورت

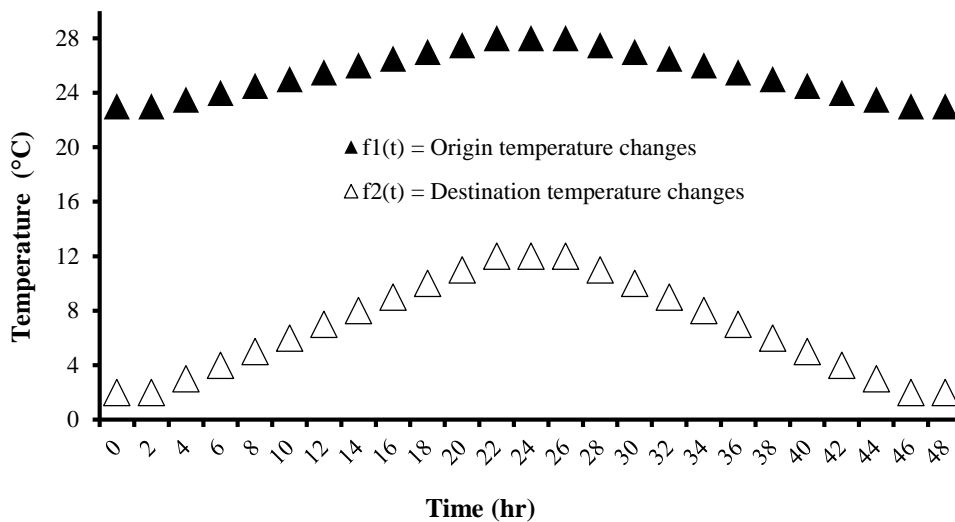
دینامیکی بررسی شود. بنابراین استفاده از مدل‌هایی مانند معادله همرفت-نفوذ با شرایط مرزی زمانی و روش توابع ویژه، برای دستیابی به نتایج معتبر و نزدیک به واقعیت، کاملاً ضروری است. در سیستم آزمایشگاهی SAVP می‌توان شرایط مرزی را توابع خفیف و یا شدیدی از زمان اتخاذ کرد. منظور از تغییرات دمایی خفیف و شدید این‌گونه است که پس از هر تغییر در دماهای مبدأ و مقصد آیا کل SAVP به تعادل ترمودینامیکی می‌رسد یا هم‌چنان در حالت ناپایا در حالت دینامیکی از تغییرات مداوم دما در طول لوله است؟! این دو حالت به‌دلیل محدود بودن طول لوله، به‌طور عملی قابل مطالعه است. توابع ویژه به‌لحاظ ریاضی قابلیت این‌را دارد که به‌سادگی پروفایل حقیقی دما را برای تغییرات خفیف دمایی در مرزها، پیش‌بینی نماید. بنابراین، فرض ترمودینامیک حالت پایدار با این حالت عجیب است و می‌توان از معادله (۳۲) (که حل از طریق توابع ویژه است) برای پیش‌بینی پروفایل دما استفاده نمود.

۳-۲- محاسبات و بحث SAVP از طریق معادله همرفت-نفوذ حرارت (توابع ویژه)

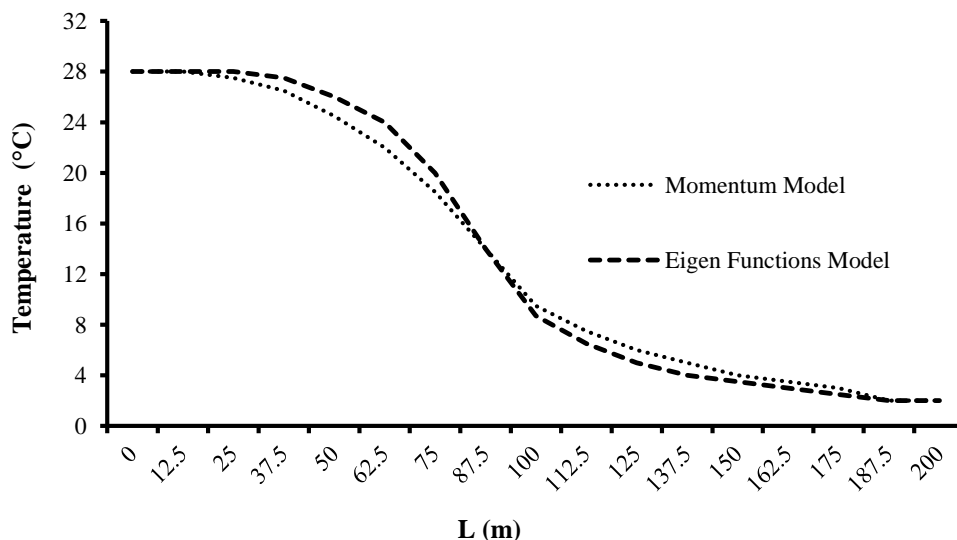
معادله همرفت-نفوذ حرارت برای حالتی که SAVP به تعادل

زمان تغییر می‌کنند به صورت نوعی^۹ معرفی می‌شوند. این دو تابع در واقع می‌توانند کاملاً دلخواه باشند که توسط کاربر به مدل ریاضی تحمیل می‌شوند. در این جا دو تابع سهموی شکل که در فاصله زمانی میانه دارای یک حداکثر هستند، به عنوان یک مثال کاربردی معرفی شده‌اند. طول زمان اعمال این دو تابع زمانی به گونه‌ای است که (حسب تجربه‌ای که از دستگاه حاصل شده) می‌توانند پس از هر تغییر که به دو ساعت می‌انجامد، سیستم را وادار به رسیدن به حالت تعادل نماید. به عبارتی، گام‌های دو ساعته تغییر دما به گونه‌ای تنظیم شده‌اند که طی آن آب شیرین‌کن آزمایشگاهی می‌تواند تعادل پایدار یک حالت ترمودینامیکی را ترک کرده و به تعادل ترمودینامیکی جدید برسد و در آن پایدار شود.

رسیده است از طریق توابع ویژه برای دو حالت حداقل و حداکثر اختلاف دما برای شورترین آب ($S = 4\%$) به کار گرفته شده و با نتایج معادله مومنتوم مقایسه شد. شکل‌های ۳ و ۴ نتایج حل پروفایل دما را از طریق توابع ویژه و مقایسه آن با نتایج حل معادله مومنتوم نشان می‌دهد. در واقع شکل ۳ که تغییرات دما را در بازه ۴۸ ساعت نشان می‌دهد، از روی تجربه عملیاتی، ثابت کرد که در هر تغییر، فرصت کافی برای به تعادل رسیدن SAVP حاصل شده است. نتیجه اعمال این تغییرات دما منجر به شکل ۳ شد. در شکل ۴ نتایج پروفایل دما از طریق حل معادله همرفت-نفوذ حرارت با حل از طریق معادله مومنتوم مقایسه شده است. نقاط نمایش داده شده در شکل ۴ نقاط تجربی است. توافق قابل قبولی بین دو تئوری و نقاط تجربی به چشم می‌خورد. دو تابع $f_1(t)$ و $f_2(t)$ به عنوان توابع دمایی که در مرزها با

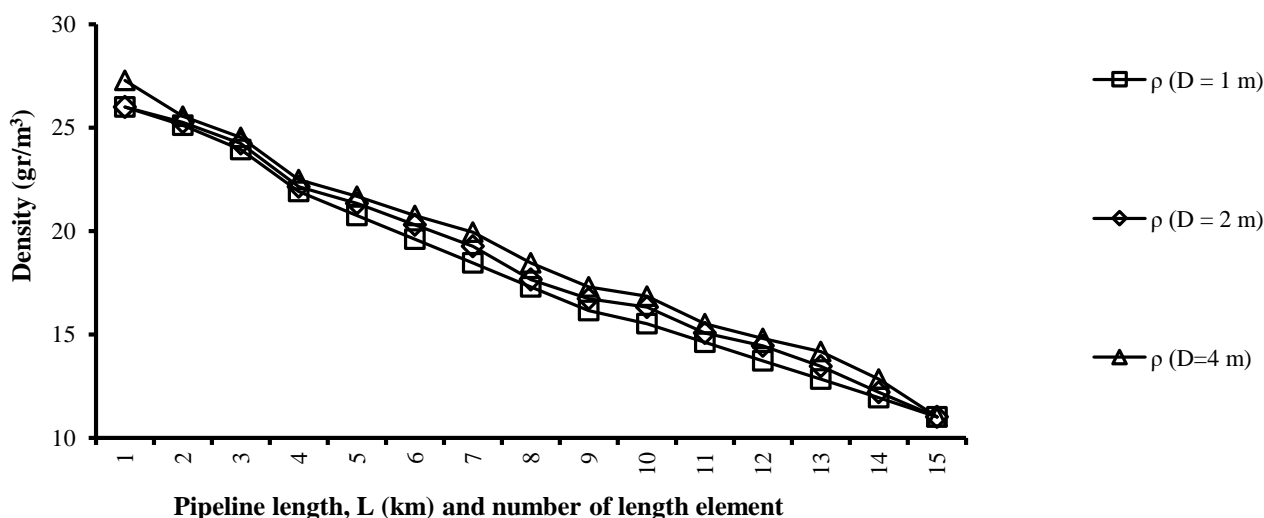


شکل ۳- اعمال تغییرات دمایی برای حل معادله انتقال-نفوذ حرارت از طریق توابع ویژه



شکل ۴- نمایش پروفایل دما در سیستم آزمایشگاهی محاسبه شده از طریق مدل مومنتوم و حل معادله انتقال-نفوذ با استفاده از توابع ویژه برای قطر یک اینچ و شوری چهار درصد وزنی در دمای مبدأ ۲۸ و دمای مقصد ۲ درجه سانتی‌گراد

شرایط تعادلی در لوله حادث می‌شود، مضاف بر این که تغییرات زمانی دما در مرزها، حاصل از تغییرات اقلیمی و آب و هوایی بوده و خواه‌ناخواه آن‌چنان شدید نیست که شرایط ناپایا به لوله اعمال نماید. به بیان دیگر، دو عامل طولی بودن لوله و تغییرات ملایم و طبیعی دما، ایجاب می‌کند که تنها از طریق حل توابع ویژه یعنی معادله (۳۲)، پروفایل دما برای لوله طولی به کار گرفته شود. بنابراین، ابتدا شکل تغییرات دما برحسب فصل برای مسیر مطالعه موردی رامسر-تخت سلیمان در شکل ۵ ارائه و حل آن طی معادله (۳۲) ارائه می‌شود. برای شکل ۵، شوری چهار درصد وزنی برای آب در نظر گرفته شده است. این شکل به لحاظ ارزش، بسیار نزدیک به شکل پروفایل دما حاصل از حل معادله مومنتوم است که در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۵- تقسیم‌بندی المانی خط انتقال بخار بین رامسر و تخت سلیمان شامل چگالی بخار در هر المان برای اقطار ۱، ۲ و ۴ متر در طول مسیر برای شوری ۴ درصد وزنی (طول هر المان ۱۰۰۰ متر است)

- داده‌برداری میدانی از پروژه‌های عملیاتی واقعی انجام شود.
- مدل ریاضی حاضر با شبیه‌سازی‌های عددی مانند دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ترکیب شود.
- از تکنیک‌های یادگیری ماشین برای تقریب توابع شرایط مرزی در مکان‌های فاقد داده‌های دقیق هواشناسی استفاده شود.
- جنبه‌های اقتصادی و محیط‌زیستی طرح (مانند بهینه‌سازی قطر لوله یا جنس آن) نیز به صورت یکپارچه وارد مدل شوند.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تحلیل رفتار حرارتی سامانه انتقال بخار زیراتمسفری (SAVP) در فرآیند نم‌زدایی آب دریا، مدلی ریاضی مبتنی بر معادله همرفت-نفوذ حرارت با شرایط مرزی متغیر زمانی ارائه داد. نوآوری اصلی این تحقیق، استفاده از روش

شکل ۴ که براساس به تعادل رسیدن اعمال دما در مرزها تبیین شده در واقع تغییرات دمایی $f_1(t)$ و $f_2(t)$ را در خود دارد و برای قطر یک اینچ و شوری چهار درصد، پروفایل دما را از دو طریق حل معادله انتقال-نفوذ (به کمک روش توابع ویژه) و مدل مومنتوم ارائه می‌دهد. این شکل می‌تواند شامل چندین منوگراف باشد ولی شکل حاضر، تنها زمانی که $f_1(t)$ به ۲۸ و $f_2(t)$ به ۲ درجه سانتی‌گراد رسیده را نشان می‌دهد.

۳-۳- محاسبات و بحث SAVP از طریق معادله همرفت-

نفوذ حرارت (توابع ویژه) برای ابعاد میدانی

در ارائه پروفایل دما در ابعاد میدانی، آن‌چنان که از ماهیت طول لوله پیدا است با هر تغییر در مرزها (چه شدید و چه خفیف)

۴- محدودیت‌ها و پیشنهاداتی برای مطالعات آتی

با وجود مزایای تحلیل ریاضی ارائه شده در این تحقیق، برخی محدودیت‌ها در مدل‌سازی وجود دارد که لازم است در مطالعات آتی مورد توجه قرارگیرند. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به فرض عایق بودن کامل خط لوله و یکنواخت بودن خواص ترموفیزیکی بخار اشاره کرد. هم‌چنین در این پژوهش، داده‌های تجربی برای اعتبارسنجی مدل در مقیاس میدانی در دسترس نبوده و تحلیل‌ها عمدتاً مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی و محاسبات تئوریک انجام شده است.

برای بهبود دقت مدل‌سازی و افزایش قابلیت تعمیم آن، در مطالعات آتی موارد زیر که می‌تواند راه را برای توسعه سامانه‌های SAVP در مقیاس‌های بزرگ‌تر و شرایط واقعی‌تر هموار سازد پیشنهاد می‌شود:

کاربردی و عملی نمود.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Sub-Atmospheric Vapor Pipeline (SAVP)
- 2- Thermal diffusivity
- 3- Diffusion
- 4- Convection
- 5- Eigenfunction Expansion
- 6- Pecklet Number; Pe
- 7- Transition; $Wtr(x,t)$
- 8- Steady; $S(x,t)$
- 9- Typical

۷- مراجع

پرهیزگار، ف. و پورعلی، ا. (۱۳۹۶). "بهینه‌سازی تولید هم‌زمان آب شیرین و توان در نیروگاه‌های حرارتی"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۲(۱)، ۳۸-۴۵.

جمالی کیخا، ا.، بهزادمهر، ا.، ابراهیمی، ا.، کیخوئی، م. و فنایی شیخ‌الاسلامی، ف. (۱۴۰۱). "مدل‌سازی عددی آب شیرین‌کن یون‌زدایی خازنی و مطالعه پارامترهای مؤثر بر عملکرد آن"، *آب و فاضلاب*، ۳۴(۲)، ۹۱-۱۰۴.

حدادیان، ز.، انصاری، م.، حقیقی، ع. و مقیمی‌پور، ا. (۱۳۹۹). "ارزیابی عملکرد مدل آزمایشگاهی ترکیبی اسمز معکوس-اسمز مستقیم برای افزایش بازدهی تولید فرایند نمک‌زدایی"، *آب و فاضلاب*، ۳۲(۲)، ۵۴-۶۷.

سامی، ب.، ضرغامی، م.، یگانی، ر. و صباحی، م. (۱۳۹۸). "طراحی سیستم آب شیرین‌کن خورشیدی به‌روش اسمز معکوس-فتولتائیک (مطالعه موردی: آب لب‌شور روستای سربند اردبیل)"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۴(۲)، ۳۷-۴۶.

Aghazadeh, K., and Attarnejad, R., (2020), "Improved desalination pipeline system utilizing the temperature difference under sub-atmospheric pressure", *Journal of Water Resource Management*, 34(15), 1-19, <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02415-4>.

Aghazadeh, K., and Attarnejad, R., (2020), "Study of sweetened seawater transportation by temperature difference", *Journal of Heliyon*, 6(3), e03573.

Aghazadeh, K., and Attarnejad, R., (2024), "Experimental investigation of desalination pipeline system and vapor transportation by temperature difference under sub-atmospheric pressure", *Journal of Water Process Engineering*, 60, 105133.

Climate-Data.org [Online]. Available: <https://fa.climate-data.org>.

Datta, A.K., (2002), *Biological and bioenvironmental*

توابع ویژه برای حل معادلات دیفرانسیل با مرزهای دینامیکی است که امکان مدل‌سازی دقیق رفتار گذرا و پایدار سیستم را فراهم می‌سازد.

نتایج این مقاله نشان داد که خط لوله شیرین‌سازی به‌روش SAVP که اساسی‌ترین قسمت این تجهیز است، می‌تواند به‌وسیله معادله مومنتوم و معادله انتقال-نفوذ حرارت مدل شود و نتایج یکسانی را حاصل نماید. پروفایل دما، کلیدی‌ترین خروجی است که می‌تواند به‌عنوان حل معادله مومنتوم و حل معادله انتقال-نفوذ حرارت برای سیستم SAVP متصور شد. معادله انتقال-نفوذ، از طریق توابع ویژه برای سیستم آزمایشگاهی و میدانی حل شد. این حل‌ها، به‌نوعی نگرشی بر نحوه کارکرد SAVP از دو دیدگاه مختلف است که می‌تواند مؤید صحت افت فشار، افت دما، چگالی و سرعت سیال در لوله باشد. در حالت آزمایشگاهی، به‌کمک داده‌های حاصل از افت دما و تعیین سرعت در خروجی، محاسبات پروفایل دما از طریق حل معادله همرفت-نفوذ صحنه‌گذاری و تأیید شد. معادله همرفت-نفوذ حرارت در سیستم آزمایشگاهی، برای تغییرات خفیف و شدید دما، از طریق توابع ویژه حل شد و نتایج قانع‌کننده‌ای حاصل شد. برپایه این توافق بین آزمایش و تئوری، محاسبات پروفایل دما در حالت میدانی، مرور و ارائه شد. اگرچه داده آزمایشگاهی برای حالت میدانی در دسترس نیست ولی باز هم توافق خوبی بین پروفایل دما حاصل از حل معادله مومنتوم و حل معادله انتقال-نفوذ حرارت حاصل شده است.

در یک مقایسه مادی در مقیاس مطالعه موردی، به‌راحتی می‌توان دریافت که جرم مواد به‌کار رفته در مبدأ گرم و مقصد سرد در مقایسه با جرمی که برای خط انتقال بخار سرد در نظر گرفته می‌شود بسیار ناچیز است. این حقیقت از دیدگاه مهندسی اهمیت سرمایه‌گذاری برای لوله‌کشی را گوشزد می‌کند و احتمالاً به‌لحاظ مدیریت اجرای طرح، توجه معنی‌داری به این مرحله اختصاص داده خواهد شد. علی‌رغم واقعیتی که در ورای طولیل بودن لوله انتقال بخار نهفته است، این روزها صنعت تولید لوله‌های مرغوب و کم وزن در اقطار مختلف با ضریب استحکام قابل قبول و عایق جرم و حرارت و نیز مهارت نصب و بهره‌برداری از خط لوله در مرحله اطمینان‌بخشی قرارداد و اصولاً با توجه به بازگشت سرمایه‌گذاری در زمان مناسب، مانع و محدودیتی در امر لوله‌گذاری به‌چشم نمی‌خورد. تنها با انجام مطالعات متعارف محیط‌زیستی و هواشناسی و همین‌طور اشراف به وضعیت دمایی مبدأ و مقصد و انتخاب نقاط صحیح برای انتقال، می‌توان طرح انتقال بخار از طریق SAVP را به‌لحاظ مهندسی و اجرایی نیز

- heat and mass transfer*, CRC Press.
- Del Amo, A., and Antonio, P., (2012), "System and method for desalinating seawater", *Patent WO/171986 A1*.
- Demirel, Y., and Sandler, S.I., (2004), "Nonequilibrium thermodynamics in engineering and science", *Journal of Physical Chemistry B*, 108(1), 31-43.
- Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K., (2006), "IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories", *Intergovernmental Panel on Climate Change*, Paris Convention February.
- Farlow, S.J., (1982), *Partial differential equations for scientists and engineers*, Dover Books on Mathematics, John Wiley & Sons.
- Inoue, K., Abe, Y., Murakami, M., and Mori, T., (2006), "Feasibility study of desalination technology utilizing the temperature difference between seawater and inland atmosphere", *Desalination*, 197, 137-153, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.12.021>.
- Levine, M.R., and Raton, B., (2005), "Low energy vacuum desalination method and apparatus", Patent US/7431806 B2.
- Shojaei, M., Nosrati, M., Attarnejad, R., and Saghafian, B., (2020), "Thermodynamics of sub-atmospheric vapor pipeline (SAVP) for seawater desalination; A study for vapor-liquid equilibrium and the fluid properties associated with a field application", *Desalination and Water Treatment*, 206, 133-143, <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26370>.
- Shojaei, M., Nosrati, M., Attarnejad, R., and Saghafian, B., (2020), "Seawater desalination through natural temperature difference: An experimental, theoretical, and place case study", *Desalination and Water Treatment*, 195, 64-78, <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25894>.
- Shojaei, M., Nosrati, M., and Attarnejad, R., (2021), "Mathematical analysis of sub-atmospheric Vapor pipeline (SAVP) transmission for seawater desalination; Green and Eigen functions solutions", *Desalination and Water Treatment*, 254, 169-180, <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28373>.
- Weather [Online]. Available: <http://irimo.ir>.
- Zarzo, D., and Prats, D., (2018), "Desalination and energy consumption. What can we expect in the near future?", *Journal of Desalination*, 427, 1-9, <https://doi.org/doi:10.1016/j.desal.2017.10.046>



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

Examining the Contribution of Wastewater Treatment Plant Features on the Results of Artificial Intelligence-Based Models Using SHAP

بررسی سهم ویژگی‌های تصفیه‌خانه فاضلاب در نتایج مدل‌های هوش مصنوعی با به‌کارگیری SHAP

Vahid Nourani^{1*}, Mahsa Dehghan² and Aida Hosseini Baghanam³

وحید نورانی^{۱*}، مهسا دهقان^۲ و آیدا حسینی بقانام^۳

1- Professor, Water Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.

۱- استاد، گروه آب، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

2- M.Sc. Student, Water Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آب، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

3- Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.

۳- دانشیار، دکترای تخصصی، گروه آب، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

*Corresponding Author, Email: nourani@tabrizu.ac.ir

*نویسنده مسئول، ایمیل: nourani@tabrizu.ac.ir

Received: 19/01/2025

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

Revised: 06/04/2025

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

Accepted: 23/04/2025

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

Models can greatly contribute to the optimization and control of treatment processes. The present study investigates the Biological Oxygen Demand (BOD_{eff}) and Chemical Oxygen Demand (COD_{eff}) of the effluent from the Tabriz municipal wastewater treatment plant (WWTP). This plant utilizes an activated sludge process with diffused aeration. Using Artificial Neural Networks (ANN) and Long Short-Term Memory (LSTM) models, daily data from the WWTP are analyzed to assess these key pollution indicators. Prior to modeling, input features are denoised using a Simple Moving Average (SMA) technique. Both linear and nonlinear relationships between features are examined to select optimal model inputs. The conversion factors obtained using ANN and LSTM were 1.66 and 1.65 for BOD to COD, and 1.32 and 1.33 for Total Dissolved Solids (TDS) to Electrical Conductivity (EC), respectively. These values are appropriate and demonstrate the models' accuracy in estimating relationships. Furthermore, to interpret feature importance, the novel and emerging method of Explainable Artificial Intelligence (XAI) are employed. BOD_{eff} and COD_{eff} with a one-day lag, as well as TDS and EC, were identified as high-impact features.

مدل‌ها می‌توانند تا حد زیادی به بهینه‌سازی و کنترل فرآیندهای تصفیه کمک نمایند. بنابراین با در نظر گرفتن این موضوع، تحقیق حاضر، اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی (BOD_{eff}) و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD_{eff}) پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری تبریز را که تصفیه‌خانه‌ای به روش لجن فعال با هوادهی دیفیوژری می‌باشد، به‌عنوان دو شاخص مهم در بررسی میزان آلودگی، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و حافظه طولانی کوتاه‌مدت (LSTM) بر پایه داده‌های روزانه مربوط به اطلاعات تصفیه‌خانه، مورد بررسی قرار داده است. ویژگی‌های ورودی قبل از استفاده برای مدل، توسط میانگین متحرک ساده (SMA) حذف نویز شدند؛ سپس با به‌کارگیری دو روش، ارتباط خطی و ارتباط غیرخطی بین ویژگی‌ها بررسی شد و ورودی‌های مدل انتخاب شدند. نتایج ضریب تبدیل با ANN و LSTM برای BOD به COD به ترتیب ۱/۶۶ و ۱/۶۵ و برای کل جامدات محلول (TDS) به هدایت الکتریکی (EC)، ۱/۳۲ و ۱/۳۳ بوده که مقادیر مناسبی هستند و دقت مدل‌ها را در تخمین روابط نشان می‌دهند. همچنین برای درک اهمیت هریک از ویژگی‌ها در نتایج به‌دست آمده، از روش جدید و نوظهور هوش مصنوعی توضیح‌پذیر (XAI) مورد استفاده قرار گرفت. BOD_{eff} و COD_{eff} با تأخیر یک روزه، TDS و EC به‌عنوان ویژگی‌های مهم شناسایی شدند.

Keywords: Effluent Assessment, Deep Neural Network, Explainable Artificial Intelligence, Tabriz Wastewater Treatment Plant.

کلمات کلیدی: ارزیابی پساب، شبکه عصبی عمیق، هوش مصنوعی توضیح‌پذیر، تصفیه‌خانه فاضلاب تبریز.

پیش‌بینی‌ها مهم هستند (Nourani et al., 2022). بنابراین، به‌طور کلی در مدل‌سازی تصفیه‌خانه، ثابت‌شده است که مدل‌های LSTM نسبت به سایر انواع ANN برتری دارند؛ زیرا می‌توانند وابستگی‌های بلندمدت و کوتاه‌مدت را با هم به‌صورت پویا دربرگیرند. درواقع، برای حفظ اطلاعات سری‌های زمانی، استفاده از LSTM که نوعی شبکه عصبی بازگشتی (RNN) است، می‌تواند جایگزین دیگری برای استفاده برای مدل‌سازی سری‌های زمانی باشد. این مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند نتایج رضایت‌بخشی را در پیش‌بینی و تحلیل ویژگی‌های فاضلاب ورودی و پساب خروجی ارائه دهد (Mjalli et al., 2007; Nourani et al., 2023; Pisa et al., 2019). طبق مطالعات جدیدی که در زمینه مقایسه نتایج مدل‌های گوناگون برای مدل‌سازی انواع پارامترهای تصفیه‌خانه صورت‌گرفته است، مدل‌های هوش مصنوعی مبتنی بر یادگیری عمیق از جمله LSTM، توانسته‌اند نتایجی با دقتی بالاتر نسبت به مدل‌های ساده یادگیری ماشین ارائه نمایند (Sheik et al., 2024; El-Rawy et al., 2021).

مدل‌سازی‌های هوش مصنوعی، تاکنون توانسته‌اند نتایج رضایت‌بخشی در انواع مختلفی از زمینه‌های مطالعاتی ارائه دهند؛ ولی به‌دلیل ماهیت جعبه سیاه این مدل‌ها و ساختار غیرشفافی که دارا هستند، فهم خروجی‌های به‌دست آمده از این مدل‌ها کار آسانی نیست. این چالش به‌ویژه زمانی نمایان‌تر می‌شود که کاربران این مدل‌ها، افراد غیرمتخصص در این زمینه هستند که برای فهم و تبیین نتایج این مدل‌ها با مشکلات بیش‌تری روبه‌رو می‌شوند (Vilone and Longo, 2021). مدل‌های شفاف‌تر و قابل‌تفسیر، سبب ایجاد اعتماد به نتایج مدل‌ها و شناسایی خطاها باتوجه به توضیحات مدل می‌شود (Dosilovic et al., 2018; Hassija et al., 2024). فرآیند تفسیر، با داده‌های ورودی در قالب‌های مختلف آغاز شده و از داده‌ها در مدل‌سازی مبتنی بر داده استفاده می‌شود. پس از ایجاد مدل، روش هوش مصنوعی توضیح‌پذیر (XAI)^۵ برای تحلیل، کشف دانش و افزایش تفسیرپذیری آن اعمال می‌شود. در این مرحله، ابزارهایی برای توضیح عملکرد مدل به کاربران ارائه می‌شود تا شفافیت و فهم مدل را بهبود بخشند؛ زیرا این ابزارها نقش مهمی در ارتباط کاربران نهایی با مدل دارند.

دو رویکرد اصلی در حوزه تبیین نتایج مدل‌ها وجود دارد که رویکرد نخست به‌عنوان "مدل-محور" و رویکرد دوم با عنوان "مدل-آگنوستیک" شناخته می‌شود. رویکرد اول شامل تکنیک‌هایی است که به‌طور خاص برای توضیح نتایج مدل‌ها با توجه به معماری ویژه آن‌ها طراحی شده‌اند و رویکرد دوم به

از گذشته تا امروز، آب همواره به‌عنوان منبعی ارزشمند و بی‌بدیل شناخته‌شده است. از سوی دیگر، به‌دلیل کاهش روزبه‌روز منابع آب شیرین، این منابع از اهمیت اقتصادی خاصی برخوردارند (Mjalli et al., 2007). یکی از عوامل ایجاد کننده آلودگی در محیط زیست، افزایش فاضلاب تولیدی به‌دلیل مصرف بی‌رویه آب برای مصارف روزمره از جمله آشامیدن، فعالیت‌های کشاورزی و صنعت، به‌دنبال گسترش شهرنشینی و فعالیت‌های صنعتی بوده است. برای کنترل آلودگی‌های ناشی از فاضلاب و بهره‌برداری مجدد از پساب، احداث تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ضروری است. آلودگی میکروبی و شیمیایی آب می‌تواند آسیب‌های گسترده‌ای به محیط زیست و جامعه انسانی وارد کند که جبران آن مستلزم صرف هزینه‌های سنگین خواهد بود (اصول‌دینی و همکاران، ۱۴۰۳). تصفیه‌خانه‌ها با استفاده از فناوری‌های نوین، امکان دفع ایمن پساب‌های تولید شده را فراهم می‌آورند. پس از تکمیل فرآیند تصفیه، بازاستفاده از پساب در مصارف گوناگون غیرخانگی، با توجه به بحران کمبود آب شیرین در ایران، اهمیت چشمگیری در صرفه‌جویی منابع آب دارد.

مدیریت ایمن و مؤثر تصفیه‌خانه‌های فاضلاب می‌تواند با ایجاد یک ابزار مدل‌سازی پیشرفته تحقق یابد که براساس داده‌های تاریخی ویژگی‌های مهم، راندمان سیستم تصفیه را ارزیابی و پیش‌بینی کند (اعلمی و همکاران، ۱۴۰۰). فرآیندهای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ترکیبی از واکنش‌های پیچیده فیزیکی، شیمیایی و زیستی است که اغلب نتایج پیش‌بینی‌ناپذیری دارند. مدل‌سازی این فرآیندها با استفاده از روش‌های سنتی مبتنی بر اصول فیزیکی معمولاً بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. به‌همین دلیل، در سال‌های اخیر، رویکردهای مبتنی بر هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)^۱ و شبکه‌های عصبی عمیق (DNNs)^۲ به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان ابزارهای نوین برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد تصفیه‌خانه‌ها مطرح شده‌اند. این فناوری‌ها با قابلیت صرفه‌جویی در زمان و هزینه نسبت به روش‌های قدیمی، جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند (Li et al., 2018). مطالعات گوناگونی نشان داده که روش‌هایی مانند ANN و شبکه عصبی حافظه طولانی کوتاه‌مدت (LSTM)^۳ قادرند روابط غیرخطی موجود میان پارامترهای کیفی فاضلاب را با دقت بالایی مدل‌سازی نمایند.

سری‌های زمانی تصفیه‌خانه نیز همانند سری‌های زمانی هیدرولوژیکی عمده‌تاً رفتار فصلی دارند، به این معنی که وابستگی‌های فصلی به اندازه وابستگی‌های کوتاه‌مدت برای

کیفی فاضلاب در تصفیه‌خانه تبریز. در این فرآیند، از الگوریتم‌های معروف شبکه‌های پیشرو (FFNN)^{۱۲} و LSTM به‌عنوان ساختار اصلی مدل‌ها استفاده شد. با توجه به غیرقابل تفسیر بودن این مدل‌ها، از تکنیک SHAP، برای تجسم و تفسیر اثر ویژگی‌ها بر نتایج مدل‌سازی استفاده شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تصفیه‌خانه مورد مطالعه

برای جمع‌آوری فاضلاب تولیدی و جلوگیری از شیوع آلودگی‌های بیماری‌زا در شهر تبریز که یکی از کلان‌شهرهای مهم در شمال غرب ایران است، یک تصفیه‌خانه پیشرفته فاضلاب در چهار کیلومتری سمت غرب شهر و در جنوب رودخانه آجی‌چای احداث شد (شکل ۱). واحدهای فرآیندهای این تصفیه‌خانه در شکل ۲ نمایش داده شده است. این تصفیه‌خانه که از فناوری هوادهی لجن فعال بهره می‌برد، به‌منظور تصفیه فاضلاب شهری با سه مدول و هرمدول برای تصفیه فاضلاب تولیدی توسط جمعیتی در حدود ۶۱۲ هزار نفر طراحی شده است. هم‌چنین، ۲۰ درصد از ظرفیت آن به تصفیه فاضلاب صنعتی اختصاص یافته است (اصغری و همکاران، ۱۴۰۰). این تأسیسات ظرفیت روزانه‌ای معادل ۷۶۵ مترمکعب دارد و طبق داده‌های تاریخی، میانگین دبی سالانه مجاز آن ۱/۵ مترمکعب بر ثانیه و میانگین دبی واقعی ورودی ۱/۱۵ مترمکعب بر ثانیه است. در شرایط معمول، حداکثر دبی تصفیه‌خانه ۲/۵ مترمکعب بر ثانیه بوده که در روزهای بارانی می‌تواند به ۳/۸ مترمکعب بر ثانیه برسد. میزان اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)^{۱۳}، اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی (BOD)^{۱۴} و مواد معلق (SS)^{۱۵} در فاضلاب ورودی به ترتیب ۳۲۰، ۲۵۰ و ۳۵۰ میلی‌گرم در لیتر گزارش شده است (Nourani et al., 2023).

در تصفیه‌خانه تبریز، فرآیند تصفیه فاضلاب شامل مراحل تصفیه فیزیکی، بیولوژیکی و در نهایت عملیات ضدعفونی است. برای انتقال فاضلاب به تصفیه‌خانه، از یک کانال ورودی استفاده می‌شود. فاضلاب پس از هدایت به مخازن ته‌نشینی اولیه و کاهش سرعت جریان، ذرات شن و ماسه با قطر بیش‌تر از ۰/۲ میلی‌متر جدا می‌شوند. در مرحله پایانی تصفیه، از عملیات کلرزنی، برای حذف میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا استفاده می‌شود. از هاضم‌های بی‌هوازی در بخش مدیریت لجن برای تثبیت لجن و بسترهای خشک‌کن برای آب‌گیری از لجن تشکیل شده است.

نمونه‌های منفرد از تصفیه‌خانه تبریز در فواصل زمانی مشخص و با استفاده از روش نمونه‌گیری مرکب طی یک دوره معین،

تکنیک‌هایی اشاره دارد که پس از آموزش مدل، می‌توان از آن‌ها برای انواع مختلف مدل‌های هوش مصنوعی استفاده نمود (Adadi and Berrada, 2018; Danesh et al., 2022). در تکنیک‌های مدل-آگنوستیک، روش Shapley که با عنوان (SHAP)^۶ نیز شناخته می‌شود، به‌عنوان یک روش توضیح‌پذیری افزودنی عمل می‌کند و تأثیر هر ویژگی را بر عملکرد کلی مدل مشخص می‌نماید. در این راستا، Park et al. (2022a)، با استفاده از مدل تقویت گرادیان شدید (XGBoost)^۷، غلظت کلروفیل را به‌عنوان شاخصی برای جلبک‌های آب پیش‌بینی کردند. آن‌ها متغیرهای ورودی را با روش‌های اهمیت ویژگی (FI)^۸ و ضریب تورم واریانس (VIF)^۹ انتخاب کردند. نتایج نشان داد که SHAP می‌تواند تفسیرپذیری بهتری از نتایج ارائه دهد. در یک مطالعه دیگر، Park et al. (2022b)، از مدل XGBoost در یک تصفیه‌خانه آزمایشی پس از وقوع اختلالات برای پیش‌بینی بازبانی کیفیت آب استفاده نمودند. اختلالات، زمانی شناسایی می‌شد که کدورت مشاهده شده از حد معین تجاوز می‌کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که پیش‌پردازش داده‌های ورودی سبب بهبود نتایج مدل می‌شود. درنهایت، تحلیل SHAP برای تفسیر نتایج مدل به‌کار گرفته شد. (Núñez et al. (2023) با به‌کارگیری روش SHAP، نتایج پیش‌بینی جریان ذوب برف در منطقه خشک شیلی را تفسیر کردند. نتایج حاکی از آن بود که متغیرهای آب و هوایی دارای اهمیت بیش‌تری نسبت به متغیرهای اقلیمی هستند.

Bourahla and Bourahla (2023) یک سیستم کنترل بلادرنگ برای جلوگیری از سرریز فاضلاب با استفاده از اینترنت اشیا و XAI طراحی کردند. در این سیستم، از داده‌های تاریخی برای ساخت مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی به‌کار گرفته شد و داده‌های بلادرنگ برای نظارت و کنترل وضعیت سیستم فاضلاب استفاده شد. پیش‌بینی‌ها با تکنیک SHAP تحلیل شده و در صورت شناسایی رفتار غیرعادی، سیستم فاضلاب فعال می‌شد.

براساس مطالعات انجام‌شده، استفاده از الگوریتم SHAP برای توضیح نحوه تأثیر ویژگی‌های ورودی در مدل‌سازی تصفیه‌خانه فاضلاب با استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، روشی نوظهور و خلاقانه است که امکان تصمیم‌گیری بهینه برای بهبود کارایی سیستم‌ها را فراهم می‌نماید. هم‌چنین موجب تنظیم بهتر فرآیندهای تصفیه، بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود.

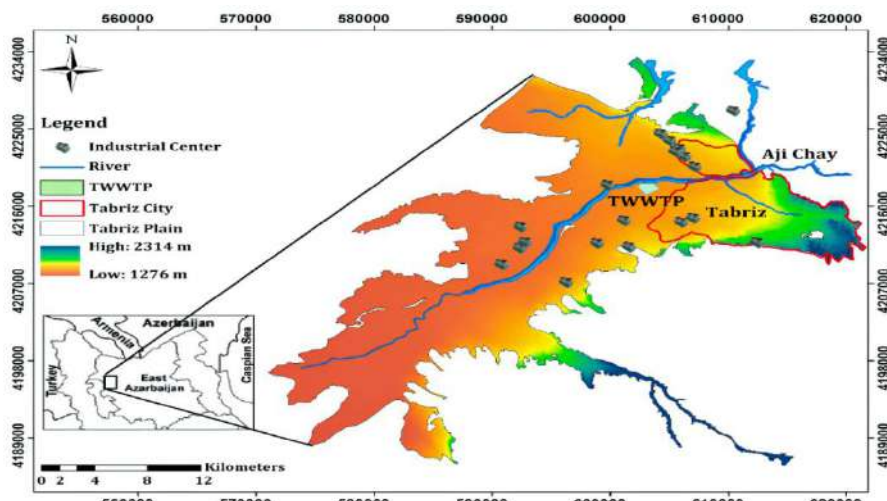
هدف از این تحقیق، استفاده از ضریب همبستگی (CC)^{۱۰} و اطلاعات متقابل (MI)^{۱۱} برای انتخاب ورودی‌های غالب. مدل‌سازی‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای ارزیابی ویژگی‌های

و COD_{eff} (۲۲) که به عنوان ویژگی‌های هدف در فرآیند مدل‌سازی در نظر گرفته شده‌اند، هم‌زمان ثبت شده‌اند. این هم‌زمانی در ثبت داده‌ها برای تحلیل دقیق‌تر و مدل‌سازی بهتر فرآیند تصفیه آب اهمیت دارد. با توجه به این‌که فرآیندهای زیستی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، به زمان کافی برای تجزیه مواد آلی نیاز دارند، این فرآیندها معمولاً منجر به تغییراتی در شاخص‌هایی مانند BOD و COD می‌شوند که اثرات آن‌ها معمولاً با تأخیر در پساب قابل مشاهده است. علاوه بر این، مقادیر BOD و COD از ثبات نسبی برخوردار بوده و تغییرات آن‌ها به صورت تدریجی و در طول یک دوره تأخیری خاص ظاهر می‌شود. با استناد به تابع خودهمبستگی جزئی (PACF) (۲۳) در شکل ۳ و خاصیت خودرگرسیون فرآیند، تأخیرهای ۱ روزه و ۷ روزه، به دلیل ثبت الگوهای هفتگی، به عنوان مهم‌ترین تأخیرها شناسایی شدند که بیش‌ترین ارتباط را با COD_{eff} و BOD_{eff} دارند. برای روشن‌سازی روند کار، فلوچارت مراحل انجام پژوهش در شکل ۴ نشان داده شده است.

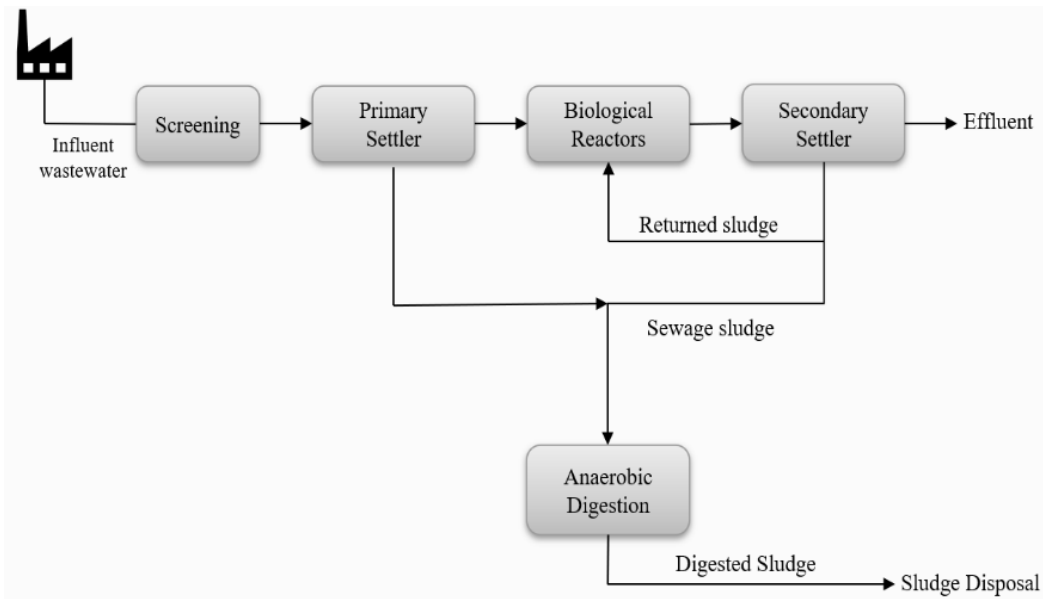
معمولاً ۲۴ ساعته، جمع‌آوری می‌شوند (Nourani et al., 2023). داده‌های مورد استفاده در این مطالعه به صورت روزانه از سال ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ به کار گرفته شدند. ویژگی‌های ثبت شده مورد استفاده برای مدل‌سازی شامل BOD، COD، کل جامدات معلق (TSS)^{۱۶}، کل جامدات محلول (TDS)^{۱۷}، جامدات معلق فرار (VSS)^{۱۸}، هدایت الکتریکی (EC)^{۱۹}، pH، دمای هوا (T_{air})^{۲۰} و دمای فاضلاب ورودی (T_{inf})^{۲۱} است. ویژگی‌های BOD و COD برای بررسی کیفیت و تعیین شدت آلودگی‌های آلی و شیمیایی در فاضلاب نقش حیاتی دارند و به عنوان معیارهای کلیدی شناخته شده‌اند. این دو پارامتر در تصفیه‌خانه تبریز به طور مستمر و دقیق اندازه‌گیری شده و اطلاعات آن‌ها به عنوان ویژگی‌های هدف در فرآیند انجام مدل‌سازی در این تحقیق انتخاب شدند. نظارت دقیق بر این ویژگی‌ها کمک می‌کند تا سطح آلودگی در فرآیند تصفیه به طور بهینه ارزیابی و کنترل شود. سایر ویژگی‌ها که در فاضلاب ورودی ثبت و برای مدل‌سازی مورد توجه قرار می‌گیرند، از نظر گام زمانی با ویژگی‌های اصلی پساب (BOD_{eff}

جدول ۱- ویژگی‌های آماری داده‌های دریافتی از تصفیه‌خانه تبریز از سال ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹

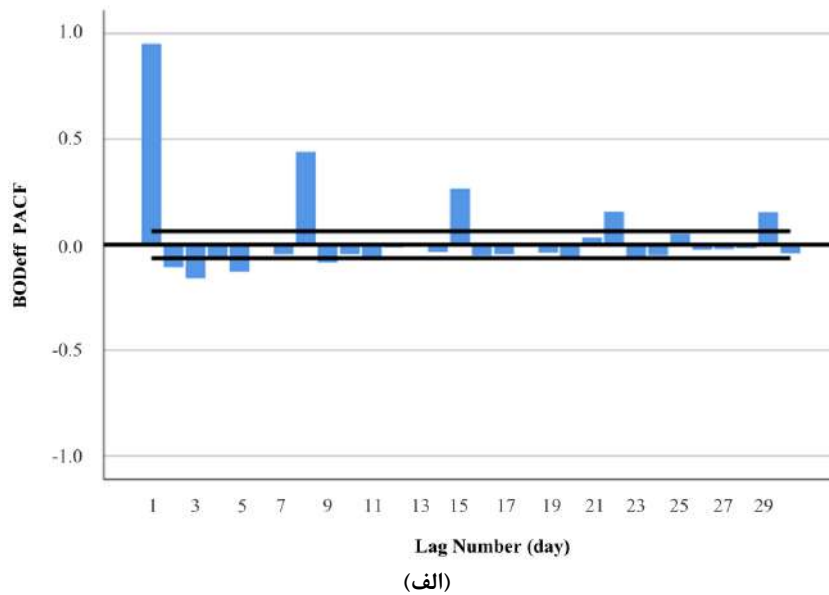
متغیر	واحد	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار
BOD _{inf}	mg/L	۳۲۲/۵	۲۱۰	۲۹۳/۱۹	۱۴/۴۴
COD _{inf}	mg/L	۵۳۲/۵	۳۷۰	۴۸۴/۸۴	۱۹/۹۵
TSS _{inf}	mg/L	۳۲۹	۲۲۰	۲۹۰/۲۸	۱۶/۱۱
TDS _{inf}	mg/L	۱۴۶۹	۹۲۲	۱۱۸۲/۹۷	۶۲/۵۹
VSS _{inf}	mg/L	۲۱۴/۵	۱۲۹	۱۸۰/۷۶	۱۵/۳۹
PH _{inf}	°C	۸/۹۸	۱۱۹۸	۱۵۵۳/۲۲	۸۱/۷۶
EC _{inf}	mg/L	۱۹۴۲	۷/۱۰	۸/۰۲	۰/۲۲
T _{air}	°C	۳۵	-۱۱/۵	۱۲/۱۸	۱۰/۲۴
T _{inf}	°C	۲۶/۸	۱۱/۶	۲۰/۹۹	۲/۸
BOD _{eff}	mg/L	۲۷	۱۷	۲۲/۹۷	۱/۴
COD _{eff}	mg/L	۴۵	۲۶	۳۸/۴۳	۲/۴



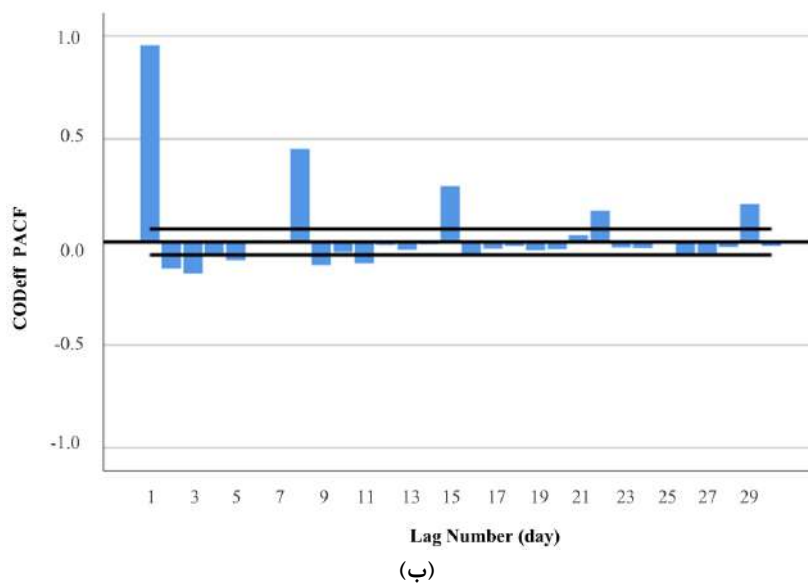
شکل ۱- موقعیت تصفیه‌خانه فاضلاب تبریز بر روی نقشه شهر تبریز (اصغری و همکاران، ۱۴۰۰)



شکل ۲- دیاگرام فرآیندهای تصفیه در تصفیه‌خانه فاضلاب تبریز

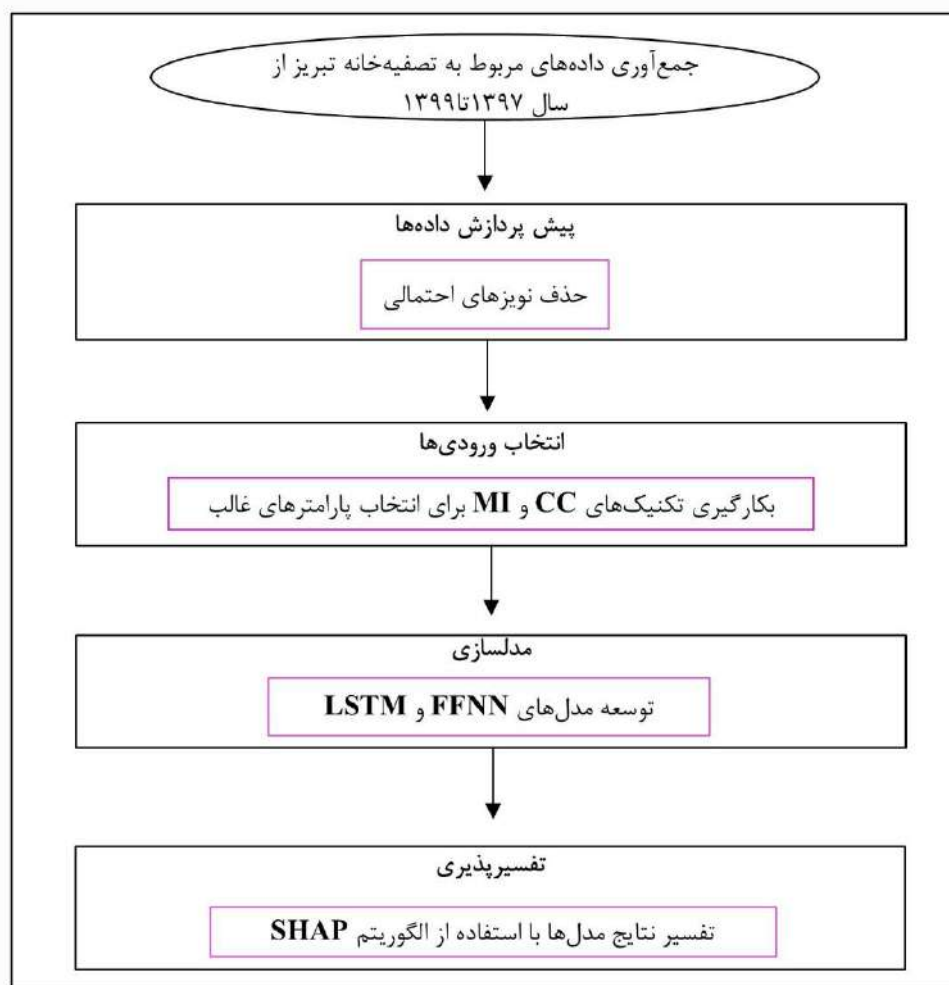


(الف)



(ب)

شکل ۳- نمودار PACF (الف) BODeff؛ و (ب) CODEff در یک دوره تأخیر ۳۰ روزه



شکل ۴- نمایش فلوجارت روش تحقیق

۲-۲- معرفی پارامترهای هدف در مدل‌سازی

۲-۲-۱- اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی (BOD)

BOD معیاری برای سنجش میزان اکسیژن مورد نیاز باکتری‌های هوازی برای تجزیه مواد آلی موجود در فاضلاب است و مقدار آن نشان‌دهنده سطح آلودگی فاضلاب است. BOD_5 میزان اکسیژن مصرفی طی ۵ روز در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد است که مقدار آن به‌عنوان شاخصی برای کیفیت فاضلاب در نظر گرفته می‌شود. میزان BOD پس‌اب نشان‌دهنده کارایی تصفیه‌خانه در کاهش آلاینده‌های آلی بوده و به‌عنوان شاخصی مهم برای ارزیابی عملکرد فرآیندهای تصفیه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۲-۲- اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)

COD میزان اکسیژنی است که برای اکسیداسیون شیمیایی مواد آلی در فاضلاب با استفاده از پتاسیم دی‌کرومات و اسید سولفوریک نیاز است. اندازه‌گیری COD در مراحل مختلف تصفیه‌خانه، به کنترل و بهینه‌سازی فرآیند کمک می‌نماید و با

مقایسه مقادیر ورودی و خروجی، کارایی حذف آلاینده‌ها سنجیده می‌شود. مقادیر بالای COD در پساب‌های تخلیه شده می‌تواند اکسیژن محلول در آب را کاهش داده و حیات آبیان را تهدید کند، بنابراین کنترل آن یکی از اهداف اصلی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب است.

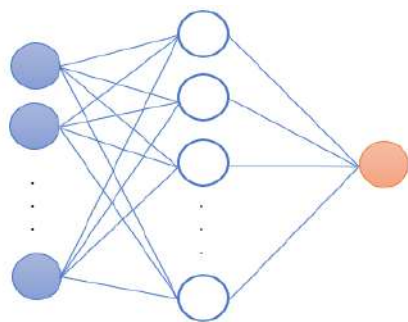
۲-۳- پیش‌پردازش داده‌ها

به‌دلیل وجود نویزهای احتمالی و نوسانات گذرا در داده‌های دریافتی از تصفیه‌خانه فاضلاب در این مطالعه، از روش میانگین متحرک ساده (SMA)^{۲۴} برای حذف نویزهای موجود در داده‌ها استفاده شد. SMA با محاسبه میانگین داده‌ها در یک محدوده زمانی معین، به کاهش این نویزها و نوسانات کمک کرده و داده‌هایی قابل‌اعتمادتر را برای فرآیند مدل‌سازی ارائه می‌دهد. این فیلتر به مدل‌های پیش‌بینی کمک می‌کند تا الگوهای موجود در داده‌ها را با دقت بیشتری شبیه‌سازی نمایند. مقدار SMA با استفاده از معادله (۱) تعیین می‌شود (Svetunkov and Petropoulos, 2018).

$$MI(X, Y) = H(x) + H(Y) - H(X, Y) \quad (5)$$

۲-۵- شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs)

از دهه ۱۹۴۰ که توسعه ANN آغاز شد، این شبکه‌ها به‌عنوان ابزارهای محاسباتی برای حل مسائل مختلف در زمینه‌های گوناگون استفاده می‌شوند؛ مانند طبقه‌بندی داده‌ها، شناسایی الگوها و پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده و غیرخطی (Huang and Mujumdar, 1993). FFNN یکی از حالت‌های معمول و پر استفاده ANN است (Mjalli et al., 2007). این مدل‌ها با بهره‌گیری از الگوریتم پس‌انتشار خطا (BP) در بسیاری از کاربردهای حوزه محیط‌زیست به‌کار گرفته شده‌اند. در این وضعیت، شبکه با استفاده از فرآیند BP آموزش داده می‌شود و وزن‌های خود را براساس اختلاف بین خروجی پیش‌بینی شده و خروجی واقعی تنظیم می‌کند. این نوع شبکه‌ها از یک لایه ورودی، حداقل یک لایه مخفی و یک لایه خروجی تشکیل شده‌اند که شماتیکی از آن در شکل ۵ نشان داده شده است (Mjalli et al., 2007). نورون‌های موجود در لایه‌ها که به‌عنوان پردازنده عمل می‌کنند، دارای تابع فعال‌سازی هستند و برای تقلید از سلول‌های عصبی مغز انسان طرح‌ریزی شده‌اند. داده‌های ورودی انتخاب شده قبل از فرآیند مدل‌سازی، بعد از ورود به لایه ورودی، در لایه پنهان پردازش شده و در نهایت، نتایج پیش‌بینی شده از طریق لایه خروجی استخراج می‌شوند. در این مطالعه از یک FFNN سه لایه برای مدل‌سازی BODeff و CODeff استفاده شد.



شکل ۵- شماتیکی از یک شبکه عصبی مصنوعی سه لایه

۲-۶- شبکه عصبی حافظه طولانی کوتاه‌مدت مبتنی بر

یادگیری عمیق (LSTM)

برای رفع محدودیت شبکه‌های عصبی سنتی در ذخیره اطلاعات زمانی، معماری RNN با قابلیت یادگیری وابستگی‌های زمانی از طریق ساختار حلقه‌ای طراحی شد. با این حال، پیش از معرفی معماری پیشرفته‌ای به نام LSTM توسط Hochreiter

$$\hat{y}_t = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_{t-i} \quad (1)$$

که k : تعداد گام‌های زمانی مورد استفاده در محاسبه SMA، y_t : مقدار واقعی داده در زمان t و \hat{y}_t : پیش‌بینی انجام شده برای همان زمان هستند.

۲-۴- انتخاب ویژگی‌های غالب توسط MI و CC

در مدل‌سازی، به‌کارگیری ابزارهایی مانند ضریب همبستگی و اطلاعات متقابل، نقش مهمی در کاهش تعداد متغیرهای ورودی ایفا می‌کند. این روش‌ها ویژگی‌هایی را گزینش می‌کنند که ارتباط بیش‌تری با نتیجه نهایی دارند. این موضوع به مدل کمک می‌نماید تا الگوهای اساسی را بهتر تشخیص داده و پیش‌بینی‌های دقیق‌تری ارائه کند. ضریب CC بین دو پارامتر یک معیار آماری است که میزان ارتباط خطی بین دو متغیر را نشان می‌دهد و با استفاده از معادله (۲) تعیین می‌شود (نورانی، ۱۳۹۴).

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

که \bar{x} و \bar{y} : مقادیر میانگین نمونه‌های x و y و N : تعداد نمونه‌ها هستند. مقادیر CC در محدوده -۱ تا ۱ قرار دارند؛ مقادیر نزدیک به -۱ یا ۱ نشان‌دهنده همبستگی قوی، مقادیر نزدیک به صفر، نشان‌دهنده همبستگی ضعیف و مقدار صفر بیانگر عدم وجود همبستگی میان ویژگی‌ها است.

MI یک معیار نظارتی است؛ به این معنا که براساس ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها تعریف می‌شود. این روش برای نخستین بار در سال ۱۹۹۵ در زمینه پردازش تصاویر پزشکی به‌کار گرفته شد و اکنون در بسیاری از حوزه‌های علمی مختلف کاربرد دارد (Viola and Wells Iii, 1997). محاسبه آنتروپی برای یک متغیر با توجه به معادله (۳) محاسبه می‌شود.

$$H(X) = - \sum_{i=1}^N p(x_i) \text{Log}[p(x_i)] \quad (3)$$

که N : تعداد حالت‌های ممکن و P : احتمال هر مقدار ممکن را نشان می‌دهد. برای محاسبه آنتروپی، که سطح وابستگی بین دو متغیر است، از معادله (۴) استفاده می‌شود (Gao et al., 2008).

$$H(X, Y) = - \sum_{i=1}^N \sum_{i=1}^N p(x_i, y_i) \text{Log}[p(x_i, y_i)] \quad (4)$$

در نهایت، محاسبه MI با استفاده از معادله (۵) صورت می‌گیرد (Yang et al., 2000).

$$\tanh(x) = \frac{\sinh(x)}{\cosh(x)} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (13)$$

مدل سازی LSTM از طریق عملکرد دروازه فراموشی F_t آغاز می شود که وظیفه اصلی آن حذف اطلاعات غیر ضروری از مراحل قبلی است. این فرآیند شامل استفاده از تابع سیگموید برای پردازش ورودی های فعلی و داده های زمانی گذشته است تا مشخص شود چه بخشی از وضعیت قبلی سلول C_{t-1} باید نگه داشته شده و چه بخشی حذف شود. در این مرحله، دروازه ورودی وظیفه دارد تعیین کند کدام بخش از داده های ورودی جدید X_t به وضعیت سلول افزوده شود. ابتدا تابع سیگموید میزان اهمیت داده های جدید را مشخص می کند، در حالی که تابع تانژانت هیپربولیک به این داده ها وزن های مناسبی اختصاص می دهد. پس از این مرحله، اطلاعات پردازش شده از طریق عملیات جمع و ضرب برای به روز رسانی وضعیت سلول ترکیب می شوند. در نهایت، دروازه خروجی نقش خود را ایفا کرده و مشخص می کند که کدام بخش از حافظه سلول به حالت پنهان منتقل شود (Nourani and Behfar, 2021). مدل های LSTM این مطالعه شامل یک لایه ورودی، دو لایه پنهان (یک لایه LSTM برای یادگیری وابستگی های طولانی مدت و یک لایه کاملاً متصل برای بهبود رگرسیون و تعیین خروجی ها) و یک لایه خروجی است. تعداد واحدهای پنهان از طریق آزمون و خطا برای دستیابی به تعادل بهینه بین پیچیدگی و عملکرد مدل انتخاب شد.

(1997) and Schmidhuber and RNN ها قادر به یادگیری وابستگی های بلندمدت نبودند (Nourani and Behfar, 2021). LSTM، توانست مشکل ناپدید شدن و انفجار گرادیان را در RNN های سنتی حل نماید. در شکل ۶، طرح شماتیک یک بلوک حافظه LSTM با پنج واحد پنهان نمایش داده شده است که شامل ساختار زنجیره ای متشکل از بلوک های حافظه تکرارشونده و سه دروازه اصلی است. الگوریتم های مرتبط با یک لایه LSTM نیز از طریق معادلات ارائه شده اند.

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, X_t] + b_f) \quad (6)$$

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, X_t] + b_i) \quad (7)$$

$$\bar{C}_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, X_t] + b_c) \quad (8)$$

$$C_t = f_t \times C_{t-1} + i_t \times \bar{C}_t \quad (9)$$

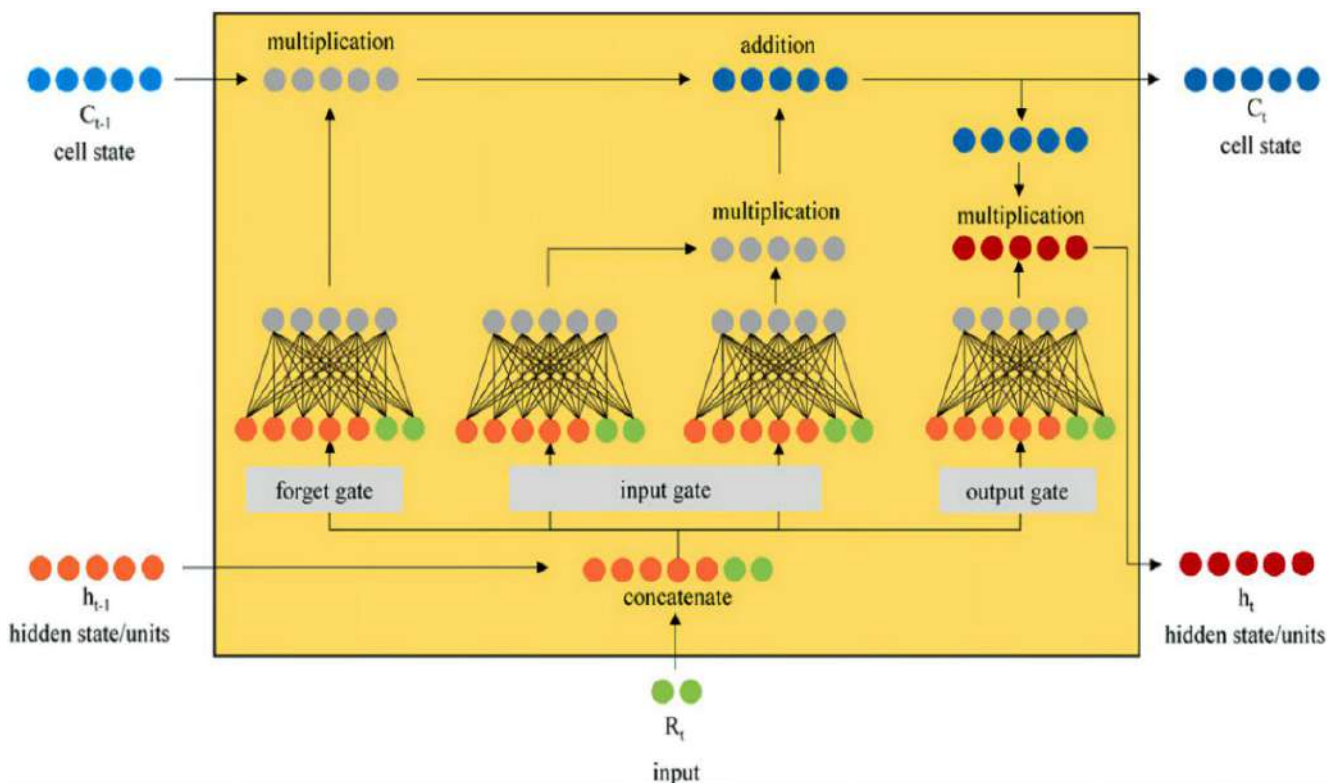
$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, X_t] + b_o) \quad (10)$$

$$h_t = o_t \times \tanh(C_t) \quad (11)$$

تابع استاندارد سیگموید لجستیک (σ) به صورت رابطه (۱۲) تعریف می شود.

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (12)$$

تابع تانژانت هیپربولیک (\tanh) نیز به صورت رابطه (۱۳) تعریف می شود:



شکل ۶- ساختار بلوک حافظه LSTM با دو بُعد ورودی و پنج واحد پنهان (Nourani and Behfar, 2021)

۲-۷- توضیح افزودنی Shapley (SHAP)

الگوریتم SHAP یکی از روش‌های پیشرفته در حوزه XAI محسوب می‌شود که برای تحلیل و تبیین نتایج مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوریتم توسط Shapley (1953) بر پایه مفهوم ارزش SHAP، برگرفته از نظریه بازی‌ها، طراحی شده است. این روش به‌طور عمده برای ارزیابی نقش هر ویژگی در شکل‌گیری نتیجه نهایی مدل طراحی شده است. در چارچوب نظریه بازی‌ها، ارزش SHAP سهم و تأثیر هر بازیکن را در رسیدن به نتیجه نهایی یک بازی نشان می‌دهد (Shapley, 1953). هر ویژگی مدل به‌عنوان یک عامل مستقل در نظر گرفته می‌شود و ارزش SHAP، سهم آن ویژگی را در پیش‌بینی نهایی مدل مشخص می‌کند. این روش با بررسی تمامی ترکیب‌های ممکن از ویژگی‌ها، تأثیر هر ویژگی را به‌صورت جداگانه محاسبه می‌نماید. به‌طور خاص، مدل یک‌بار با حضور ویژگی i و یک‌بار بدون حضور آن اجرا می‌شود و اختلاف نتایج به‌دست آمده، میزان اهمیت ویژگی i را نشان می‌دهد. مقدار SHAP برای هر متغیر ورودی از معادله (۱۴) به‌دست می‌آید:

$$\phi_i = \sum_{S \subseteq F \setminus \{i\}} \frac{|S|!(F-|S|-1)!}{|F|!} [g_{S \cup \{i\}}(x_{S \cup \{i\}}) - g_S(x_S)] \quad (14)$$

که n : بیانگر تمام ویژگی‌ها، ϕ_i : مقدار SHAP مربوط به ویژگی i و S : هر زیرمجموعه‌ای از مجموعه کامل ویژگی‌های F به‌جز ویژگی i هستند. مجموعه F شامل تمامی متغیرهای ورودی مدل می‌شود. در معادله (۱۴)، x_S مقادیر متغیرهای موجود در S را بدون در نظر گرفتن ویژگی i نشان می‌دهد؛ درحالی‌که $x_{S \cup \{i\}}$ داده‌هایی را توصیف می‌کند که ویژگی i را نیز شامل می‌شوند. علاوه بر این، $g_S(x_S)$ به پیش‌بینی انجام شده با استفاده از ورودی x_S اشاره دارد. در این پژوهش، از تحلیل SHAP برای کسب درک بهتر از تأثیر متغیرهای ورودی بر خروجی مدل بهره گرفته شد.

۲-۸- معیارهای ارزیابی مدل‌سازی

در این پژوهش، ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^{۲۶} و ضریب تعیین (DC)^{۲۷} که به‌ترتیب براساس معادلات (۱۵) و (۱۶) محاسبه شدند، انجام شد. مقدار DC در بازه $-\infty$ تا 1 و مقدار RMSE در محدوده 0 تا $+\infty$ قرار دارد (Nash and Sutcliffe, 1970).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (15)$$

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (16)$$

که x_i : مقدار مشاهده شده، \hat{x}_i : مقدار محاسبه شده توسط مدل و \bar{x} : میانگین داده‌های مشاهده شده با تعداد n هستند. در مدل‌سازی، مقادیر شاخص نزدیک به 1 برای DC و مقادیر شاخص نزدیک به صفر برای RMSE موردنظر است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج مدل‌سازی FFNN و LSTM از طریق انتخاب

ورودی‌های غالب

در مدل‌سازی‌های انجام‌گرفته در این تحقیق، از تکنیک‌های CC و MI برای انتخاب ورودی‌ها استفاده شد. روش CC بر ارزیابی ارتباط خطی تمرکز داشت، درحالی‌که MI روابط غیرخطی بین ویژگی‌های ورودی و هدف را بررسی کرد. BODeff و CODeff با تأخیرهای یک روزه و هفت روزه بر اساس نمودارهای PACF (شکل ۲)، به‌عنوان ورودی مؤثر در تمامی مدل‌سازی‌ها گنجانده شدند. ویژگی‌هایی که اطلاعات آن‌ها از تصفیه‌خانه دریافت شد دارای مقادیر غیرصفر برای CC هستند و این نشان‌دهنده وجود همبستگی بین تمامی ورودی‌ها با ویژگی‌های هدف است. Tinf و Tair دارای همبستگی منفی با پارامترهای هدف هستند؛ زیرا افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها در فرآیندهای بیولوژیکی در دماهای بالاتر منجر به تجزیه سریع‌تر مواد آلی و کاهش BODeff می‌شوند. دماهای بالا هم‌چنین واکنش‌های شیمیایی را تسریع می‌کنند که می‌تواند دلیلی بر کاهش CODeff باشد. در نهایت بیش‌ترین مقادیر CC و MI به‌عنوان ویژگی‌های ورودی به مدل انتخاب شدند که در جدول ۲ قابل مشاهده است.

مدل‌سازی، یک‌بار دیگر با حضور تمامی ویژگی‌های موجود به‌طور هم‌زمان انجام شد تا ترتیب اهمیت ویژگی‌ها و تأثیر آن‌ها بر نتایج با استفاده از الگوریتم SHAP مشخص شود. در این فرآیند مدل‌سازی، ۷۵ درصد از داده‌ها به‌منظور آموزش و ۲۵ درصد باقی‌مانده برای آزمایش شبکه به‌کار گرفته شد. تعداد نورون‌های لایه پنهان و تعداد دوره‌های آموزش در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر بهینه برای هر کدام، از طریق فرآیند آزمون و خطا شناسایی و تنظیم شده‌اند.

جدول ۲- نتایج مدل‌سازی مبتنی بر FFNN و LSTM با ترکیب‌های مختلفی از ورودی‌های انتخاب شده توسط CC و MI

RMSE (mg/lit)		DC		دوره ها و تعداد واحد های مخفی LSTM	RMSE (mg/lit)		DC		دوره و ساختار شبکه FFNN	پارامتر هدف	ورودی‌ها	تکنیک انتخاب ویژگی‌های غالب
آموزش	آزمایش	آموزش	آزمایش		آموزش	آزمایش	آموزش	آزمایش				
۰/۳۱	۰/۲۵	۰/۸۳۱۶	۰/۸۹	۴۰ ۳	۰/۳۱	۰/۲۷	۰/۸۲۵۰	۰/۸۷۱۱	۱۱۰ ۷-۴-۱	BOD _{eff}	BOD inf COD inf BOD eff(t-1) BOD eff(t-7) TSS inf T inf T air	CC
۰/۵۲	۰/۴	۰/۸۳۱۲	۰/۹۱۵۱	۲۰ ۶	۰/۵۵	۰/۴۳	۰/۸۱۱۱	۰/۸۹	۱۱۰ ۷-۵-۱	COD _{eff}	BOD inf COD inf COD eff(t-1) COD eff(t-7) TSS inf T inf T air	
۰/۳	۰/۲۴	۰/۸۴۳۲	۰/۹۰۳۱	۵۰ ۸	۰/۲۸	۰/۲۵	۰/۸۵۵۴	۰/۸۹	۱۱۰ ۷-۶-۱	BOD _{eff}	BOD eff(t-1) BOD eff(t-7) TDS inf E.C inf VSS inf T inf T air	
۰/۴۸	۰/۴	۰/۸۵۴۲	۰/۹۱۲۱	۴۰ ۷	۰/۵۲	۰/۴۲	۰/۸۳	۰/۹۰۳۳	۱۳۰ ۷-۷-۱	COD _{eff}	COD eff(t-1) COD eff(t-7) TDS inf VSS inf E.C inf T inf T air	MI
۰/۳۱	۰/۲۴	۰/۸۲۹۱	۰/۸۹۷۰	۴۰ ۴	۰/۳۲	۰/۲۷	۰/۸۱۴۹	۰/۸۷۱۱	۶۰ ۱۱-۸-۱	BOD _{eff}	BOD inf COD inf BOD eff(t-1) BOD eff(t-7) TSS inf TDS inf E.C inf VSS inf PH inf T inf T air	ALL Features
۰/۵۴	۰/۴۱	۰/۸۱۷۰	۰/۹۰۹۱	۳۰ ۶	۰/۵۳	۰/۴۷	۰/۸۲۱۷	۰/۸۸۰۷	۹۰ ۱۱-۷-۱	COD _{eff}	BOD inf COD inf COD eff(t-1) COD eff(t-7) TSS inf TDS inf E.C inf VSS inf PH inf T inf T air	

TDS در هر میلی‌گرم از فاضلاب و ضرب آن در ضریب تبدیل محاسبه شده، می‌توان تخمینی عملی از محتوای EC فاضلاب به‌دست آورد (Tkachuk, 1977). نتایج ضریب تبدیل برای ANN و LSTM مشابه به‌دست آمد، که نشان دهنده پایداری و دقت هر دو مدل در تخمین رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی است. این مقادیر در محدوده مناسب قرار دارند و بیانگر دقت مدل‌ها در تخمین روابط بین این پارامترها هستند. ضریب تبدیل BOD به COD برابر ۱/۶۶ و ۱/۶۵ نشان می‌دهد که COD تقریباً ۶۶٪ بیش‌تر از BOD است؛ زیرا شامل ترکیبات آلی تجزیه‌ناپذیر نیز می‌شود. همچنین، ضریب تبدیل TDS به EC برابر ۱/۳۲ و ۱/۳۳ است که بیانگر تأثیر یون‌های حل شده بر هدایت الکتریکی است و می‌تواند بسته به ترکیب نمونه‌ها متغیر باشد.

جدول ۳- ضرایب تبدیل به‌دست آمده توسط ANN و LSTM

ضریب تبدیل TDS → EC	ضریب تبدیل BOD → COD	روش
۱/۳۲	۱/۶۶	ANN
۱/۳۳	۱/۶۵	LSTM

۳-۳- توضیح اهمیت ویژگی‌ها

با توجه به ماهیت مدل‌های LSTM و FFNN بررسی نحوه تأثیر دقیق ورودی‌ها بر خروجی‌ها امکان‌پذیر نیست. به‌همین دلیل برای تحلیل اهمیت ویژگی‌های ورودی، نیاز به استفاده از یک الگوریتم مزاد بر مدل‌ها مانند تحلیل SHAP وجود دارد. تصویر نحوه تأثیر هر ویژگی ورودی بر نتایج مدل‌های آموزش دیده با نمودار خلاصه (Summary) SHAP انجام شده است (شکل ۷). همان‌طور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، محور x نمایانگر مقادیر SHAP است، که مقادیر مثبت، عامل افزایش دهنده پیش‌بینی مدل و مقادیر منفی، عامل کاهش دهنده پیش‌بینی مدل می‌شوند. در واقع، مقدار SHAP مثبت یا منفی‌تر در نمودار Summary، نشان‌دهنده تأثیر قوی‌تر آن ویژگی در افزایش یا کاهش پیش‌بینی است. قسمت‌های قرمز و آبی به ترتیب مقادیر بالا و کم ثبت شده از ویژگی‌ها در تصفیه‌خانه را نشان می‌دهند. در واقع نقاط رنگی، نشانگر داده‌های مشاهداتی هستند. در محور y، ویژگی‌ها به ترتیب از بالا به پایین از نظر میزان اهمیت چیده شده‌اند، به طوری که $BOD_{eff}(t-1)$ و $COD_{eff}(t-1)$ به عنوان تأثیرگذارترین ویژگی‌ها در نتایج مدل‌سازی شناخته می‌شوند. با توجه به ماهیت اتورگرسیو این فرآیند و نیاز میکروارگانیسم‌ها به زمان برای انجام فعالیت‌های بیولوژیکی، شرایطی فراهم می‌شود که میکروارگانیسم‌ها فرصت کافی برای اکسیداسیون مواد آلی موجود در فاضلاب داشته باشند. این

بررسی مقادیر به‌دست آمده DC و RMSE (جدول ۲)، نشان می‌دهد که LSTM عملکرد بهتری نسبت به FFNN از خود دارد، که نشان‌دهنده بهبود کلی در نتایج است. به‌دلیل ماهیت غیرخطی تصفیه‌خانه و همچنین ماهیت غیرخطی مدل‌های مورد استفاده، انتخاب ویژگی‌ها با استفاده از تکنیک MI نتایج بهتری نسبت به تکنیک CC ارائه می‌دهد. دلیل این امر، انتخاب ویژگی‌هایی است که دارای همبستگی غیرخطی بالایی با ویژگی‌های هدف در فرآیند مدل‌سازی هستند. کاهش تعداد ورودی‌ها به مدل با به‌کارگیری روش‌های گوناگون، باعث می‌شود که مدل بهتر بتواند آموزش ببیند و سبب بهبود نتایج شود. با مقایسه شکل ۵ و پارامترهای تعیین شده توسط MI، می‌توان نتیجه گرفت ویژگی‌هایی که با استفاده از روش MI برای ورودی برگزیده شده بودند، تا حدودی توسط روش SHAP نیز به عنوان ویژگی‌های مهم در مدل نشان داده شدند. در واقع، می‌توان نتیجه گرفت که مناسب‌ترین روش برای انتخاب ورودی در مدل‌ها و فرآیندهایی که ماهیت غیرخطی دارند، روشی است که بتواند ویژگی‌های ورودی را براساس ارتباط غیرخطی بین آن‌ها و ویژگی هدف انتخاب کند. نتایج مدل‌سازی با استفاده از ANN و LSTM نشان داد که دقت مدل‌ها متناسب با توزیع داده‌ها که در جدول ۱ آورده شده است، بوده و معیارهای ارزیابی نشان دادند که مدل‌ها توانسته‌اند با دقت قابل‌قبولی روند تغییرات داده‌های کیفی فاضلاب را پیش‌بینی نمایند. لازم به ذکر است که مدل‌های ANN و LSTM معمولاً با داده‌های پایدار و کم‌نویز عملکرد بهتری دارند. پراکندگی زیاد داده‌ها باعث می‌شود مدل در یادگیری الگوهای مشخص دچار مشکل شود.

۳-۲- محاسبه ضریب تبدیل با استفاده از مدل‌های

مبتنی بر هوش مصنوعی

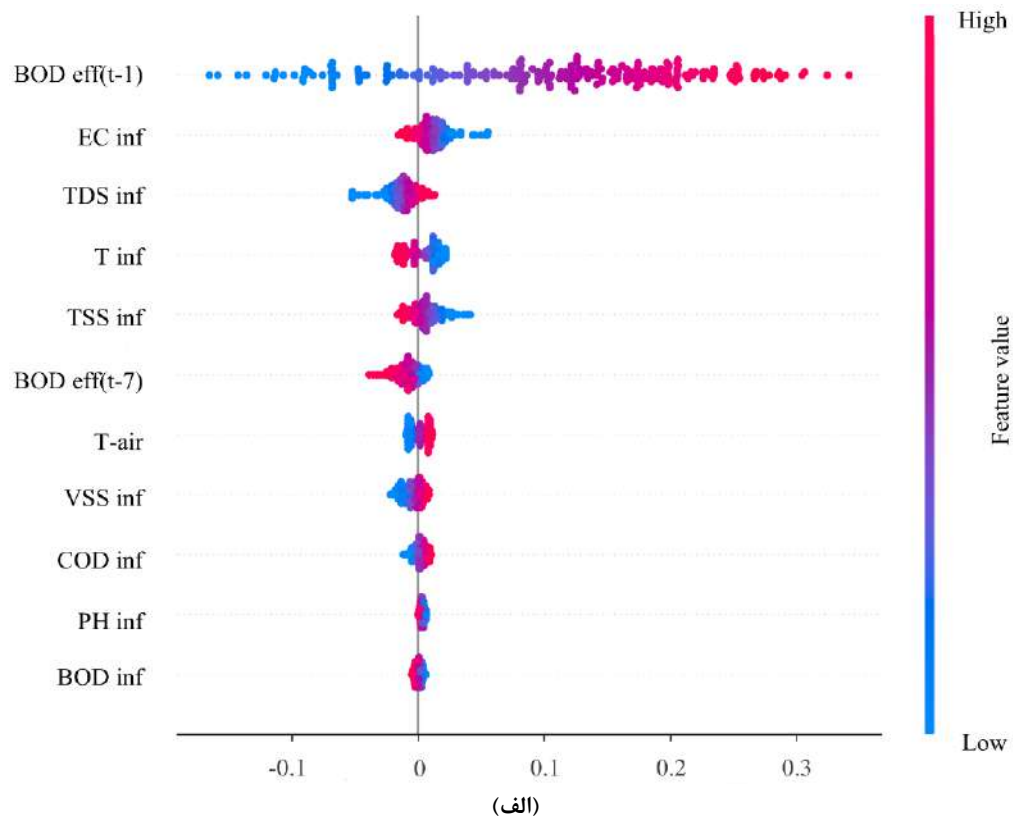
هدف از محاسبه ضریب تبدیل، یافتن یک رابطه تجربی بین متغیرها است. این ضریب می‌تواند به عنوان یک معیار ساده برای تخمین یک متغیر بر اساس متغیر دیگر مورد استفاده قرارگیرد. به عنوان مثال، اندازه‌گیری این ضریب به دلیل این که برخی از پارامترها ممکن است به سادگی اندازه‌گیری نشوند یا هزینه و زمان بالایی برای آزمایش داشته باشند، اهمیت دارد.

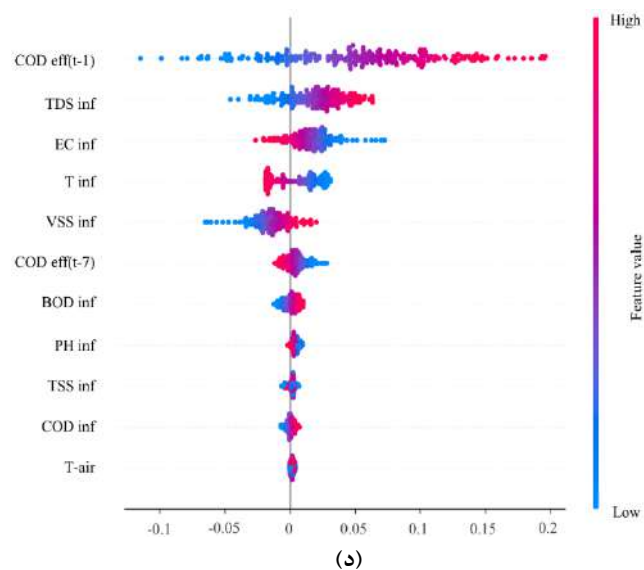
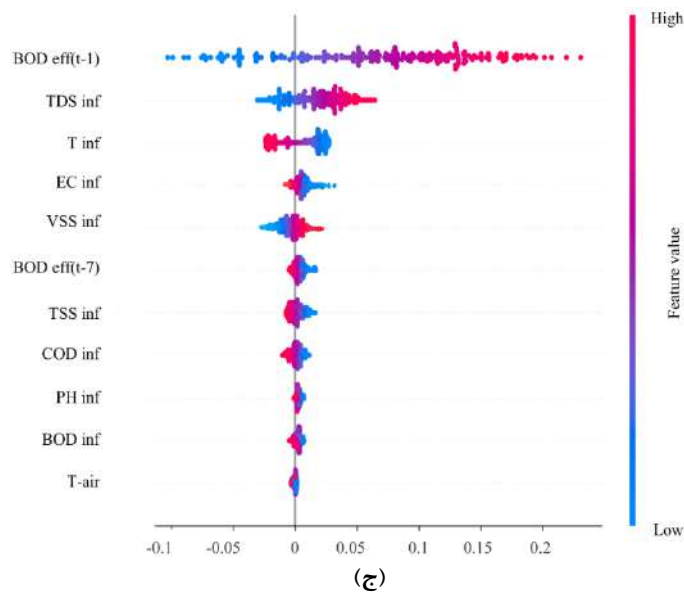
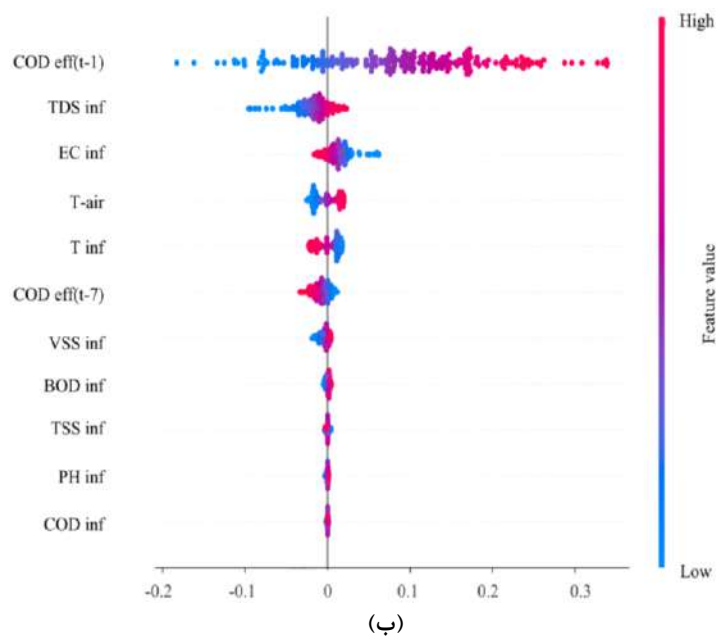
برای تعیین این ضرایب به جای استفاده از روابط خطی و تجربی سنتی، بهتر است از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی بهره گرفت. این مدل‌ها به دلیل قابلیت شناسایی روابط غیرخطی بین متغیرها می‌توانند ضریب تبدیل را با دقت بیشتری تخمین بزنند. نتایج به‌دست آمده برای مقادیر محاسبه شده از ضرایب تبدیل بین پارامترهای BOD و COD، همچنین بین پارامترهای TDS و EC در جدول ۳ ارائه شده است. در واقع، به طور مثال، با تعیین مقدار

واکنش‌های شیمیایی مختل شود. کاهش عملکرد این میکروارگانیسم‌ها منجر به کند شدن فرآیند تجزیه مواد آلی شده و در نتیجه، مقادیر BOD و COD کاهش می‌یابد. به‌همین دلیل با افزایش EC، پیش‌بینی‌های مدل نیز کاهش پیدا می‌کند. T_{inf} نیز یکی از عوامل با تأثیر زیاد در خروجی‌های مدل است و تأثیر معکوس دارد؛ به این معنا که با افزایش دما که موجب بالا رفتن فعالیت میکروارگانیسم‌ها می‌شود، فرآیند اکسیداسیون سریع‌تر انجام می‌گیرد و این می‌تواند عاملی برای عدم فرصت لازم برای اکسیژن‌خواهی باشد. مدل LSTM با توجه به این‌که توانایی بالایی در مدل‌سازی داده‌های وابسته به زمان و سری‌های زمانی دارد، عملکرد بهتری در تحلیل تأثیر ویژگی‌های دخیل در مدل‌سازی روابط غیرخطی دارد. در مقابل FFNN بیش‌تر تحت تأثیر ویژگی‌هایی است که تأثیر مستقیم بر روند مدل‌سازی دارند. با توجه به نتایج بالای معیارهای ارزیابی، می‌توان گفت که مدل‌ها الگوهای تغییرات فاضلاب را به‌خوبی پردازش کرده‌اند. بررسی نمودارهای SHAP نشان می‌دهد که مدل تأثیر دما و متغیرهای بیولوژیکی را در نظر گرفته و فعالیت میکروارگانیسم‌ها را به‌درستی درک کرده است. علاوه بر این، از آن‌جا که افزایش یا کاهش دما تأثیر معکوسی بر مقدار پیش‌بینی شده پارامترهای هدف دارد، می‌توان نتیجه گرفت که مدل توانسته است اثر دما بر فعالیت میکروبی را به‌درستی یاد بگیرد.

زمان‌بندی مناسب امکان می‌دهد فرآیندهای بیولوژیکی به‌طور کامل اجرا شوند و مواد آلی به‌شکل مؤثری تجزیه شوند. برای ویژگی‌های $BOD_{eff}(t-1)$ و $COD_{eff}(t-1)$ مشخص شده است که با بالا رفتن مقادیر اندازه‌گیری شده برای این ویژگی‌ها، مقدار SHAP و نیز مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل ارتقا می‌یابد. با در نظر گرفتن این موضوع که، عملیات تجزیه مواد آلی توسط میکروارگانیسم‌ها معمولاً در فاصله زمانی کوتاه اتفاق می‌افتد، تأثیر تأخیر یک روزه بیش‌تر از تأخیر هفت روزه در نتایج مدل‌سازی BOD_{eff} و COD_{eff} است.

باتوجه به شکل ۷، TDS، که نشان‌دهنده کل مواد جامد محلول در آب است و شامل یون‌ها، مواد معدنی و آلی بوده و برای ارزیابی کیفیت استفاده می‌شود، به‌عنوان یکی از ویژگی‌هایی است که تأثیر زیادی در مدل‌سازی BOD_{eff} و COD_{eff} دارد. بالا بودن میزان این ویژگی نشان‌دهنده آن است که مقدار زیادی از مواد آلاینده در فاضلاب است و سطح اکسیژن بالایی لازم است تا این مواد آلاینده تجزیه شوند. در نتیجه، با افزایش مقادیر مشاهده‌شده برای این ویژگی، پیش‌بینی‌های مدل نیز روند افزایشی پیدا می‌کنند. با دقت در شکل ۷، می‌توان مشاهده کرد که EC نیز یک ویژگی تأثیرگذار در نتایج به‌دست آمده از مدل‌ها است. افزایش مقدار EC معمولاً نشان‌دهنده وجود مقادیر بالایی از نمک‌ها و یون‌ها است. میکروارگانیسم‌هایی که مسئول تجزیه مواد آلی هستند، ممکن است تحت تأثیر این یون‌ها قرارگیرند و عملیات تجزیه و





شکل ۷- نمودار Summary از SHAP برای مدل‌سازی FFNN: الف) BOD eff; ب) COD eff; و برای مدل‌سازی LSTM: ج) BOD eff; و د) COD eff، شامل تمام ویژگی‌های ورودی

مشخص شدن ویژگی‌های تأثیرگذار در فرآیند پیش‌بینی، این امکان را می‌دهند که با تمرکز بر روی ویژگی‌های مهم از هزینه‌های اضافی برای جمع‌آوری و پیش‌پردازش داده‌ها جلوگیری شود و با شناسایی عوامل آلوده‌کننده مهم از تخلیه پساب آلوده به محیط‌زیست جلوگیری شود و بتوان با تولید پسابی مناسب، از آن در صنایع گوناگون استفاده کرد. اغلب پژوهش‌ها از SHAP برای تفسیر مدل‌های کلاسیک استفاده کرده‌اند، مطالعات کم‌تری به تحلیل مدل‌های LSTM و FFNN در پیش‌بینی متغیرهای تصفیه‌خانه فاضلاب پرداخته‌اند؛ به‌ویژه مطالعاتی که مستقیماً بر پساب تصفیه‌خانه فاضلاب متمرکز باشند. زیرا بیش‌تر تحقیقات مشابه از SHAP، در مدل‌سازی کیفیت آب‌های سطحی یا رودخانه‌ها استفاده کرده‌اند.

لازم‌به‌ذکر است که یکی از محدودیت‌های این پژوهش، پیچیدگی بالای مدل LSTM در مقایسه با FFNN است که منجر به نیاز به حجم داده‌های بیش‌تر برای آموزش و افزایش زمان پردازش می‌شود. این مسئله می‌تواند کاربرد عملی این مدل را در شرایطی که داده‌های کافی در دسترس نیست یا نیاز به پردازش سریع‌تر وجود دارد، محدود نماید. هم‌چنین این تحقیق بر روی داده‌های تصفیه‌خانه تبریز انجام شده است. بنابراین، ممکن است نتایج آن به سایر تصفیه‌خانه‌ها با شرایط و ترکیب فاضلاب متفاوت قابل‌تعمیم نباشد. در تحقیقات آتی، پیشنهاد می‌شود تأثیرات سایر ویژگی‌های ورودی به تصفیه‌خانه نیز مورد بررسی قرارگیرد. هم‌چنین می‌توان از سایر مدل‌های هوش مصنوعی برای مقایسه نتایج پیش‌بینی شده استفاده شود. می‌توان از تحلیل موجک برای تجزیه سری‌های زمانی به مؤلفه‌های مختلف استفاده کرد و این مؤلفه‌ها به‌عنوان ورودی مدل‌ها به کار گرفته شوند. سپس، از روش SHAP برای تحلیل مؤلفه‌های موجک و از چندین روش توضیح‌پذیری مدل برای افزایش دقت تحلیل ویژگی‌های ورودی استفاده شود.

۵- قدردانی

از جناب آقای دکتر رضا شهیدی زنوز و سازمان آب و فاضلاب تبریز که با همکاری ارزشمند خود در فراهم‌سازی داده‌های مورد نیاز این تحقیق نقش به‌سزایی داشتند، صمیمانه قدردانی و تشکر می‌نمایم.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Artificial Neural Network
- 2- Deep Neural Network

از مهم‌ترین اقدامات برای کنترل و مدیریت بخش آب و فاضلاب، پیش‌بینی عملکرد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و عوامل تأثیرگذار بر آن‌ها است. از این‌رو در این پژوهش، برای شناسایی اهمیت ویژگی‌های دخیل در میزان BOD و COD پساب، از مدل‌های FFNN و LSTM برای مدل‌سازی BODeff و CODeff تصفیه‌خانه تبریز استفاده شد. با استفاده از روش SMA، نویزهای احتمالی موجود در داده‌های مورد استفاده حذف شدند. از روش‌های CC و MI استفاده شد تا ورودی‌های غالب برای مدل‌ها از بین سایر ویژگی‌ها انتخاب شوند. ویژگی‌های ورودی با بالاترین میزان CC و MI انتخاب شدند. با توجه به روابط غیرخطی مدل‌های FFNN و LSTM، نتایج حاکی از آن است که انتخاب ورودی با استفاده از روش MI بهتر از روش CC عمل کرد و توانست عملکرد مدل‌سازی BODeff و CODeff را در مرحله آزمایش به‌ترتیب، به‌میزان ۳/۵۵٪ و ۲/۲۷٪ در مدل FFNN و ۵/۱۲٪ و ۲/۶۹٪ در مدل LSTM افزایش دهد. LSTM با در نظر گرفتن گام‌های زمانی قبلی در مدل‌سازی سری زمانی عملکرد بهتری نسبت به FFNN داشت و هم‌چنین کاهش تعداد ویژگی‌ها سبب بهبود نتایج در مقایسه با حضور همه ویژگی‌ها شد.

بررسی نمودارهای SHAP نشان داد، در میان روش‌های مورد استفاده در این تحقیق برای انتخاب ورودی به مدل، روش MI به‌دلیل تطابق بیش‌تری که با ویژگی‌های تعیین‌شده توسط SHAP دارد، مناسب‌تر از روش CC برای انتخاب ورودی به مدل است؛ زیرا روش SHAP با تعیین نوع تأثیر ورودی‌ها پس از مدل‌سازی و این‌که کدام ویژگی باعث کاهش یا افزایش نتیجه پیش‌بینی شده توسط مدل می‌شود، بهتر می‌تواند برای انتخاب ورودی‌های مناسب راهنمایی کند.

برای ارائه تفسیری از مدل‌های جعبه سیاه استفاده شده در تحقیق و بررسی نحوه تأثیرگذاری ویژگی‌های ورودی بر نتایج مدل، از الگوریتم SHAP، که به‌عنوان یکی از روش‌های نوین در حوزه XAI شناخته می‌شود، پس از اجرای مدل‌سازی با در نظر گرفتن تمام پارامترها، استفاده شد. شکل‌های summary نشان داد که BODeff(t-1) و CODeff(t-1) به‌ترتیب، با سهم تقریبی ۵۶٪ و ۵۵٪ در نتایج FFNN، و ۵۰٪ و ۴۰٪ در نتایج LSTM به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌ها شناسایی شدند که با افزایش مقادیر ثبت شده برای این ویژگی‌ها در تصفیه‌خانه، مقادیر پیش‌بینی مدل‌ها نیز افزایش یافت. هم‌چنین TDS و EC به‌عنوان ویژگی‌های با تأثیر زیاد شناخته شدند که در تصفیه‌خانه برای بهینه شدن عملیات تصفیه و تولید پساب با کیفیت بهتر باید مورد توجه قرارگیرند.

Bourahla, M.Z., and Bourahla, M., (2023), "Sewer systems control using internet of things and explainable artificial intelligence", In: Drias, H., Yalaoui, F., Hadjali, A. (Eds.), *Artificial Intelligence Doctoral Symposium, Communications in Computer and Information Science*, Springer Nature, Singapore, 207-220, https://doi.org/10.1007/978-981-99-4484-2_16.

Danesh, T., Ouaret, R., Floquet, P., and Negny, S., (2022), "Interpretability of neural networks predictions using accumulated local effects as a model-agnostic method", In: *Computer Aided Chemical Engineering*, Elsevier, 1501-1506, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95879-0.50251-4>.

Dosilovic, F.K., Brcic, M., and Hlupic, N., (2018), "Explainable artificial intelligence: A survey", *41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, IEEE, Opatija, 0210-0215, <https://doi.org/10.23919/MIPRO.2018.8400040>.

El-Rawy, M., Abd-Ellah, M.K., Fathi, H., and Ahmed, A.K.A., (2021), "Forecasting effluent and performance of wastewater treatment plant using different machine learning techniques", *Journal of Water Process Engineering*, 44, 102380, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102380>.

Gao, Z., Gu, B., and Lin, J., (2008). "Monomodal image registration using mutual information based methods", *Image and Vision Computing*, 26, 164-173, <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2006.08.002>.

Hassija, V., Chamola, V., Mahapatra, A., Singal, A., Goel, D., Huang, K., Scardapane, S., Spinelli, I., Mahmud, M., and Hussain, A., (2024), "Interpreting black-box models: a review on explainable artificial intelligence", *Cognitive Computation*, 16, 45-74, <https://doi.org/10.1007/s12559-023-10179-8>.

Hochreiter, S., and Schmidhuber, J., (1997), "Long short-term memory", *Neural Computation*, 9, 1735-1780, <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.

Huang, B., and Mujumdar, A.S., (1993), "Use of neural network to predict industrial dryer performance", *Drying Technology*, 11, 525-541, <https://doi.org/10.1080/07373939308916842>.

Li, Z., Peng, F., Niu, B., Li, G., Wu, J., and Miao, Z., (2018), "Water quality prediction model combining sparse auto-encoder and LSTM network", *IFAC-PapersOnLine*, 51, 831-836, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.091>.

Mjalli, F.S., Al-Asheh, S., and Alfadala, H.E., (2007), "Use of artificial neural network black-box modeling for the prediction of wastewater treatment plants performance", *Journal of Environmental Management*, 83, 329-338, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.03.004>.

Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V., (1970), "River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles", *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).

Nourani, V., and Behfar, N., (2021), "Multi-station runoff-sediment modeling using seasonal LSTM

- 3- Long Short-Term Memory
- 4- Recurrent Neural Network
- 5- Explainable Artificial Intelligence
- 6- Shapley Additive Explanation
- 7- Extreme Gradient Boosting
- 8- Feature Importance
- 9- Variance Inflation Factor
- 10- Correlation Coefficient
- 11- Mutual Information
- 12- Feed Forward Neural Network
- 13- Chemical Oxygen Demand
- 14- Biological Oxygen Demand
- 15- Suspended Solids
- 16- Total Suspended Solids
- 17- Total Dissolved Solids
- 18- Volatile Suspended Solids
- 19- Electrical Conductivity
- 20- Air Temperature
- 21- Influent Temperature
- 22- Effluent BOD and COD
- 23- Partial Autocorrelation Function
- 24- Simple Moving Average
- 25- Back Propagation
- 26- Root Mean Square Error
- 27- Determination Coefficient

۷- مراجع

اصغری، پ.، نورانی، و.، شرقی، ا.، و بهفر، ن.، (۱۴۰۰). "استفاده از مدل ترکیبی برای بهبود عملکرد روش‌های ANN، ANFIS و SVR در تخمین پارامترهای BOD و COD پساب تصفیه‌خانه فاضلاب"، *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، ۵۳(۱)، ۴۶۸۳-۴۷۰۲، <https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18441.6873>.

اصول دینی، ن.، علی، م.، و عبداله‌زاده، م.، (۱۴۰۳). "تأثیر میدان الکتریکی پالسی (PEF) در غیرفعال نمودن عوامل بیولوژیکی در فرآیند پساب تصفیه‌خانه‌های متداول آب"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۹(۳)، ۴۲-۵۰، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2024.422486.1379>.

علمی، م.ت.، حجابی، ن.، نورانی، و.، ناقبیان، س.م.، (۱۴۰۰). "بررسی کارایی روش‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی عملکرد تصفیه‌خانه فاضلاب (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه فاضلاب شهر تبریز)"، *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، ۵۳(۳)، ۱۰۳۳-۱۰۴۸، <https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16757.6334>.

نورانی، و.، (۱۳۹۴). *مبانی هیدروانفورماتیک*، انتشارات دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

Adadi, A., and Berrada, M., (2018), "Peeking inside the black-box: a survey on explainable artificial intelligence (XAI)", *IEEE Access*, 6, 52138-52160, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2870052>.

- Viola, P., and Wells III, W.M., (1997), "Alignment by maximization of mutual information", *International Journal of Computer Vision*, 24(2), 137-154, <https://doi.org/10.1023/A:1007958904918>.
- Yang, H.H., Vuuren, S.V., Sharma, S., and Hermansky, H., (2000), "Relevance of time-frequency features for phonetic and speaker-channel classification", *Speech Communication*, 31, 35-50, [https://doi.org/10.1016/S0167-6393\(00\)00007-8](https://doi.org/10.1016/S0167-6393(00)00007-8).
- This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.
- 
- models", *Journal of Hydrology*, 601, 126672, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126672>.
- Nourani, V., Khodkar, K., Paknezhad, N.J., and Laux, P., (2022), "Deep learning-based uncertainty quantification of groundwater level predictions", *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(10), 3081-3107, <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02181-7>.
- Nourani, V., Zonouz, R.S., and Dini, M., (2023), "Estimation of prediction intervals for uncertainty assessment of artificial neural network based wastewater treatment plant effluent modeling", *Journal of Water Process Engineering*, 55, 104145, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104145>.
- Núñez, J., Cortés, C.B., and Yáñez, M.A., (2023), "Explainable artificial intelligence in hydrology: Interpreting black-box snowmelt-driven streamflow predictions in an arid andean basin of north-central chile", *Water*, 15(19), 3369, <https://doi.org/10.3390/w15193369>.
- Park, J., Lee, W.H., Kim, K.T., Park, C.Y., Lee, S., and Heo, T.Y., (2022), "Interpretation of ensemble learning to predict water quality using explainable artificial intelligence", *Science of the Total Environment*, 832, 155070, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155070>.
- Park, J., Ahn, J., Kim, J., Yoon, Y., and Park, J., (2022), "Prediction and interpretation of water quality recovery after a disturbance in a water treatment system using artificial intelligence", *Water*, 14(15), 2423, <https://doi.org/10.3390/w14152423>.
- Pisa, I., Santin, I., Morell, A., Vicario, J. L., and Vilanova, R., (2019), "LSTM-based wastewater treatment plants operation strategies for effluent quality improvement", *IEEE Access*, 7, 159773-159786, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2950852>.
- Shapley, L.S., (1953), "A value for n-person games", In: Kuhn, H.W., Tucker, A.W., (Eds.), *Contributions to the Theory of Games (AM-28)*, Volume II. Princeton University Press, 307-318, <https://doi.org/10.1515/9781400881970-018>.
- Sheik, A.G., Malla, M.A., Srungavarapu, C.S., Patan, A.K., Kumari, S., and Bux, F., (2024), "Prediction of wastewater quality parameters using adaptive and machine learning models: A South African case study", *Journal of Water Process Engineering*, 67, 106185, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106185>.
- Svetunkov, I., and Petropoulos, F., (2018), "Old dog, new tricks: A modelling view of simple moving averages", *International Journal of Production Research*, 56(18), 6034-6047, <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1380326>.
- Tkachuk, R. (1977), "Calculation of the nitrogen-to-protein conversion factor", In: *Nutritional Standards and Methods of Evaluation for Food Legume Breeders*, International Development Research Centre (IDRC), Ottawa, 78-81.
- Vilone, G., and Longo, L., (2021), "Notions of explainability and evaluation approaches for explainable artificial intelligence", *Information Fusion*, 76, 89-106, <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2021.05.009>.

Research Paper

مقاله پژوهشی

Modeling and Forecasting the Average Water Consumption of Each Urban Household Unit Affected by the COVID-19 Pandemic: A Case Study of Mazandaran Province

مدل سازی و پیش بینی متوسط مصرف آب هر واحد خانگی شهری متأثر از همه گیری کووید-۱۹: مطالعه موردی استان مازندران

Masoumeh Shirozhan^{1*}, Robabeh Kazemi² and Mohammad Ali Ramezani²

معصومه شیروازن^{۱*}، ربابه کاظمی^۲ و محمدعلی رمضانی^۳

1- Ph.D. in Statistics, Planning and Budgeting Expert, Water and Wastewater Company of Mazandaran Province, Sari, Iran.

۱- دکترای آمار، کارشناس برنامه ریزی و بودجه، شرکت آب و فاضلاب استان مازندران، ساری، ایران.

2- B.Sc. of Information Technology, Planning and Budgeting Expert, Water and Wastewater Company of Mazandaran Province, Sari, Iran.

۲- کارشناسی فناوری اطلاعات، کارشناس برنامه ریزی و بودجه، شرکت آب و فاضلاب استان مازندران، ساری، ایران.

3- Head of Planning and Programming Department, Water and Wastewater Company of Mazandaran Province, Sari, Iran.

۳- رئیس گروه طرح و برنامه، شرکت آب و فاضلاب استان مازندران، ساری، ایران.

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

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

Received: 25/10/2024

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۴

Revised: 26/12/2024

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۱۰/۰۶

Accepted: 29/01/2025

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

© IWVA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

Modeling and forecasting water consumption have long been a key focus of research. While various time series models have been developed to fit average water consumption data, the COVID-19 pandemic with its profound impact on lifestyles and consumption patterns has introduced new challenges for accurate modeling. This study investigates the pandemic's effect on modeling the average water consumption per household unit. It is demonstrated that the COVID-19 intervention represents a significant structural break in water consumption data, and failing to account for it introduces bias and forecasting error. Utilizing an intervention time series analysis for the periods before and after the pandemic, this research studies the average water consumption in the urban sector of Mazandaran province and provides a three-year forecast. The predictions were generated using a segmented regression model with a seasonal trend, based on an inverse-Gaussian distribution. The model's efficiency and adequacy were rigorously validated through residual analysis. The results from the proposed model indicate that, after an initial surge and a peak during the epidemic, average water consumption is expected to return to a pre-existing downward trend, which is projected to continue in the coming years.

مدل سازی و پیش بینی حجم مصرف آب از دیرباز مورد توجه و مطالعه محققین قرار گرفته است. تاکنون مدل های سری زمانی مختلفی برای برازش متوسط مصرف آب معرفی شده است. همه گیری کووید-۱۹ و تأثیر آن بر سبک زندگی و تغییر الگوی مصرف، در مدل سازی متوسط مصرف آب نیز مؤثر است. از این رو در این مقاله، تأثیر همه گیری بر مدل سازی متوسط مصرف آب هر واحد خانگی بررسی شده است. طرح مداخله ای کووید-۱۹ در مدل سازی مصرف آب تأثیر معناداری دارد و حذف اثر همه گیری، باعث ایجاد اربیبی و خطای پیش بینی می شود؛ با در نظر گرفتن دو برهه پیش و پس از همه گیری در سری زمانی مداخله ای، متوسط مصرف آب در استان مازندران، بخش شهری مطالعه شده و مقادیر سه سال آتی آن پیش بینی شده است. مقادیر متوسط مصرف آب با استفاده از مدل رگرسیون قطعه ای با روند فصلی براساس توزیع معکوس گوسین پیش بینی و کارایی و کفایت مدل نیز براساس آنالیز باقی مانده های مدل بررسی می شود. طبق مدل پیشنهادی، متوسط مصرف آب خانگی، پس از یک دوره هیجانی و اوج گیری در دوران همه گیری، به روال نزولی باز می شود و در سال های آتی دوباره روند نزولی آن مشاهده می شود.

Keywords: Water Units, Forecasting, Segmented Regression, Per Capita Consumption, Intervention Plan.

کلمات کلیدی: آحاد آب، پیش بینی، رگرسیون قطعه ای، سرانه مصرف، طرح مداخله ای.

قابل توجهی را در رفتار خانوارها در مصرف آب ایجاد کرده است که در مناطق جنوب و شرق انگلیس در بالاترین حد خود قرار دارد (Abu-Bakar et al., 2021). نتایج بیانگر این است که درک تأثیر الگوی رفتاری تقاضای آب در زمان همه‌گیری و قرنطینه، می‌تواند دقت پیش‌بینی تقاضا را بهبود بخشد.

در پژوهش دیگری مصرف آب پیش و پس از همه‌گیری در ۱۴ ساختمان مسکن اجتماعی واقع در جیون‌ویل در جنوب برزیل مقایسه شد (Cominato et al., 2021). داده‌های تله‌متری از هر آپارتمان در طول همه‌گیری به‌صورت ساعتی جمع‌آوری شده و برای بررسی حجم مصرف آب در طی همه‌گیری، از آزمون ویلکاکسون-من-ویتنی و مدل خطی تعمیم یافته (GLM)^۱ با اثرات مختلط استفاده شد. نتایج مؤید آن بود که همه‌گیری کووید-۱۹ بر مصرف روزانه آب تأثیرگذار بوده و منجر به افزایش اندک و درعین حال قابل توجه تقاضا در سه ماهه اول دوره همه‌گیری شده است.

رضازاده و همکاران (۱۴۰۱)، بررسی مکانی تأثیر شیوع کووید-۱۹ بر مصرف آب را انجام دادند. آن‌ها دوره پیش از شیوع کووید-۱۹ از ابتدای سال ۱۳۹۵ تا بهمن ۱۳۹۸ و دوره پس از شیوع از اسفند سال ۱۳۹۸ تا بهمن سال ۱۳۹۹ در شهر شبستر از استان آذربایجان شرقی را در نظر گرفتند. مراجع دیگر در این زمینه عبارتند از: (Kalbusch et Yunus et al., 2020; Bhowmick et al., 2020; Nemat and Tran, 2022; al., 2020; محمدزاده و مخدومی، ۱۴۰۱).

مدل سری‌های زمانی منقطع (ITS)^۲ برای ارزیابی تأثیر مداخله در داده‌ها شامل مؤلفه‌های پیش و پس از مداخله، به‌کار برده می‌شود. روش ITS، امکان ارزیابی آماری تأثیر یک مداخله برحسب تأثیرات آنی، گذرا یا بلندمدت را فراهم می‌آورد که مدل‌های کلاسیک مانند مدل‌های خودبازگشتی میانگین متحرک (ARMA) و حافظه طولانی کوتاه‌مدت (LSTM) قابلیت مدل‌سازی طرح‌های مداخله‌ای را ندارند. نقاط تغییر در روش ITS، نقاط خاصی هستند که در آن مقادیر سری زمانی تغییری نسبت به الگوی قبل، به‌دلایلی مانند پیشامد یا بلاای واقعی، تغییر سیاست یا مداخله آزمایشی را نشان می‌دهد. در آنالیز ITS، روش رگرسیون قطعه‌ای (SR)^۳ یا به اختصار ITS-SR، برای برآورد اثر مداخله‌ای با اقبال گسترده‌ای روبرو شده است (Bernal et al., Penfold and Zhang, 2013; 2017). مدل SR، یکی از روش‌های تحلیل رگرسیونی است که در آن متغیر مستقل در فواصلی تقسیم و برای هر فاصله یک خط رگرسیونی جداگانه برازش داده می‌شود.

در پژوهشی دیگر با استفاده از مدل ITS، تأثیر بیمه یکپارچه بر هزینه بستری مستقیم بیماران با بیماری‌های مهلک شامل سرانه

تنش و بحران آبی موجود در کشور ایران، محدودیت منابع آبی، کاهش بارندگی‌ها، افزایش جمعیت شهری و بهبود استانداردهای اقتصادی و سبک زندگی، لزوم برنامه‌ریزی‌های صحیح و کارآمد در کاهش مصرف آب و ترغیب به صرفه‌جویی در مصرف این مایه حیاتی را روشن می‌نماید. پیش‌بینی حجم مصرف آب، تصمیم‌گیرندگان را قادر می‌سازد تا چاره‌ای برای تأمین نیاز آبی اندیشیده و راه‌حل‌های جایگزین را ابداع نمایند. از سوی دیگر، هر پیش‌بینی آماری همراه با محدوده‌ای از خطای مورد پذیرش است. هدف اصلی پیش‌بینی، محدود نمودن شکاف بین واقعیت حجم مصرف آب و پیش‌بینی آن در آینده است؛ به‌طوری‌که بتوان به کم‌ترین میزان خطا و بیش‌ترین دقت دست‌یافت. بنابراین دقت پیش‌بینی‌ها در مهار بحران و تنش آبی، نقش غیرقابل‌انکاری را ایفا می‌کند. برای انتخاب راهبرد صحیح مدیریت مصرف آب، لازم است ابتدا عوامل مؤثر بر میزان مصرف آب مورد بررسی قرارگیرد تا راهبرد مدیریتی متناسب با آن انتخاب شود.

در پژوهشی با استفاده از تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰ شامل مصرف سالانه و ماهانه آب، جمعیت، درآمد و عوامل آب و هوایی، مانند میانگین بارش و دما، مدلی برای پیش‌بینی تقاضای آب برای سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۰ در کشور اردن ارائه شد (Alnsour and Ijam, 2023). این مطالعه نشان‌داد که افزایش جمعیت، سطح بالای زندگی اجتماعی و نوسانات دما و بارندگی، منجر به افزایش سطح تقاضای آب شده است.

در سال‌های اخیر، یکی دیگر از عوامل فزاینده مصرف آب، شیوع کووید-۱۹ و ضرورت رعایت پروتکل‌های بهداشتی و وابستگی آن به منبع حیاتی آب است. متعاقب همه‌گیری کووید-۱۹، بررسی این عامل در افزایش حجم و تغییر الگوی مصرف آب در خانواده‌ها، مورد توجه بسیاری از محققین واقع شده است (Sivakumar, 2021). سبزی‌دهخرفانی و همکاران (۱۴۰۲)، با در نظر گرفتن تأثیر همه‌گیری کووید-۱۹ رویکرد جدیدی برای برآورد الگوی مصرف آب خانگی با استفاده از داده‌های جغرافیایی معرفی نمودند؛ به‌طوری‌که داده‌های مصرف آب برای دو سال قبل و یک سال پس از شیوع همه‌گیری، برای شناسایی الگوی مصرف آب در بازه‌های زمانی سالانه و دو ماهه بررسی شد. نتایج نشان‌داد که بیش‌ترین افزایش مصرف، متأثر از همه‌گیری در ماه‌های می تا ژوئن رخ داده است؛ درحالی‌که این تأثیر در طول قرنطینه خانگی به‌صورت کاهشی بوده است.

طی مطالعه‌ای مشخص شد که قرنطینه خانگی تغییرات

$$E(X|T, Y) = F^{-1}(\beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 Y + \beta_3 TY), \quad (1)$$

که X : متغیر پاسخ؛ $E(X|T, Y)$: میانگین متغیر پاسخ، β_0 : پارامتر عرض از مبدا مدل پیش از مداخله، $\beta_0 + \beta_1$: عرض از مبدا مدل در فاز پس از مداخله، β_2 : شیب مدل قبل از مداخله $\beta_2 + \beta_3$: شیب مدل پس از مداخله، X : متغیر پاسخ، $(\cdot)^{-1}$: تابع ربط، T : متغیر زمان و Y : متغیر مداخله‌ای است که در زمان شروع آزمایش برابر با یک و پیش از آن برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

به‌طور کلی، اگر فرض شود X_t سری زمانی از پیشامد مدنظر در زمان t و τ زمان مداخله باشد، آن‌گاه مدل ITS-SR به‌صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$X_t = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 Y_t + \beta_3 (TY_t) + \varepsilon_t, \quad (2) \\ t = 1, 2, 3, \dots, T$$

که پارامترهای β_0 , β_1 , β_2 و β_3 مشابه رابطه (۱) و ε_t نوفه‌های سفید گوسین با واریانس ثابت σ^2 در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن زمان مداخله τ ، متغیر Y_t به‌صورت $Y_t = \begin{cases} 0 & t < \tau \\ 1 & t \geq \tau \end{cases}$ تعریف می‌شود. عبارت چهارم شامل TY_t را می‌توان به‌عنوان اثر متقابل زمان و متغیر مداخله‌ای نیز تفسیر نمود.

۲-۲- مشاهدات متوسط مصرف آب هر واحد خانگی در

حوزه شهری - مطالعه موردی استان مازندران

استان مازندران یکی از استان‌های مبتلا به تنش آبی است و برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری در زمینه مدیریت منابع آبی، کاهش مصرف آب و جلوگیری از هدررفت آب در این استان از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در پیش‌بینی‌ها و مطالعه نیاز آبی استان مازندران، نمی‌توان از جمعیت غیردائم و توریست چشم‌پوشی نمود. جمعیت شهری استان مازندران در حدود ۲/۱ میلیون نفر است که جمعیت شناور حدود ۱/۲۵ میلیون نفر (معادل ۶۰ درصد از کل جمعیت شهری استان) در ایام تعطیلات به ساکنین استان مازندران افزوده می‌شود و باعث ایجاد پیک مصرف در ماه‌های تابستان و تعطیلات می‌شود. از این‌رو، پیش‌بینی متوسط مصرف آب در استان مازندران، در تصمیمات صنعت آب و فاضلاب مؤثر و کاربردی است. طبق اطلاعات سال ۱۴۰۲، حدود ۸۹٪ از حجم مصرف آب شهری در استان مازندران به بخش خانگی اختصاص می‌یابد. متوسط مصرف آب هر واحد خانگی در استان مازندران، طی سال‌های ۱۳۹۶ الی ۱۴۰۲ به‌صورت ماهانه بررسی شده است. بر اساس سامانه مدیریت اطلاعات (MIS) شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، اطلاعات آخرین وضعیت آحاد آب خانگی موجود

هزینه کل بستری، هزینه پرداختی و نسبت بازپرداخت از ژانویه ۲۰۱۴ تا دسامبر ۲۰۱۸ بررسی شدند (Niu et al., 2022). تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی منقطع نشان‌داد که سرانه کل هزینه بستری و سرانه هزینه‌های پرداختی افزایش یافته، اما پس از یکپارچه‌سازی، روند کاهشی تدریجی را نشان‌داد و نسبت بازپرداخت اندکی افزایش یافت که تأثیر محدودی بر کاهش بار مالی بیماران داشته است.

در مدل‌سازی طرح‌های مداخله‌ای، تاکنون مطالعه و تحقیقی در زمینه بررسی تأثیر طرح مداخله غیرقابل کنترل کووید-۱۹ بر مصرف آب ارائه نشده است و هم‌چنین در مدل‌سازی‌های ITS از توزیع گوسین استفاده می‌شود؛ درحالی‌که در این مقاله از توزیع معکوس گوسین، مطابق با ماهیت مشاهدات با مقادیر مثبت، استفاده شده است.

در بخش ۲، مدل سری زمانی ITS-SR و اطلاعات کلی متوسط مصرف آب هر واحد خانگی ارائه شده است. در بخش ۳ با استفاده از مدل مداخله‌ای مدنظر و روند فصلی، متوسط مصرف آب هر واحد خانگی مدل‌سازی و در بخش ۴، با استفاده از آنالیز باقی‌مانده‌های مدل، کفایت مدل در برازش متوسط مصرف آب بررسی شده است. در نهایت در بخش ۵، پس از پالایش و تأیید مدل ITS-SR، مقادیر آتی متوسط مصرف آب به ازای هر واحد خانگی در استان مازندران پیش‌بینی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در مطالعات پدیده‌های واقعی، یک رویداد غیرمنتظره منجر به ایجاد تغییرات عمده در فرآیند می‌شود که می‌توان از آن به‌عنوان فرصتی برای بررسی ماهیت و پویایی فرآیند استفاده نمود. مدل مداخله‌ای به یک طرح کلی برای بررسی اثرگذاری رویکردی خاص بر روند متغیر پاسخ اطلاق می‌شود. مداخله می‌تواند به‌عنوان یک دستورالعمل تحت کنترل مانند اعمال قرنطینه خانگی در زمان همه‌گیری کووید-۱۹ و یا یک رویداد غیرمنتظره مانند شیوع ناگهانی همه‌گیری کووید-۱۹ در نظر گرفته شود. رویکرد کلی در مطالعات مداخله‌ای بر اساس دو دسته از داده‌ها تحت‌عنوان پیش و پس از مداخله معطوف می‌شود و به استنباط‌های آماری در این زمینه می‌انجامد.

۲-۱- معرفی مدل سری زمانی مداخله‌ای با روش رگرسیون

قطعه‌ای

مدل کلی ITS-SR که توسط Wagner et al. (2002) معرفی شده است به‌صورت رابطه (۱) ارائه می‌شود.

واحد) در بخش شهری، حجم مصرف آب خانگی (میلیون مترمکعب) و متوسط مصرف آب خانگی در شبانه‌روز (لیتر بر واحد) در بخش شهری به‌صورت ماهانه، جمع‌آوری و در جدول ۱ خلاصه‌شده است.

جدول ۱- آحاد آب خانگی، حجم مصرف آب خانگی و متوسط مصرف در بخش شهری استان مازندران سال‌های ۱۳۹۶ الی ۱۴۰۲

سال	آحاد آب خانگی (واحد)	حجم مصرف آب خانگی (میلیون مترمکعب)	متوسط مصرف هر واحد خانگی (لیتر بر واحد در شبانه‌روز)
۱۳۹۶	۸۰۸۴۵۵	۱۲۹/۱۱	۴۳۸
۱۳۹۷	۸۴۶۸۷۶	۱۳۱/۸۱	۴۲۶
۱۳۹۸	۸۷۰۶۱۶	۱۳۸/۲۰	۴۳۵
۱۳۹۹	۸۹۳۷۶۳	۱۴۷/۸۶	۴۵۴
۱۴۰۰	۹۱۷۰۵۳	۱۵۳/۰۳	۴۵۷
۱۴۰۱	۹۴۰۶۳۲	۱۵۱/۷۳	۴۴۲
۱۴۰۲	۱۰۰۷۹۷۶	۱۶۰/۵۸	۴۳۶

۱۴۰۲، شامل ۸۴ مشاهده در نظر گرفته‌شده است. برخی آمارهای توصیفی مشاهدات کامل X (هر دو بخش پیش و پس از همه‌گیری)، مشاهدات پیش از همه‌گیری X_1 و مشاهدات پس از همه‌گیری X_2 در جدول ۲ ارائه‌شده است. طبق جدول ۲، در استان مازندران، میانگین و میانه مصرف آب در دوره پس از همه‌گیری کووید-۱۹ نسبت به پیش از آن افزایشی است که براساس رعایت شدید پروتکل‌های بهداشتی و اعمال قرنطینه خانگی، موجه است. مقادیر انحراف استاندارد نیز پراکندگی مشاهدات پس از شیوع کووید-۱۹ را نشان می‌دهد. بنابراین، رویکرد بررسی فرضیه تغییر الگوی مصرف آب و مدل‌سازی طرح مداخله‌ای حائز اهمیت است.

با توجه به سرایت بالای ویروس کووید-۱۹ و لزوم رعایت بهداشت فردی، سطح استانداردهای بهداشتی نیز افزایش یافته است. با افزایش سطح پروتکل‌های بهداشتی و تغییر سبک زندگی، مصرف آب نیز افزایش پیدا کرده است. لذا تأثیر همه‌گیری کووید-۱۹ بر متوسط مصرف آب هر واحد خانگی بررسی می‌شود؛ به‌طوری‌که همه‌گیری کووید-۱۹ به‌عنوان یک طرح مداخله‌ای غیرقابل کنترل در نظر گرفته‌شده است.

به‌منظور بررسی تأثیر همه‌گیری کووید-۱۹، داده‌های متوسط مصرف آب خانگی به دو بخش پیش از همه‌گیری کووید-۱۹ و پس از آن تقسیم می‌شود. داده‌های ماهانه از فروردین ۱۳۹۶ الی اسفند

جدول ۲- آماره‌های توصیفی مشاهدات متوسط مصرف آب هر واحد خانگی در بخش شهری استان مازندران طی سال‌های ۱۳۹۶ الی ۱۴۰۲

مشاهدات	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	چارک اول	میانه	چارک سوم	انحراف استاندارد
کامل	۴۰۱	۵۴۴	۴۴۹/۸	۴۳۰/۵	۴۴۸	۴۶۳/۲	۲۹/۴۳
پیش از همه‌گیری	۴۰۱	۴۹۷	۴۴۳/۱	۴۲۵/۵	۴۳۶/۵	۴۶۳/۲	۲۵/۶۷
پس از همه‌گیری	۴۰۴	۵۴۴	۴۵۹/۹	۴۳۴/۵	۴۵۰/۵	۴۶۵/۸	۳۱/۲۹

۳- نتایج و بحث

آبی برازش مدل GLM از متغیر زمان بدون در نظر گرفتن عامل مداخله‌ای شیوع کووید-۱۹ و خط قرمز برازش مدل ITS-SR بر روی دو بخش پیش و پس از همه‌گیری را نشان می‌دهد. خط قرمز دو مدل SR مجزا در دو برهه زمانی پیش و پس از همه‌گیری را برازش داده است، درحالی‌که خط آبی برای تمامی مشاهدات، یک مدل رگرسیونی ثابت را برازش می‌دهد.

طبق شکل ۱، خط آبی، بیانگر روند صعودی با شیب بسیار ملایم در متوسط مصرف آب خانگی است که متأثر از مقادیر دورافتاده ناشی از همه‌گیری است و تحلیل اشتباهی را نشان می‌دهد؛ در صورتی‌که در واقعیت رفتار مصرف در خانوار اصلاح شده است. برخلاف مدل نامناسب GLM با رنگ آبی، متوسط مصرف آب طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ابتدای سال ۱۳۹۹

در این بخش، با استفاده از رویکرد مدل‌سازی ITS-SR، مشاهدات متوسط مصرف آب هر واحد خانگی بررسی می‌شود، به‌طوری‌که در گام اول مدل ساده ITS-SR و در گام دوم، مؤلفه هارمونیک نیز در مدل‌سازی لحاظ می‌شود.

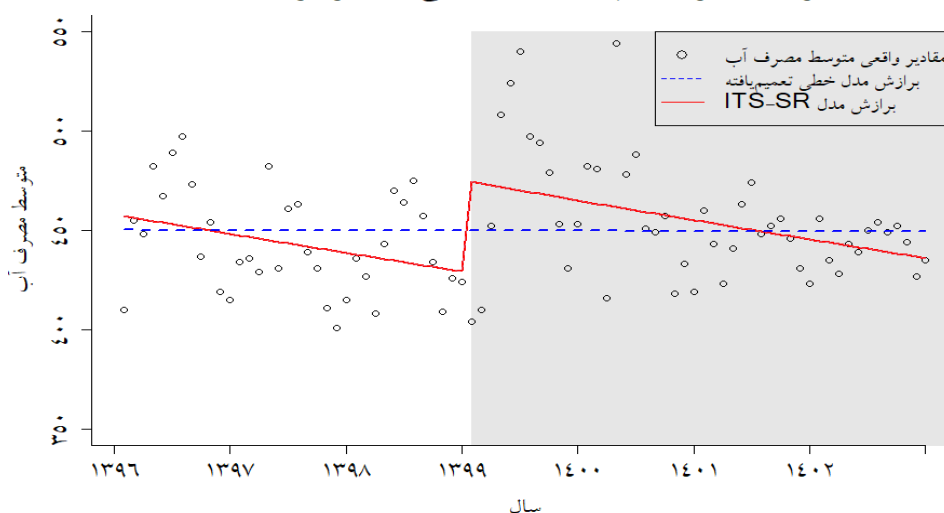
۳-۱- مدل‌سازی آماری سری زمانی متوسط مصرف آب هر واحد خانگی متأثر از همه‌گیری کووید-۱۹

روند متوسط مصرف آب خانگی در استان مازندران در شکل ۱ نمایش داده‌شده است، به‌طوری‌که دوره پس از شیوع کووید-۱۹ با رنگ طوسی مشخص شده است. دایره‌های مشکی مقادیر واقعی، خط

میان مشترکین خانگی استان مازندران است. هم‌چنین پی-مقدار آزمون من-کندال فصلی برای مشاهدات کامل برابر با ۰/۶۸ است که بیانگر عدم وجود روند معنادار در مشاهدات است؛ در صورتی که با تقسیم مشاهدات به دو برهه پیش و پس از همه‌گیری، پی-مقدار آزمون به ترتیب برابر با ۰/۰۳۴ و ۰/۰۲۸ است که بیانگر وجود روند در مشاهدات است.

روند نزولی داشته و به محض شیوع کووید-۱۹ پیک مصرف و قطع روند رخ می‌دهد. پس از کنترل رفتار هیجانی ناشی از همه‌گیری، روند متوسط مصرف آب دوباره به تعادل رسیده و رفتار نزولی را نشان می‌دهد؛ به طوری که دو مدل مجزا بر روی مشاهدات برازش می‌شود. مدل ITS-SR، گویای اثربخشی سیاست‌های کاهش مصرف و فرهنگ‌سازی صرفه‌جویی آب در

سرانه مصرف آب آحاد خانگی - لیتر بر واحد



شکل ۱- مسیر نمونه‌ای متوسط مصرف آب خانگی در بخش شهری استان مازندران از سال ۱۳۹۶ الی ۱۴۰۲

مشاهدات واقعی را مشخص می‌کند.

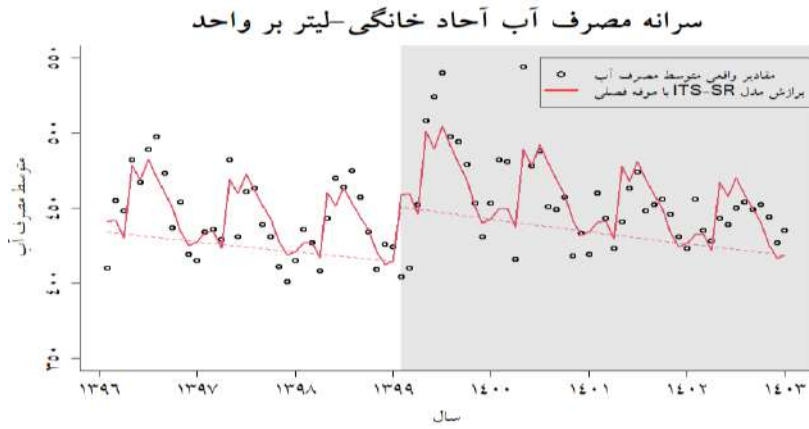
۳-۲- مدل ITS-SR با در نظر گرفتن روند فصلی مشاهدات سری زمانی

مشاهدات سری زمانی ماهانه طبق انتظار، روند تکراری از قبیل روند ماهانه یا فصلی را شامل می‌شود. بنابراین، یکی از مؤلفه‌های مهم در مدل‌سازی مصرف آب، بررسی روند فصلی در مشاهدات است. به منظور مدل‌سازی روند فصلی، در مدل ITS-SR مؤلفه هارمونیک نیز لحاظ می‌شود. با در نظر گرفتن بازه ۱۲ ماهه، عبارت $\varphi_1 \sin\left(\frac{2\pi t}{12}\right) + \varphi_2 \cos\left(\frac{2\pi t}{12}\right)$ به مدل پایه افزوده می‌شود، به طوری که φ_1 و φ_2 پارامترهای مؤلفه هارمونیک هستند. مؤلفه هارمونیک در مدل ITS-SR با استفاده از دستور "harmonic(.)" در بسته آماری "tsModel" در نرم‌افزار "R" تعریف می‌شود. از سوی دیگر، مشاهدات مربوط به متوسط مصرف، تنها مقادیر مثبت را شامل می‌شود، در حالی که توزیع گوسین، بازه اعداد حقیقی مثبت و منفی را در بر می‌گیرد و در برازش متوسط مصرف آب کارایی مناسبی ندارد. توزیع معکوس گوسین با دامنه اعداد حقیقی مثبت، جایگزین مناسبی برای توزیع گوسین است. در شکل ۲، مقادیر متوسط مصرف آب (دایره مشکی) و مقادیر حاصل از مدل‌سازی ITS-SR (منحنی قرمز) بر اساس توزیع معکوس گوسین با الگوی فصلی، نشان داده شده است که به وضوح عملکرد دقیق مدل ITS-SR با روند فصلی در برازش

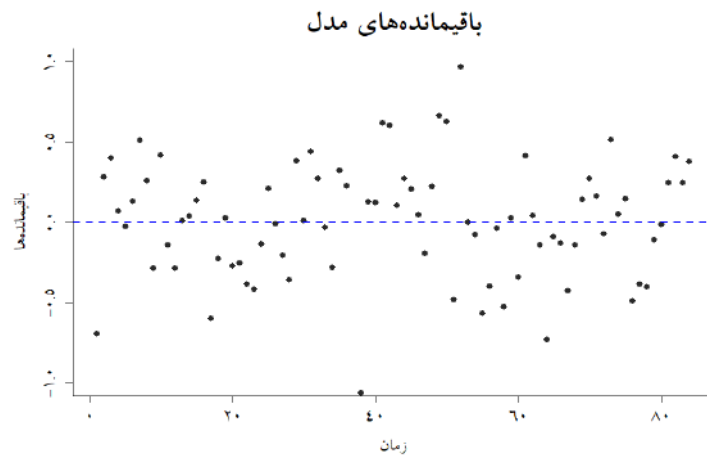
۴- بررسی کفایت مدل ITS-SR فصلی در برازش متوسط مصرف آب خانگی

پس از انتخاب مدل مناسب، لازم است که کارایی و کفایت مدل در برازش داده‌ها نیز بررسی و از لحاظ آماری مورد تأیید قرار گیرد. لذا، با در نظر گرفتن باقی‌مانده‌های مدل $(\hat{\epsilon}_t)$ به صورت تفاضل مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی متوسط مصرف با استفاده از مدل ITS-SR فصلی، کارایی مدل بررسی می‌شود. شکل ۳، مقادیر باقی‌مانده‌های مدل ITS-SR فصلی را نشان می‌دهد که با پراکندگی کمی اطراف مقدار صفر پخش شده است.

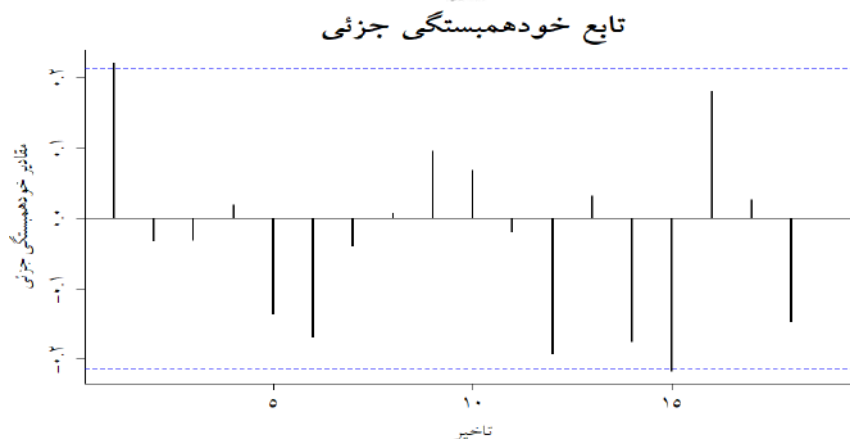
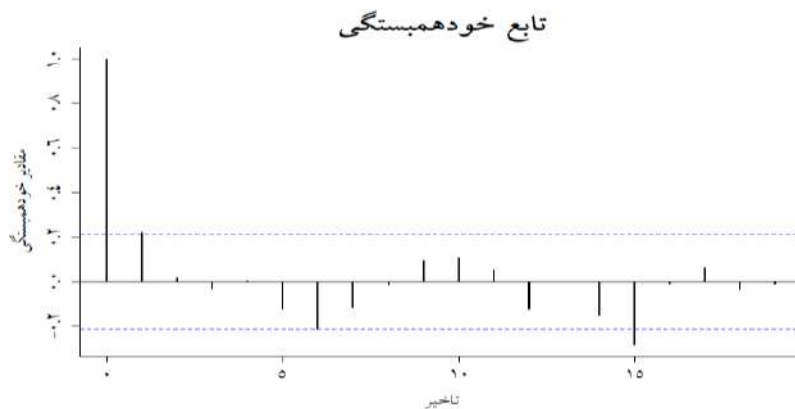
تابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی باقی‌مانده‌های مدل ITS-SR فصلی در شکل ۴ نشان داده شده است که بیانگر تصادفی بودن و کفایت مدل بر اساس آنالیز باقی‌مانده‌ها است. پی-مقدار آزمون لیانگ-باکس برای بررسی عدم همبستگی باقی‌مانده‌های مدل برابر با ۰/۶۴ محاسبه شده است که در سطح معناداری ۵ درصد، عدم همبستگی (تصادفی بودن) باقی‌مانده‌های مدل را تأیید می‌نماید.



شکل ۲- متوسط مصرف آب خانگی و مقادیر پیش بینی با روند فصلی در بخش شهری استان مازندران سال‌های ۱۳۹۶ الی ۱۴۰۲



شکل ۳- نمودار مقادیر باقی مانده‌های مدل ITS-SR در برابر زمان



شکل ۴- تابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی باقی مانده‌های مدل ITS-SR فصلی

روند فصلی،
 - مدل سوم (T, Y) براساس متغیر زمان و مداخله‌ای و بدون در نظر گرفتن روند فصلی،
 - مدل چهارم (روند فصلی، T) بر اساس متغیر زمان و روند فصلی بدون در نظر گرفتن متغیر مداخله‌ای،
 - مدل پنجم (روند فصلی، Y) براساس متغیر مداخله‌ای و روند فصلی بدون در نظر گرفتن متغیر زمان،
 - مدل ششم (T, Y, TY) براساس متغیر زمان، متغیر مداخله‌ای و روند فصلی،
 - مدل هفتم (T, Y, TY) براساس متغیر زمان، متغیر مداخله‌ای و اثر متقابل زمان و مداخله و بدون روند فصلی،
 - مدل هشتم (روند فصلی، T, Y, TY) براساس متغیر زمان، متغیر مداخله، اثر متقابل و روند فصلی، نتایج در جدول ۳ خلاصه شده است.

براساس معیار MAPE و RMSE مدل هشتم با سه متغیر زمان، مداخله‌ای (شیوع همه‌گیری) و اثر متقابل به همراه روند فصلی در مدل نهایی ITS-SR که کم‌ترین مقدار معیار را شامل می‌شود به‌عنوان مدل نهایی پیشنهاد می‌شود و هم‌چنین برای پیش‌بینی از این مدل استفاده خواهد شد. در شکل ۵، مسیر نمونه‌ای متوسط مصرف آب خانگی در حوزه شهری مازندران و هم‌چنین مقادیر پیش‌بینی بر اساس مدل هشتم ITS-SR فصلی، برای سال‌های ۱۴۰۳ تا پایان سال ۱۴۰۵ نشان داده شده است؛ به‌طوری‌که مقادیر واقعی با دایره‌های مشکی، مقادیر پیش‌بینی و روند آن با خط قرمز و مقادیر آبی بر اساس مدل پیشنهادی (مدل هشتم) با خط آبی مشخص شده است.

مقادیر پیش‌بینی برای سال‌های ۱۴۰۳ الی ۱۴۰۵ براساس مدل ITS-SR فصلی در جدول ۴ خلاصه شده است. هم‌چنین، متوسط مصرف آب سالانه برای سال‌های الی ۱۴۰۵ به ترتیب ۴۴۱، ۴۳۵ و ۴۲۹ پیش‌بینی می‌شود. براساس مدل ITS-SR فصلی، به‌طور میانگین متوسط مصرف آب کاهش می‌یابد و می‌توان به کاهش تأثیر شیوع همه‌گیری و اعتدال رفتار هیجانی پس از همه‌گیری در مصرف آب امیدوار بود.

به‌منظور بررسی دقت پیش‌بینی مدل ارائه شده، مشاهدات متوسط مصرف آب هر واحد خانگی به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم می‌شود؛ به‌طوری‌که ۷۲ مشاهده اول برای برآورد پارامترهای مدل و ۱۲ مشاهده آخر برای پیش‌بینی مدل در نظر گرفته و برای هر دو بخش، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^۴ محاسبه می‌شود. مقادیر RMSE درون نمونه (شامل ۷۲ مشاهده اول) و RMSE خارج از نمونه (شامل ۱۲ مشاهده آخر) برابر با ۶/۶۱ و ۷/۳۸ است. مقادیر RMSE بین صفر تا بی‌نهایت متغیر است و مقادیر کوچک‌تر RMSE بیانگر مدل مناسب‌تر است. با در نظر گرفتن بخش آموزش، ضریب نش-ساتکلیف^۵ نیز برابر با ۰/۷۶۷۸ به‌دست آمده است که مقدار بهینه این شاخص برابر با یک است و مقادیر بالاتر از ۰/۵ گویای کفایت مدل در پیش‌بینی مشاهدات است. از این‌رو، طبق ضریب نش-ساتکلیف کارایی مدل تأیید می‌شود.

۵- پیش‌بینی متوسط مصرف آب خانگی براساس

مدل ITS-SR

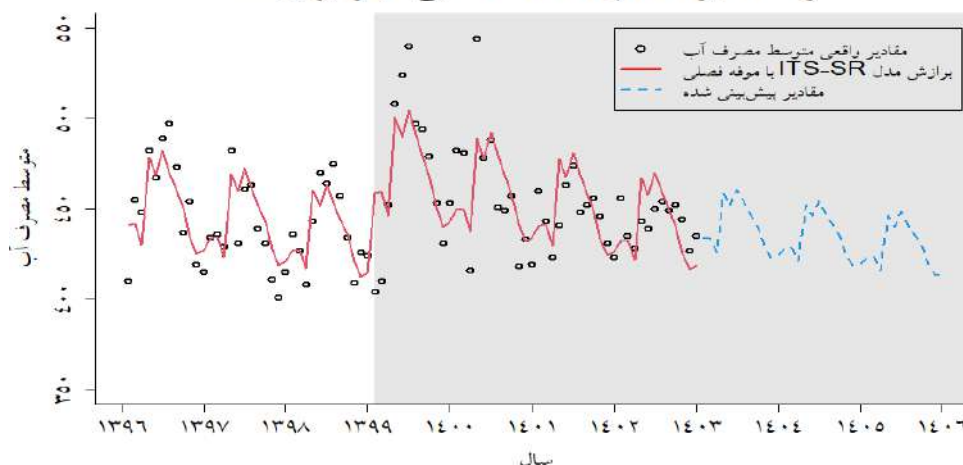
هدف اصلی برازش مدل بر روی سری زمانی، به‌کارگیری آن برای پیش‌بینی‌هایی از آینده فرآیند است که در ارائه برنامه‌های راهبردی نقش مؤثری ایفا می‌نماید. در این بخش، با تکیه بر مدل ITS-SR فصلی، پیش‌بینی‌هایی از آینده سری زمانی متوسط مصرف آب هر واحد خانگی در استان مازندران ارائه شده است. میانگین درصد مطلق خطا (MAPE)^۶ یک معیار ارزیابی میزان دقت پیش‌بینی است؛ به‌طوری‌که مقادیر کوچک MAPE بیانگر دقت بالاتر مدل پیشنهادی است. با در نظر گرفتن توزیع مثبت معکوس گوسین، لزوم به‌کارگیری هر یک از متغیرها در مدل مدنظر بررسی می‌شود و مدل با کم‌ترین مقدار MAPE و RMSE، به‌عنوان مدل نهایی برای پیش‌بینی متوسط مصرف آب خانگی در نظر گرفته می‌شود.

- مدل اول (T) براساس متغیر زمان، بدون در نظر گرفتن متغیر مداخله‌ای و روند فصلی،
 - مدل دوم (Y) براساس متغیر مداخله‌ای بدون متغیر زمان و

جدول ۳- مقادیر MAPE و RMSE برای مدل اول تا هشتم

شماره مدل	MAPE	RMSE	شماره مدل	MAPE	RMSE
اول	۴/۹۴	۹/۷۳	پنجم	۳/۵۷	۸/۳۴
دوم	۴/۹۱	۹/۶۵	ششم	۳/۱۳	۷/۶۱
سوم	۴/۵۷	۹/۱۴	هفتم	۴/۵۶	۹/۵۰
چهارم	۳/۶۹	۸/۲۷	هشتم	۳/۰۹	۶/۱۱

سرانه مصرف آب آحاد خانگی - لیتر بر واحد



شکل ۵- متوسط مصرف آب خانگی و مقادیر پیش‌بینی با روند فصلی و مقادیر آتی در بخش شهری استان مازندران طی سال‌های ۱۳۹۶ الی ۱۴۰۲

جدول ۴- مقادیر پیش‌بینی متوسط مصرف آب هر واحد خانگی در مازندران سال‌های ۱۴۰۳ الی ۱۴۰۵ براساس مدل ITS-SR

سال ۱۴۰۳	مقدار پیش‌بینی	سال ۱۴۰۴	مقدار پیش‌بینی	سال ۱۴۰۵	مقدار پیش‌بینی
فروردین	۴۳۳	فروردین	۴۲۸	فروردین	۴۲۳
اردیبهشت	۴۳۴	اردیبهشت	۴۲۹	اردیبهشت	۴۲۳
خرداد	۴۲۶	خرداد	۴۲۱	خرداد	۴۱۶
تیر	۴۵۹	تیر	۴۵۲	تیر	۴۴۶
مرداد	۴۵۲	مرداد	۴۴۶	مرداد	۴۴۰
شهریور	۴۶۱	شهریور	۴۵۵	شهریور	۴۴۸
مهر	۴۵۳	مهر	۴۴۷	مهر	۴۴۱
آبان	۴۴۶	آبان	۴۴۱	آبان	۴۳۲
آذر	۴۴۰	آذر	۴۳۴	آذر	۴۲۹
دی	۴۲۹	دی	۴۲۴	دی	۴۱۹
بهمن	۴۲۳	بهمن	۴۱۸	بهمن	۴۱۳
اسفند	۴۲۴	اسفند	۴۱۹	اسفند	۴۱۵

۶- نتیجه‌گیری

تأثیر همه‌گیری کووید-۱۹ بر روی متوسط مصرف آب یکی از چالش‌های برنامه‌ریزی در صنعت آب و فاضلاب است که در این مقاله، متوسط مصرف آب خانگی براساس فرآیند سری زمانی مداخله‌ای برپایه رگرسیون قطعه‌ای، مدل‌سازی و دقت پیش‌بینی مدل بررسی شد. به‌منظور افزایش دقت مدل، مؤلفه هارمونیک نیز در مدل ITS-SR لحاظ شده و کفایت آن در برازش متوسط مصرف آب با استفاده از آنالیز باقی‌مانده‌های مدل تأیید شد. به‌منظور بررسی دقت مدل ITS-SR در پیش‌بینی، براساس هشت مدل مختلف و دو معیار MAPE و RMSE، برتری مدل ITS-SR شامل متغیرهای زمان، مداخله‌ای، اثر متقابل و روند فصلی براساس توزیع معکوس گوسین در پیش‌بینی فرآیند تأیید شد. هم‌چنین مقادیر پیش‌بینی برای سال‌های ۱۴۰۳ الی ۱۴۰۵ ارائه شد. به‌عنوان پیشنهاداتی از مطالعات

آتی در این زمینه، می‌توان به مدل‌های سری زمانی خطای ضربی که تنها مقادیر مثبت را شامل می‌شوند و مقایسه با مدل‌های موجود اشاره نمود. مدل‌های کلاسیک به‌صورت مجموع عبارت خطای فرآیند و متغیر مستقل تعریف می‌شود، درحالی‌که مدل خطای ضربی، به‌صورت حاصل‌ضرب دو عبارت خطای فرآیند و متغیر مستقل معرفی می‌شود.

۷- پی‌نوشت‌ها

- 1- Generalized Linear Model
- 2- Interrupted time series
- 3- Segmented Regression
- 4- Root Mean Square Error
- 5- Nash-Sutcliffe
- 6- Mean Absolute Percentage Errors

- Penfold, R.B., and Zhang, F., (2013), "Use of interrupted time series analysis in evaluating health care quality improvements", *Academic Pediatrics*, 13(6), 38-44, <https://doi.org/10.1016/j.acap.2013.08.002>.
- Sabzchi-Dehkharghani, H., Majnooni-Heris A., Fakherifard, A., and Yegani, R. (2023), "Estimation of household water consumption pattern in a metropolitan area taking the impact of the COVID-19 pandemic", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(3), 3161-3176, <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04761-8>.
- Sivakumar, B., (2021), "COVID-19 and water", *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 35(3), 531-534, <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01837-6>.
- Wagner, A.K., Soumerai, S.B., Zhang, F., and Ross-Degnan, D., (2002), "Segmented regression analysis of interrupted time series studies in medication use research", *Journal of Clinical Pharmacy and Therapeutics*, 27(4), 299-309, <https://doi.org/10.1046/j.1365-2710.2002.00430.x>.
- Yunus, A.P., Masago, Y., and Hijioka, Y., (2020), "COVID-19 and surface water quality: improved lake water quality during the lockdown", *Science of the Total Environment*, 731, 139012, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139012>.



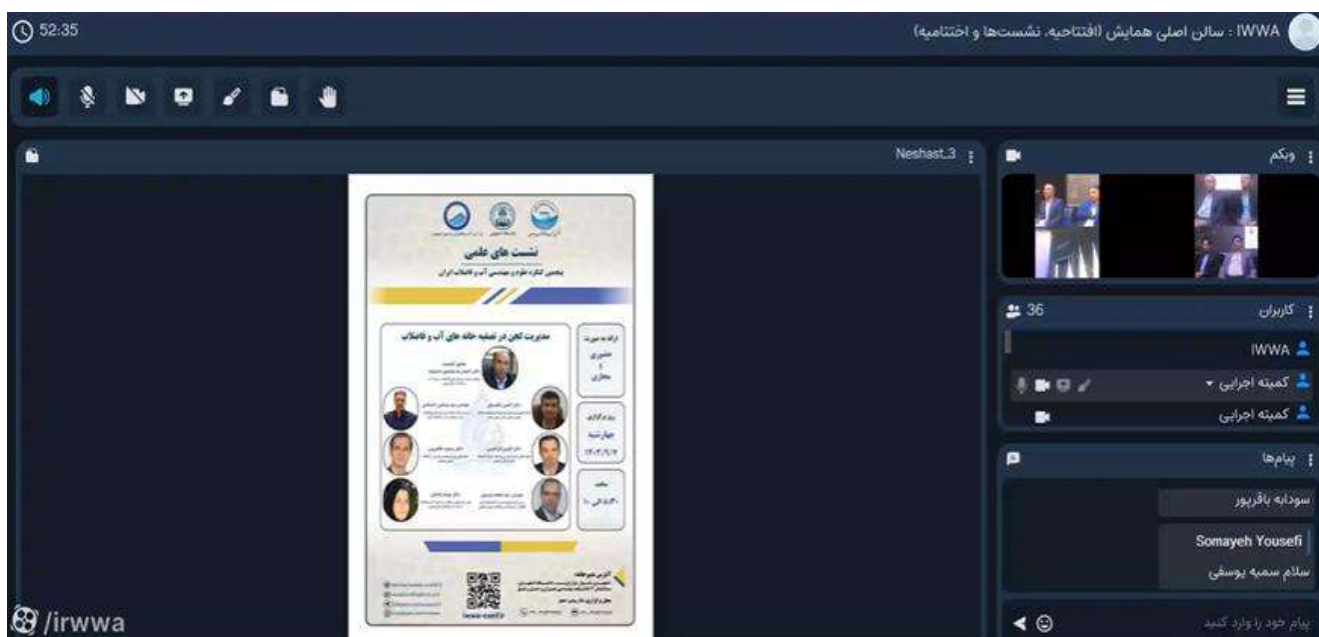
This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.

- رضازاده، م.، نیازمردی، س. و صدری‌کیا، م.، (۱۴۰۱)، "بررسی مکانی تأثیر شیوع ویروس کرونا بر مصرف آب در شهر شبستر"، *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۸(۱)، ۱۲۱-۱۳۲.
- محمدزاده، ح.، و مخدومی، ن.، (۱۴۰۱)، "اثرات COVID-19 بر منابع آب و فاضلاب و پیامدهای محیط‌زیستی آن (مطالعه موردی شهر مشهد)"، *آب و فاضلاب*، ۳۳(۴)، ۹۵-۱۱۴، <https://doi.org/10.22093/wwj.202.327322.3228>.
- Abu-Bakar, H., Williams, L., and Hallett, S.H., (2021), "Quantifying the impact of the COVID-19 lockdown on household water consumption patterns in England", *NPJ Clean Water*, 4(1), 13, <https://doi.org/10.1038/s41545021001038>.
- Alnsour, M.A., and Ijam, A.Z., (2023), "Specifying a cascade water demand forecasting model using time-series analysis: a case of Jordan. Sustain", *Water Resources Management*, 9(1), 37, <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00824-3>.
- Bernal, J.L., Cummins, S., and Gasparrini, A., (2017), "Interrupted time series regression for the evaluation of public health interventions: A tutorial", *International Journal of Epidemiology*, 46(1), 348-355, <https://doi.org/10.1093/ije/dyw098>.
- Bhowmick, G.D., Dhar, D., Nath, D., Ghangrekar, M.M., Banerjee, R., Das, S., and Chatterjee, J., (2020), "Coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak: Some serious consequences with urban and rural water cycle", *NPJ Clean Water*, 3(1), 32, <https://doi.org/10.1038/s41545-020-0079-1>.
- Cominato, C., Sborz, J., Kalbusch, A., and Henning, E., (2022), "Water demand profile before and during COVID-19 pandemic in a Brazilian social housing complex", *Heliyon*, 8(8), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10307>.
- Kalbusch, A., Henning, E., Brikalski, M.P., Luca, F.V., and Konrath, A.C., (2020), "Impact of coronavirus (COVID-19) spread-prevention actions on urban water consumption", *Resources, Conservation and Recycling*, 163, 105098, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105098>.
- Nemati, M., and Tran, D., (2022), "The impact of COVID-19 on urban water consumption in the United States", *Water*, 14(19), 3096, <https://doi.org/10.3390/w14193096>.
- Niu, L., Song, Q., Liu, Y., and Wang, X., (2022), "Interrupted time series analysis for the impact of integrated medical insurance on direct hospitalization expense of catastrophic illness", *Scientific Reports*, 12(1), 12316, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15569-w>.



نشست تخصصی مدیریت لجن در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب
(پنجمین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران، ۶ تا ۸ آذرماه ۱۴۰۳، دانشگاه اصفهان)

لینک فیلم نشست: <https://www.aparat.com/v/cawfci9>



اعضای نشست:

- دکتر افشین ابراهیمی (عضو هیئت علمی گروه مهندسی بهداشت محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان)
 مهندس سید مرتضی احتشامی (سرپرست دفتر نظارت بر بهره‌برداری فاضلاب، شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور)
 دکتر مهتاب باغبان (مدیر مرکز پایش و نظارت بر کیفیت آب و فاضلاب، شرکت آب و فاضلاب استان تهران)
 دکتر افشین تکدستان (عضو هیئت علمی گروه مهندسی بهداشت محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز)
 دکتر مسعود طاهریون (عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان)
 دکتر احمد رضا محمدی ده چشمه (معاون توسعه و بهره‌برداری فاضلاب، شرکت آب و فاضلاب استان تهران، مدیر نشست)
 مهندس سید محمد موسوی (رئیس گروه بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان)



مهندس سید مرتضی احتشامی:

عرض سلام و وقت به‌خیر دارم خدمت حضار محترم. من نیز از برگزارکنندگان این نشست تشکر می‌کنم. اجازه بدهید درباره سیمای کلی فاضلاب کشور توضیحاتی خدمت شما عرض کنم. وضعیتی که اکنون در کشور در حوزه‌ی تصفیه فاضلاب داریم، نسبت به بیست سال پیش بسیار تغییر کرده است. آن زمان، وقتی



دکتر احمد رضا محمدی ده چشمه:

عرض سلام و وقت به‌خیر دارم خدمت حضار محترم. از برگزاری این نشست و پرداختن به یکی از پرچالش‌ترین موضوعات مرتبط با تصفیه فاضلاب، یعنی مدیریت لجن، تشکر می‌کنم. بدون فوت وقت، از جناب آقای مهندس احتشامی از شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور دعوت می‌کنم تا ارائه خود را آغاز کنند.

طراحی تصفیه‌خانه انجام می‌دادیم، هیچ نگاهی به پساب نداشتیم؛ فقط سعی می‌کردیم جایی را پیدا کنیم که پساب را تخلیه کنیم و به‌قول معروف، از شر آن راحت شویم. اما اکنون با توجه به این‌که منابع آبی بسیار محدود شده و منابع مالی ما نیز در حال کاهش است، به این نتیجه رسیده‌ایم که پساب یک عنصر بسیار ارزشمند است و می‌تواند در تعادل‌سازی منابع آبی نقش مهمی داشته باشد. خوشبختانه در چند سال اخیر اقدامات خوبی در زمینه‌ی تصفیه و بازتخصیص پساب صورت گرفته است. دستورالعمل‌هایی نیز از سوی شرکت‌های آب و فاضلاب ابلاغ شده که موجب تسریع این روند شده است. وزارت نیرو نیز درگیر این موضوع است و حمایت‌هایی انجام می‌دهد.

موضوع بعدی، لجن حاصل از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب است که می‌تواند ارزش افزوده زیادی برای صنعت ایجاد کرده و تأمین‌کننده منابع مالی باشد. ضمن این‌که آلودگی‌هایی که اکنون در سطح جامعه پراکنده هستند، می‌توانند با مدیریت صحیح لجن به محصولات قابل‌استفاده تبدیل شوند.

در حال حاضر، در کشور نزدیک به پنج میلیون تن کود شیمیایی مصرف می‌شود؛ در حالی‌که لجن می‌تواند جایگزین مناسبی برای بخشی از این کود باشد. علاوه بر آن، از لجن می‌توان در هاضم‌های بی‌هوازی برق تولید کرد. در حال حاضر ظرفیت تولید ۵۰۰ مگاوات برق از تاسیسات موجود وجود دارد. متأسفانه در تهران، فقط در واحدهای ۱ تا ۴ و همچنین در فیروز بهرام، این کار در حال انجام است و سایر تاسیسات بلااستفاده مانده‌اند. ما بیش از ۶ میلیون مترمکعب در روز پساب تصفیه‌شده داریم. اگر حساب کنید، این مقدار حجم زیادی لجن تولید می‌کند که می‌توان از آن محصولات با ارزشی به‌دست آورد. همان‌طور که می‌بینید، بخش عمده‌ای از سیستم‌های تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب، سیستم‌های لجن فعال هستند که خودشان قابلیت تولید لجن دارند. در حال حاضر، در سطح کشور حدود ۳۷ هاضم بی‌هوازی وجود دارد. برخی از این تاسیسات مجهز به سیستم‌های CHP (تولید هم‌زمان برق و حرارت) هستند، اما برخی دیگر هنوز به‌طور کامل راه‌اندازی نشده‌اند و فقط گاز را بدون بهره‌برداری مناسب می‌سوزانند.

در زمینه تولید گاز، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب پتانسیل بالایی دارند و علاوه بر آن می‌توانند ارزش افزوده خوبی برای تاسیسات تصفیه‌خانه داشته باشند. هر کیلوگرم لجن حدود ۲/۷ کیلووات ساعت برق تولید می‌کند که این برای صنعت ما عدد بسیار ارزشمندی است.

روند جمع‌آوری فاضلاب در کشور با سرعت بالایی در حال

پیشرفت است. پیش‌بینی می‌شود تا ۷ تا ۱۰ سال آینده، حدود ۵۰٪ کشور تحت پوشش شبکه جمع‌آوری فاضلاب قرارگیرد و تا ۱۵ سال آینده این پوشش به ۱۰۰٪ برسد. بنابراین اکنون زمان بسیار مهمی است که برای تاسیسات فاضلاب، فکری جدی کنیم. ما باید با سه رویکرد لجن حاصل از تصفیه‌خانه‌ها را مدیریت کنیم: (۱) بازیافت به بهترین شکل ممکن انجام شود؛ (۲) از لجن، محصولات جانبی ارزشمند تولید شود؛ (۳) ایجاد درآمد پایدار برای تاسیسات فاضلاب صورت‌گیرد.

واقعیت این است که تاسیسات فاضلاب باید بنگاه‌هایی خودگردان باشند و بتوانند هزینه‌هایشان را از طریق فروش پساب، فروش لجن و ارائه خدمات به مشترکین تأمین کنند. ما در چرخه اقتصادی توسعه‌ی پایدار، اصلی داریم به نام «اصل بازیافت» که باید حتماً در نظر گرفته شود. باید نگاهمان را به سمت اقتصاد زیستی ببریم و مدیریت پایدار پسماند را به‌عنوان منبع زیستی بالقوه جدی بگیریم. لجن نیز به‌عنوان یک منبع زیستی بالقوه، می‌تواند محصولات با ارزشی تولید کند. این نکته بسیار مهم است که به سمت آن حرکت کنیم؛ زیرا علاوه بر استفاده از لجن، می‌توانیم از انتشار آلودگی‌های محیط‌زیستی نیز جلوگیری کنیم. در زمینه مدیریت لجن در اروپا، بسیاری از کشورها از ما جلوتر هستند و به سمت ایده‌های نو حرکت می‌کنند. بیشتر سیستم‌ها در حال حاضر از فناوری لجن‌سوزی استفاده می‌کنند، اما با توجه به شرایط کشور ما، ساخت سیستم لجن‌سوز نیازمند سرمایه‌گذاری بسیار بالایی است. به‌نظر من، بهتر است فعلاً به سمت سوزاندن نرویم و بیشتر بر فناوری‌های جایگزین مانند تولید محصولات ارزشمند تمرکز کنیم.

در برخی کشورها از لجن، محصولات مغذی استخراج می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها فسفر است. این کار در کشورهای مختلف دنیا انجام می‌شود؛ به‌عنوان مثال، در آلمان حدود ۲۰ واحد سوزاندن لجن وجود دارد که ۷ کارخانه از آن‌ها علاوه بر سوزاندن لجن، برق نیز تولید می‌کنند.

حال بیایید وضعیت خودمان را بررسی کنیم. در برخی شهرها، مانند جنوب اصفهان، بعضی از تاسیسات نزدیک مناطق مسکونی ساخته شده‌اند. بنابراین در این مناطق نمی‌توانیم به سمت تولید کمپوست برویم، چرا که بخشی از این فرآیند ممکن است موجب انتشار بو و آزار محیط اطراف شود. باید به‌سمتی حرکت کنیم که این فرآیندها به بهترین شکل ممکن انجام شوند و مزاحمتی برای محیط اطراف ایجاد نکنند.

یکی از فرآیندهایی که در شرکت فاضلاب تهران تعریف شده و در حال اجرا است، پیرولیز لجن است که ان‌شاءالله تا چند ماه

آینده به نتیجه خواهد رسید. در این فرآیند می‌توان از لجن، روغن زیستی و محصولات قابل‌سوزاندن تولید کرد. این روش آلودگی محیط‌زیستی بسیار کمی دارد، ولی ارزش افزوده بالایی ایجاد می‌کند.

پیرولیز در واقع یک فرآیند بسته است که در دمای حدود ۶۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. لجن در این دما به‌جای سوزاندن، به کربن تبدیل می‌شود. بخارات حاصل از لجن نیز که بخارات هیدروکربنی هستند، به مایع روغن سوختی تبدیل می‌شوند و آن مایع قابلیت تبدیل به گازوئیل را نیز دارد.

در انتهای این فرآیند، اگر به‌صورت کامل اجرا شود، حدود ۱۰٪ از لجن به کربن تبدیل خواهد شد. برآورد ما این است که مثلاً یک دستگاه ۱۰۰ تُنی، روزانه حدود ۲۴ میلیون تومان درآمد ایجاد کند. این عدد بسیار قابل‌توجه است و می‌تواند کمک بزرگی به اقتصاد صنعت آب و فاضلاب کشور باشد.

دکتر احمدرضا محمدی ده چشمه:

تشکر می‌کنم از جناب آقای مهندس احتشامی. روش پیشنهادی ایشان برای تولید ارزش افزوده، بسیار جالب و قابل‌توجه بود. اکنون دعوت می‌کنم از جناب آقای مهندس موسوی از اصفهان، رئیس کل بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب این استان، تا مطالب خود را ارائه دهند.

مهندس سید محمد موسوی:

بسم‌الله‌الرحمن‌الرحیم. ضمن عرض سلام و ادب خدمت حضار محترم. من می‌خواهم تجربه شهر اصفهان را در زمینه بهداشت و مدیریت لجن خدمتان عرض کنم. در حال حاضر، اصفهان ۳ تصفیه‌خانه لجن فعال دارد، جنوب، شمال و شاهین‌شهر. عمده فاضلاب اصفهان وارد همین تصفیه‌خانه‌ها می‌شود. حدود ۲۵۰ تا ۳۰۰ تُن کیک لجن با غلظت ۲۰٪ در روز تولید می‌شود. تصفیه‌خانه‌های دیگر به‌صورت لاگون هوادهی فعالیت دارند که بیش از ۲ تا ۳ تُن لجن در روز تولید نمی‌کنند. عمده تصفیه‌خانه‌هایی که به‌صورت لاگون هوادهی هستند، هر ۵ تا ۶ سال یک‌بار لجن خود را تخلیه می‌کنند.

به‌طور کلی، سالانه حدود ۹۳ هزار تُن لجن خشک در اصفهان تولید می‌شود. سرنوشت این لجن‌ها به این صورت است که پس از آب‌گیری، توسط ماشین‌های کمپرسی (تحت شرایط ایزوله) که با کشاورزان طرف قرارداد هستند، به مزارع منتقل می‌شوند. در آن‌جا تحت یک مرحله خشک‌سازی قرار گرفته و سپس با کود گاوی مخلوط می‌شوند.

دلیل این کار این است که لجن اگر به‌صورت مستقیم استفاده شود، بسیار سفت است و نفوذپذیری آب را در خاک کاهش می‌دهد. در نتیجه اگر نفوذپذیری خاک مناسب نباشد، ممکن است برای کشاورزی مضر باشد. کشاورزان از ۴۰ تا ۵۰ سال پیش به این نتیجه رسیده‌اند که باید لجن را با کود گاوی فرآوری کرده و سپس استفاده کنند.

در سال ۱۳۹۳، در قالب طرحی مربوط به مدیریت یکپارچه رودخانه زاینده‌رود که توسط یک شرکت آلمانی انجام شد، نمونه‌هایی از خروجی تصفیه‌خانه شمال اصفهان و مناطقی که در آن‌ها کشاورزی انجام می‌شد، برداشت شد. این نمونه‌ها شامل خاک‌های مخلوط‌شده با لجن و خاک‌های بدون لجن بودند و برای مقایسه مورد بررسی قرار گرفتند.

استانداردهای مورد استفاده برای مقایسه، استانداردهای آلمان و آمریکا بودند. فلزات سنگینی مانند سرب، کادمیم، نیکل، کروم و جیوه در این نمونه‌ها مورد سنجش قرار گرفتند و نتایج نشان داد که غلظت تمام فلزات سنگین، بسیار کمتر از حد مجاز استاندارد است؛ هم در نمونه لجن استخراج‌شده از دستگاه‌های آب‌گیری و هم در نمونه خاک‌های کشاورزی. جالب این‌جا است که در برخی از لجن‌ها کلی‌فرم مدفوعی وجود داشت، اما پس از استفاده در زمین، مقدار آن به زیر حد استاندارد رسید. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، در لجن‌هایی که با خاک کشاورزی مخلوط شده‌اند، تخم انگل نیز به صفر رسیده است.

سال گذشته نیز آزمایش‌هایی بر روی لجن تمام تصفیه‌خانه‌ها انجام دادیم و نتایج مربوط به فلزات سنگین همگی در محدوده استاندارد محیط‌زیست قرار داشتند. بنابراین نگرانی خاصی از بابت فلزات سنگین وجود ندارد. حتی در برکه‌های تثبیت و لاگون‌های هوادهی که زمان ماند لجن ممکن است تا ۵ یا ۶ سال طول بکشد، مقدار کلی‌فرم‌ها نیز در حد استاندارد است؛ بنابراین نگرانی بهداشتی خاصی مشاهده نمی‌شود.

در سطح بین‌المللی نیز بررسی‌هایی انجام شده است. به‌عنوان مثال، گزارشی از مدیریت یکپارچه لجن در شهر برلین آلمان نشان می‌دهد که حدود ۲۱ درصد از لجن در خاک دفن می‌شود، ۴۷٪ برای کشاورزی استفاده و ۱۹/۹ درصد از طریق سوزاندن دفع می‌شود. این آمار نشان می‌دهد که در اروپا نیز استفاده کشاورزی از لجن جایگاه بالایی دارد و نگرانی چندانی از نظر بهداشتی وجود ندارد.

در اصفهان نیز در همین مسیر حرکت کرده‌ایم. از سال ۱۳۸۰، لجن‌ها کلاس‌بندی بهداشتی شده‌اند و در حال حاضر در کلاس B استاندارد EPA قرار داریم. هم‌اکنون نیز سیستم در حال بازنگری

است و حتی سرمایه‌گذارانی پیدا شده‌اند که آمادگی ورود به این حوزه را دارند.

در شهر مشهد نیز تجربه‌ای مشابه وجود داشته است؛ به این صورت که لجن‌های مخلوط‌شده با کود گاوی و خشک‌شده را با حرارت و افزودنی‌های خاص استریل و بسته‌بندی کرده و به صورت تجاری به فروش رسانده‌اند. این کار ارزش افزوده بالایی ایجاد می‌کند و حتی این محصولات به کشور افغانستان نیز صادر می‌شود.

دکتر احمدرضا محمدی ده چشمه:

خیلی ممنونم از جناب آقای مهندس موسوی بابت ارائه ارزشمند و توضیحات کاملشان. لطفاً سؤالات خود را نگه دارید تا در بخش پایانی نشست به آن‌ها پرداخته شود. اکنون از جناب آقای دکتر طاهریون، عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی اصفهان، دعوت می‌کنم تا ارائه خود را آغاز کنند.



دکتر مسعود طاهریون:

بسم‌الله الرحمن الرحیم. ابتدا می‌خواهم به صورت خلاصه به اهمیت استانداردها و مروری بر مقررات بین‌المللی و ملی در زمینه مدیریت لجن بپردازم. سعی می‌کنم مطالب را خلاصه و جمع‌بندی‌شده ارائه دهم. موارد مقدماتی که اهمیت زیادی دارند، یک مقایسه و در نهایت جمع‌بندی و پیشنهادات را مطرح خواهم کرد.

کاملاً روشن است که بحث حفظ سلامت عمومی، رعایت بهداشت، تحقق توسعه پایدار، جلوگیری از آلودگی منابع و مهم‌تر از همه، پذیرش اجتماعی، از جمله مواردی هستند که استانداردها برای تأمین آن‌ها تدوین شده‌اند و در سطح ملی و بین‌المللی نیز مورد پذیرش قرار گرفته‌اند. حتی در همکاری‌های بین‌المللی نیز الزاماتی وجود دارد که باعث می‌شود ما به رعایت استانداردها متعهد بمانیم.

یکی از مهم‌ترین استانداردهایی که در این زمینه وجود دارد، استاندارد EPA آمریکا است که دارای دو کلاس A و B است. کلاس A به صورت کاملاً عاری از پاتوژن‌ها است و پاتوژن‌ها تا زیر

حد تشخیص کاهش یافته‌اند و در این حالت ما لجن پاستوریزه‌شده داریم. کلاس B تا حد قابل توجهی از نظر وجود پاتوژن‌ها کاهش یافته، اما همچنان نیازمند مدیریت‌ها و محدودیت‌هایی است. به عنوان مثال، برای کلاس A تا ۱۰۰۰ کلی فرم مجاز است و برای کلاس B تا دو میلیون کلی فرم. روش‌هایی که در زمینه کاهش پاتوژن‌ها ارائه شده‌اند، شامل روش‌های بیولوژیکی و حرارتی هستند. یکی از نکات مهم در این روش‌ها، بحث زمان و دمای فرآیند است که در جدول‌های مربوط به این استانداردها به صورت دقیق قید شده است. اگر به روش‌ها نگاه کنیم، از کمپوست‌سازی گرفته تا روش‌های حرارتی و تثبیت شیمیایی، همگی به عنوان گزینه‌هایی برای ارتقای کیفیت لجن در نظر گرفته شده‌اند. البته دمای پایین‌تر و زمان تماس بیشتر، دو عاملی هستند که می‌توان با استفاده از آن‌ها تا حد زیادی پاتوژن‌ها را کاهش داد.

در مورد فلزات سنگین نیز موارد مهمی مانند تجمع فلزات و تجمع زیستی مورد توجه قرار گرفته است. به طوری که در جدول کلاس‌بندی، محدودیت‌های کلاس A و B به طور کامل مشخص هستند. برای کلاس A، در بسیاری از موارد استفاده بدون محدودیت مجاز است، اما برای کلاس B در برخی موارد محدودیت زمانی برداشت وجود دارد؛ مثلاً باید بین ۱۴ تا ۳۸ ماه فاصله زمانی رعایت شود، یا حداقل ۳۰ روز برای علوفه دام و همچنین برای فضاهای سبز این زمان می‌تواند بین یک ماه تا یک سال متغیر باشد.

استانداردهای اتحادیه اروپا که از سال ۱۹۹۳ تدوین شده‌اند، هنوز هم به روز هستند و مورد استفاده قرار می‌گیرند. اتحادیه اروپا از سال ۱۹۸۶ تأکید بیشتری بر محدودیت فلزات سنگین داشته و در زمینه پاتوژن‌ها نیز بیشتر به استاندارد EPA آمریکا ارجاع داده است. به طور کلی، مقادیر تعیین‌شده برای فلزات سنگین در استانداردهای اروپایی سخت‌گیرانه‌تر هستند. در سال ۲۰۱۰، بررسی‌هایی انجام شد که تمرکز آن‌ها بر آلاینده‌های نوظهور، استفاده از تصفیه‌های پیشرفته و اثرات گازهای گلخانه‌ای بود، هرچند هنوز استاندارد جدیدی در این زمینه منتشر نشده است. در سطح ملی، سازمان ملی استاندارد ایران مجموعه‌ای از آیین‌نامه‌ها را منتشر کرده است که بیشتر آن‌ها برگرفته از استانداردهای بین‌المللی هستند. برای مثال، در زمینه لجن و بایومس زیستی، نشریه ۲۲-۹۶۷ منتشر شده که برگرفته از استاندارد استرالیا است. در این استاندارد، دو دسته اصلی آلاینده در نظر گرفته شده است: (۱) آلاینده‌های شیمیایی؛ (۲) آلاینده‌های بیولوژیکی. در جدول مربوطه، چهار رده آلودگی بیولوژیکی تعریف شده است. رده P1 سخت‌گیرانه‌ترین حالت است و برای مثال،



دکتر مهتاب باغبان:

عرض سلام، ادب و احترام دارم. تشکر می‌کنم از حامیان و برگزارکنندگان همایش و همچنین تشکر ویژه دارم از جناب آقای دکتر محمدی به دلیل توجه ایشان به محور توسعه آزمایشگاهی برای شناخت آلاینده‌ها در کیفیت لجن. کیفیت لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در چهار دسته شناسایی می‌شود؛ یعنی چهار گروه از آلاینده‌ها وجود دارند که در کیفیت لجن فاضلاب نقش دارند.

دسته اول پاتوژن‌ها یا عوامل بیماری‌زا هستند که شامل ویروس‌ها و باکتری‌ها می‌شوند. همان‌طور که آقای دکتر طاهریون نیز توضیح دادند، در استاندارد EPA این پاتوژن‌ها به دو گروه A و B تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته دوم ریزآلاینده‌ها هستند که شامل ترکیبات دارویی و ترکیبات کربن‌دار هستند. دسته سوم فلزات سنگین (Heavy Metals) هستند که در تمامی لجن‌ها باید اندازه‌گیری شوند تا براساس نتایج، مجوز خروج از تصفیه‌خانه و تعیین نوع کاربرد برای آن‌ها صادر شود. دسته چهارم نیز آلاینده‌های نوظهور (Emerging Pollutants) هستند که موضوع اصلی بحث ما محسوب می‌شوند.

همان‌طور که آقای دکتر طاهریون هم فرمودند، در کلاس‌بندی سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA) لجن‌ها به دو دسته A و B تقسیم می‌شوند. دسته A شامل لجن‌هایی است که عاری از پاتوژن‌ها بوده و امکان رشد مجدد پاتوژن‌ها در آن‌ها وجود ندارد؛ بنابراین برای همه کاربری‌ها قابل استفاده‌اند. در این نوع لجن‌ها پاتوژن‌های بیماری‌زا قابل مشاهده یا اندازه‌گیری نیستند، چون به‌طور کامل حذف شده‌اند. اما در گروه B، هم‌چنان پاتوژن‌ها و عوامل بیماری‌زا وجود دارند و لازم است تصفیه کامل‌تری بر روی آن‌ها انجام شود. چون این ترکیبات در صورت استفاده در مصارف کشاورزی یا فضاهای تفریحی می‌توانند عامل انتقال بیماری باشند و باید برای آن‌ها محدودیت‌هایی در نظر گرفته شود.

هر دو دسته A و B می‌توانند شامل مواد رادیواکتیو یا دارویی باشند، زیرا این طبقه‌بندی فقط براساس مقدار پاتوژن‌ها انجام می‌شود. در گروه A، به دلیل محدود بودن پاتوژن‌ها، می‌توان از لجن در تمامی کاربری‌ها استفاده کرد. حداکثر مقدار کلی‌فرم در این گروه ۱۰۰۰ MPN در هر گرم جامد خشک و حداقل مقدار

مقدار کلی‌فرم را عدد ۱۰۰ در نظر گرفته است. این مقدار در کلاس A استاندارد EPA عدد ۱۰۰۰ بود. رده P2 تقریباً با استاندارد EPA برابری می‌کند و رده‌های P3 و P4 نیز دارای محدودیت‌های کمتر یا فاقد محدودیت خاص هستند.

در مورد فلزات سنگین نیز مشابه استانداردهای اروپا و آمریکا، در این استاندارد درجه‌بندی انجام شده است. برای مثال، سطح C1 که سخت‌گیرانه‌تر است، برای خاک‌های اسیدی و قلیایی حدود مجاز پایین‌تری دارد. برای سطح C2 در برخی موارد اعداد مجاز بالاتر و در برخی موارد کمتر است. اگر بخواهیم این استاندارد را با استانداردهای آمریکا و اروپا مقایسه کنیم، می‌توان گفت که در مجموع سخت‌گیرانه‌تر است.

در جدول موارد استفاده نیز دسته‌بندی‌ها مشخص شده است. به‌عنوان مثال، دسته C1 و سطح P1 دارای بالاترین کیفیت میکروبی و کمترین مقدار فلزات سنگین هستند و بدون محدودیت قابل استفاده‌اند. این جدول‌ها به ما کمک می‌کنند تا بدانیم هر نوع لجن در چه کاربردی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

اگر بخواهیم استانداردها را به‌صورت تطبیقی جمع‌بندی کنیم، باید بگوییم که اگرچه استانداردهای ملی سخت‌گیرانه‌تر هستند، اما اثرات گازهای گلخانه‌ای به‌طور کامل در آن‌ها پوشش داده نشده‌اند. در زمینه بازیافت لجن، تقریباً ۷ تا ۸ روش مختلف وجود دارد که رایج‌ترین آن استفاده در کشاورزی است (حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد). روش‌های دیگر شامل استفاده در صنایع ساختمانی، معادن و حتی سوزاندن هستند، اما به دلیل هزینه بالا و آلودگی هوا، محدودیت‌هایی دارند.

در جمع‌بندی، باید گفت که ما هنوز در استانداردها به موضوعاتی مانند آلاینده‌های نوظهور، فناوری‌های مدرن تصفیه و اثرات اقلیمی و انتشار گازهای گلخانه‌ای توجه کافی نکرده‌ایم. محدودیت‌های فنی، اجتماعی و اقتصادی همچنان چالش‌هایی جدی برای بازیافت لجن محسوب می‌شوند.

راه‌کارهایی که می‌توانند در این زمینه مؤثر باشند شامل استفاده از پیش‌تصفیه‌ها، توسعه فناوری‌های تصفیه پیشرفته، افزایش آگاهی عمومی و یکپارچه‌سازی مدیریت منابع با حوزه‌های انرژی و کشاورزی است. خیلی متشکرم.

دکتر احمد رضا محمدی ده چشمه:

خیلی ممنونم از توضیحات آقای دکتر طاهریون که مطالب بسیار ارزشمندی را مطرح کردند. اکنون دعوت می‌کنم از سرکار خانم دکتر باغبان تا ارائه خود را آغاز کنند.

با روش‌های تصفیه متعادل از بین نمی‌روند، در نتیجه در فاضلاب باقی می‌مانند. مهم‌ترین آنتی‌بیوتیک‌هایی که امروزه در جهان مورد توجه هستند، سیپروفلوکساسین‌ها و تتراسایکلین‌ها هستند که از پرمصرف‌ترین داروهای ضد درد و ضد التهاب محسوب می‌شوند.

- محصولات مراقبت شخصی شامل ترکیباتی خطرناک مانند عطرها و لوسیون‌ها هستند.
- مواد شیمیایی مختل‌کننده غدد درون‌ریز مانند ترکیبات حاوی استروژن (برای مثال اتیل‌استات در قرص‌های ضد بارداری).
- آفت‌کش‌ها
- میکروپلاستیک‌ها
- و در نهایت مواد شیمیایی ضد آتش.

آخرین نکته‌ای که باید اشاره کنم، مربوط به خطرات ناشی از مصرف این آلاینده‌ها است. این ترکیبات می‌توانند موجب آلودگی خاک و منابع آب شوند، خطرات بهداشتی برای انسان به همراه داشته باشند و به محیط‌زیست آسیب برسانند. مهم‌ترین مسئله این است که ما باید توانایی اندازه‌گیری و شناسایی این آلاینده‌ها را داشته باشیم تا بدانیم چه مقدار از لجن مصرفی در کشاورزی یا سایر کاربردها وارد محیط‌زیست می‌شود. اگر بتوانیم آن‌ها را شناسایی کنیم، می‌توانیم از بروز مشکلات بعدی برای انسان و محیط‌زیست جلوگیری کنیم. خیلی ممنون و متشکر.

دکتر احمد رضا محمدی ده چشمه:

تشکر می‌کنم از سرکار خانم دکتر باغبان بابت ارائه دقیق و جامع‌شان. اکنون دعوت می‌کنم از آقای دکتر تک‌دستان، عضو هیئت علمی دانشگاه علوم پزشکی جندی‌شاپور اهواز، تا ارائه خود را آغاز کنند.



دکتر افشین تک‌دستان:

به نام خدا. صبح بخیر عرض می‌کنم خدمت حضار محترم، اساتید بزرگوار و دانشجویان گرامی. امیدوارم همیشه سلامت باشید. تشکر می‌کنم از برگزارکنندگان همایش؛ واقعاً هم دانشگاه اصفهان، هم انجمن و هم شرکت آب و فاضلاب اصفهان برای برگزاری این رویداد زحمت زیادی کشیدند. همین‌جا لازم می‌دانم

آن ۱۰۰ MPN است. در گروه B شرایط متفاوت است و مقدار پاتوژن‌ها بیشتر است. برای این گروه محدودیت‌هایی در استفاده وجود دارد. به‌عنوان مثال، زمینی که با لجن گروه B آغشته شده است، حداقل پس از ۱۴ ماه و حداکثر تا ۳۸ ماه بعد، اجازه کشت پیدا می‌کند. در رابطه با محصولات فیبردار مانند علوفه، برداشت حداقل باید ۳۰ روز پس از استفاده انجام شود. اگر دام از این علوفه استفاده کند، آن دام نیز به مدت ۳۰ روز اجازه ندارد در چراگاه‌های تمیز و عاری از آلودگی تردد کند. از همه مهم‌تر، اگر از این لجن برای فضاهای سبز استفاده شود، باید حداقل به مدت یک‌سال محدودیت تماس مستقیم انسان با آن رعایت شود.

در سال ۲۰۰۴، مطالعه‌ای درباره مراکزی که لجن‌های کلاس B را دفن می‌کردند انجام شد. مشخص شد که اگر لجن‌های کلاس B در محل‌هایی دفن شوند که شیرابه‌های زباله نیز وجود دارد، می‌توانند محیط مناسبی برای رشد مجدد میکروارگانیسم‌ها ایجاد کنند. افرادی که در نزدیکی محل دفن کلاس B زندگی می‌کردند، دچار مشکلاتی از جمله بیماری‌های ریوی و آسم شدند. در همان سال، مطالعه دیگری روی ساکنان اطراف این محل‌ها انجام شد و نتایج نشان داد که این افراد تحریکات پوستی و تنفسی داشتند و حدود نیمی از آن‌ها در بازه زمانی یک‌ماهه دچار عفونت شدند. علائمی مانند اشک‌ریزش، ضعف عمومی بدن، زخم پوستی و کم‌آبی در این افراد مشاهده شد.

همان‌طور که دکتر طاهریون نیز درباره استاندارد ایران -۹۶۷-۲۲ توضیح دادند، دسته‌بندی کیفیت لجن در ایران براساس میزان آلودگی شیمیایی و درجه تثبیت و کاهش عوامل بیماری‌زا انجام می‌شود. درجه آلودگی شیمیایی شامل دو دسته C1 و C2 است، و درجه تثبیت و بیماری‌زایی شامل چهار دسته از B1 تا B4 است که از سخت‌گیرانه تا سهل‌گیرانه طبقه‌بندی شده‌اند. اگر لجن دارای درجه C1 و B1 باشد، برای همه کاربری‌ها قابل استفاده است. اما اگر درجه C2 و B4 داشته باشد، در صورت امکان تصفیه می‌شود و در غیر این صورت به‌عنوان پسماند ویژه در خاک‌چال دفن می‌شود و قابلیت استفاده ندارد.

در مورد آلاینده‌های نوظهور، به دلیل آلودگی بالا، سمیت زیاد و توانایی تجمع در محیط‌زیست و بافت بدن موجودات، امروزه توجه بسیاری به آن‌ها می‌شود. اثرات بلندمدت این آلاینده‌ها باعث شده که به‌طور جدی مورد بررسی قرار گیرند.

آلاینده‌های نوظهور شامل چند گروه اصلی هستند:

- داروها و محصولات مراقبت شخصی مانند آنتی‌بیوتیک‌ها، هورمون‌ها، مسکن‌ها و داروهای ضدالتهاب. این مواد پس از مصرف انسان از طریق فاضلاب وارد تصفیه‌خانه‌ها می‌شوند و

از دانشجویان عزیزی که در کمیته اجرایی فعالیت داشتند نیز تشکر کنم؛ واقعاً تلاش زیادی کردند و پیگیر بودند.

در واقع، موضوع صحبت من درباره کاهش لجن است. چون در سخنرانی‌های قبلی، خانم دکتر باغبان و آقای دکتر طاهریون نیز به خوبی به این موضوع اشاره کردند. البته لازم است بگویم که آقای دکتر طاهریون، خودشان دانشجوی ارشد همین دانشگاه بودند؛ روبه‌روی همین ساختمان، در دانشکده بهداشت و گروه مهندسی بهداشت محیط. سال ۱۳۷۸ که بنده دانشجوی بودم، آقای مهندس موسوی هم در جریان هستند، در امور دانشجویی فعالیت داشتم.

اولین بار، ما در کشور در همان سال ۱۳۷۸ کار روی استانداردهای فاضلاب را آغاز کردیم. چند مقاله هم از آن منتشر شده است. محل انجام کار، تصفیه‌خانه جنوب اصفهان و هم‌چنین تصفیه‌خانه شاهین‌شهر بود که پروژه کارشناسی ارشد خود من هم در همین زمینه بود. در آن‌زمان، تصفیه‌خانه جنوب اصفهان نه استاندارد کلاس A را برآورده می‌کرد و نه کلاس B، اما شاهین‌شهر توانست استاندارد کلاس B را کسب کند. این نکته‌ای است که در ادامه صحبت اساتید قبلی باید عرض کنم. تمام آلاینده‌ها در واقع در داخل لجن تجمع پیدا می‌کنند، همان‌طور که دیگر سخنرانان هم اشاره کردند.

به‌همین دلیل، امروز همه متخصصان به دنبال روش‌هایی هستند که بتوانند تولید لجن را کاهش دهند و به جای پس‌تصفیه لجن، به سمت حداقل‌سازی (minimization) حرکت کنند. با توجه به هزینه‌های تصفیه‌خانه‌ها، باید گفت حدود ۵۰٪ از کل هزینه‌ها مربوط به تصفیه و دفع لجن است. همان‌طور که آقای دکتر محمدی نیز اشاره کردند، سیستم لجن فعال اگر بدون همکاری و مدیریت صحیح از سوی بهره‌برداران و مدیران اجرایی باشد، دچار مشکل می‌شود.

واقعیت این است که ما در کشور با مشکل لجن مواجه هستیم و حدود ۹۰٪ این مشکلات ناشی از راهبری نادرست است. پیش از آن‌که وارد بحث روش‌های کاهش لجن شوم، اجازه بدهید به یک کار تحقیقاتی اشاره کنم که در استان مازندران انجام دادیم. فیلم آن موجود است و مربوط به شرکت فاضلاب استان مازندران است. در آن پروژه، یکی از دانشجویان دکترای شروع به بررسی سیستم تصفیه‌خانه فاضلاب شهر ساری کرد؛ سیستمی از نوع MLE (جریان فعال اصلاح‌شده) که توانایی حذف ازت را هم دارد. مشکلی که در آن‌جا داشتیم، تولید بالای لجن بود. بنابراین، یک طرح تحقیقاتی در مقطع دکترای تعریف شد و یک پایلوت آزمایشی نیز ساخته شد. این پایلوت در خروجی ته‌نشینی اولیه

نصب شد و سیستم OSA مورد آزمایش قرار گرفت. این پروژه با همکاری شرکت آب و فاضلاب ساری و مرکز تحقیقات دانشکده بهداشت علوم پزشکی ساری انجام شد و به راندمان بسیار خوبی رسیدیم؛ به‌طوری‌که حدود ۶۰٪ کاهش در تولید لجن به‌دست آمد. در این سیستم به‌ویژه در بخش برگشت لجن، اصلاحاتی انجام دادیم که تأثیر بسیار مثبتی داشت.

به‌عنوان نمونه، سیستم لجن فعال را طوری طراحی کردیم که پساب تصفیه‌شده از نظر شفافیت تفاوتی با آب معمولی نداشت. یعنی این سیستم توانست آلاینده‌ها را تا حدی حذف کند که تمام پارامترها پایین‌تر از مقادیر حدی استاندارد بودند. نتیجه این کار، چاپ دو مقاله ISI بود. بنابراین، ما توانستیم در این طرح تحقیقاتی که برای شرکت آب و فاضلاب استان مازندران انجام شد و توسط یک دانشجوی دکترای هدایت می‌شد، نتایج ارزشمندی به‌دست آوریم.

اگر اجازه دهید، اشاره‌ای هم داشته باشم به روش‌های مختلف کاهش لجن که امروزه در دنیا مورد استفاده هستند. البته چون قرار است بعد از ظهر در کارگاه کاهش لجن مفصل‌تر درباره این روش‌ها صحبت کنم، در این‌جا به‌صورت خلاصه عرض می‌کنم. سیستم لجن فعال، همان‌طور که اساتید قبلی هم اشاره کردند، یکی از رایج‌ترین سیستم‌ها در کشور ما و در سطح جهان است و در بسیاری از کشورهای صنعتی و در حال توسعه کاربرد دارد. یکی از عیوب اصلی این سیستم، تولید حجم بالای لجن است. لجن معمولاً بین ۰/۲۵ تا ۱/۲ درصد مواد جامد دارد و بقیه آن آب است. در لجن اولیه چیزی بین ۳ تا ۶ درصد مواد جامد وجود دارد و در لجن ثانویه، درصد آب بسیار بیشتر است. به‌همین دلیل، در دنیا تلاش می‌شود تا حجم لجن در فرآیندهای لجن فعال کاهش یابد. یکی از روش‌های بیولوژیکی برای این کار، روش OSA است. در ایران نیز محاسبات نشان داده‌اند که لجن اولیه حدود ۰/۵ تا ۱ لیتر و لجن ثانویه بین ۱/۵ تا ۲/۵ لیتر به‌ازای هر نفر تولید می‌شود. بنابراین، اگر منطقه‌ای ۱۰۰ هزار نفر جمعیت داشته باشد، می‌توان حجم لجن تولیدی آن را به‌راحتی محاسبه کرد. این حجم زیاد نه‌تنها هزینه تأسیسات را افزایش می‌دهد، بلکه هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری را نیز بالا می‌برد. به‌همین دلیل، امروزه در سراسر جهان روش‌های گوناگونی برای کاهش لجن توسعه یافته است. برخی از این روش‌ها در دانشگاه‌های ما توسط دانشجویان ارشد و دکترای بررسی شده‌اند، هرچند هنوز در مرحله اجرا نیستند.

بحث اصلی من در این‌جا میکروبیولوژی فاضلاب است. این همان نظریه‌ای است که مک‌گی و مک‌کارتی مطرح کردند: «یک

مهندس آب و فاضلاب، اگر درک درستی از میکروبیولوژی فاضلاب نداشته باشد، نمی‌تواند مهندس موفق باشد. در میکروبیولوژی فاضلاب گفته می‌شود که در سیستم‌های هوازی، حدود ۵۰٪ از کل مواد به لجن تبدیل می‌شود، در حالی که در سیستم‌های بی‌هوازی این عدد کمتر از ۱۰٪ است. از آنجا که اکثر تصفیه‌خانه‌های ما از نوع هوازی هستند، ضریب تولید لجن در آن‌ها بالا است. در واقع، به‌ازای هر کیلوگرم BOD ورودی به تصفیه‌خانه، حدود ۰/۶ تا ۰/۸ کیلوگرم لجن تولید می‌شود.

برای کاهش لجن، باید ضریب تولید لجن را پایین بیاوریم. در سیستم OSA، همان‌طور که مشاهده می‌کنید، در خط برگشت لجن، مرحله‌ای برای نگهداری در فاز بی‌هوازی در نظر گرفته می‌شود که همین کار باعث کاهش تولید لجن می‌شود. این مکانیزم در تحقیقات مختلفی که در کشور و در همکاری با دانشجویان و مراکز تحقیقاتی دانشگاه ما انجام شده، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که این فرآیند می‌تواند تا ۶۰٪ کاهش در تولید لجن ایجاد کند. در این تحقیقات، علاوه بر کاهش لجن، پارامترهای دیگر نیز بهبود یافته و کیفیت پساب افزایش پیدا کرده است.

در پایان عرض می‌کنم که اگر فرصت داشتید، ان‌شاءالله بعد از ظهر در کارگاه کاهش لجن، انواع مکانیزم‌های کاهش لجن را با جزئیات و مثال‌های عملی خدمت شما توضیح خواهم داد. خیلی ممنون.

دکتر احمد رضا محمدی ده چشمه:

بسم‌الله الرحمن الرحیم. در خصوص موضوع کاهش لجن، اجازه بدهید ابتدا یک علامت سؤال مطرح کنم. آیا باید با صرف انرژی، میزان تولید لجن را کاهش دهیم؟ یا برعکس، لجن بیشتری تولید کنیم تا بتوانیم انرژی بیشتری از آن استحصال کنیم؟ به عبارت دیگر، اگر لجن بیشتری تولید کنیم، قطعاً می‌توانیم در فرآیند هضم بی‌هوازی لجن، انرژی بیشتری به دست آوریم. این نکته را باید پیش از ورود به بحث کاهش لجن در نظر داشت. می‌خواهم تأکید کنم که هیچ راه‌کاری قطعیت ندارد؛ کاهش لجن لزوماً راه‌حل قطعی و مطلوب برای تمام مناطق و شرایط جغرافیایی کشور نیست.

روش‌های متداولی که در جهان برای دفع لجن به کار گرفته می‌شوند، در نهایت به یکی از چهار دسته زیر ختم می‌شوند: (۱) دفن در لندفیل؛ (۲) سوزاندن در نیروگاه‌های لجن‌سوز؛ (۳) پخش در زمین‌های کشاورزی؛ (۴) تخلیه در اقیانوس‌ها (در کشورهای که دسترسی دارند).

هریک از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند. به‌عبارتی، بخش‌هایی از فرآیند دارای مزیت‌اند و بخش‌هایی دیگر محدودیت یا مشکل به‌همراه دارند. اگر در منطقه‌ای که تصفیه‌خانه در آن بهره‌برداری می‌شود، یکی از این محدودیت‌ها وجود داشته باشد، آن‌گاه کاهش لجن می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل جایگزین مطرح شود.

حال اجازه دهید روش‌های کاهش لجن را با یک دسته‌بندی متفاوت نسبت به آنچه آقای دکتر تک‌دستان فرمودند توضیح دهم. به‌طور کلی، چهار روش اصلی وجود دارد و تمام فناوری‌های کاهش لجن در یکی از این چهار گروه قرار می‌گیرند: (۱) متابولیسم ناقص؛ (۲) نگهداری متابولیسم؛ (۳) شکار میکروبی؛ (۴) تخریب و رشد نهان.

در روش متابولیسم ناقص، می‌دانیم که سوخت‌وساز سلولی عامل اصلی تولید لجن است. این فرآیند در قالب متابولیسم انجام می‌شود که شامل سه بخش است: آنابولیسم (ساخت)، کاتابولیسم (سوخت) و تنفس درون‌زا. در سوخت‌وساز، مصرف COD رخ می‌دهد، یعنی آلاینده‌های فاضلاب کاهش می‌یابند. در مرحله سوخت، بسته‌های انرژی تولید می‌شوند و در مرحله ساخت، این انرژی‌ها با مواد آلی موجود در فاضلاب ترکیب شده و به میکروارگانیسم جدید تبدیل می‌شوند. اگر بتوانیم میکروارگانیسم را در مرحله سوخت نگه‌داریم و نگذاریم وارد مرحله تولید مثل شود، عملاً باعث می‌شویم که میزان تولید لجن کاهش پیدا کند. در روش نگهداری متابولیسم، به میکروارگانیسم اجازه نمی‌دهیم وارد فاز ساخت شود. این روش معمولاً در سن‌های لجن بسیار طولانی (بیش از هزار روز) اتفاق می‌افتد. در این مدت، می‌توان باکتری‌هایی را پرورش داد که باکتری‌های غیرفعال یا استرس‌زده را شکار کنند و در نهایت موجب کاهش لجن شوند. روش چهارم، یعنی تخریب و رشد نهان، شامل تخریب لجن بیولوژیکی مازاد با یک عامل فیزیکی یا شیمیایی است، به‌گونه‌ای که پس از تخریب، لجن دوباره به سیستم تصفیه بازگردانده می‌شود.

در روش متابولیسم ناقص، محیطی ایجاد می‌کنیم که بسته‌های انرژی ذخیره‌شده برای تولید مثل آزاد شوند و صرف فعالیت‌های حیاتی سلول شوند. سیستم OSA که آقای دکتر تک‌دستان هم اشاره کردند، یکی از همین روش‌ها است. در این روش، لجن فعال در مسیر برگشت، در شرایط بی‌هوازی قرار می‌گیرد. به‌دلیل اعمال شرایط سخت زیستی، سلول انرژی ذخیره‌شده خود را برای زنده ماندن مصرف می‌کند و دیگر وارد مرحله تولید مثل نمی‌شود. در نتیجه، لجن جدید تولید نمی‌شود.

مطالعات نشان داده‌اند که این روش می‌تواند تا ۶۰٪ کاهش لجن ایجاد کند.

در روش دیگر، محدود کردن مواد مغذی مدنظر قرار می‌گیرد. همان‌طور که می‌دانید، ساخت یک سلول جدید (که همان لجن محسوب می‌شود) به عناصر سازنده‌ای مانند کربن، ازت و فسفر نیاز دارد. درست مانند ساخت یک ساختمان که بدون آجر، شن یا میلگرد امکان‌پذیر نیست. حال اگر یکی از این عناصر در محیط نباشد، فرآیند تولید سلول متوقف می‌شود. این روش برای تصفیه‌خانه‌های صنعتی که ترکیب پساب متفاوتی دارند، قابل استفاده است.

هم‌چنین از افزودن مواد شیمیایی نیز برای کاهش لجن استفاده می‌شود. این مواد معمولاً ترکیبات فنولی هستند که با تأثیر بر غشای سیتوپلاسم سلول، خاصیت تراوایی آن را تغییر می‌دهند. در نتیجه، پروتون‌هایی که باید برای تولید ATP (انرژی سلول) مصرف می‌شدند، از غشا فرار می‌کنند و انرژی سلول از بین می‌رود. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده پیوسته از پارامتروفنول می‌تواند تا ۶۲٪ کاهش لجن ایجاد کند.

در روش نگهداری متابولیسم، همان‌طور که گفته شد، سن لجن بیش از ۱۰۰۰ روز است. اما در سیستم‌های متعارف، چنین سن بالایی می‌تواند موجب مشکلات ته‌نشینی ثقیلی شود. بنابراین، در این شرایط از سیستم‌های MDR استفاده می‌شود که در آن‌ها حوض ته‌نشینی ثانویه وجود ندارد. طبیعی است که هرچه سن لجن بیشتر باشد، میزان لجن تولیدشده کمتر خواهد بود.

در کار باکتری‌ها دو روش وجود دارد: یکی این که سیستم لجن فعال را طوری راهبری کنیم که در دو سن لجن متفاوت عمل کند. در مرحله اول، سن لجن را کوتاه در نظر می‌گیریم و عمداً سیستم را دچار وضعیتی به نام رشد پراکنده می‌کنیم. البته در حالت عادی، رشد پراکنده نوعی اختلال است، اما در این جا هدفمند انجام می‌شود تا باکتری‌ها وارد فاز دفاعی نشوند و توسط گونه‌های دیگر شکار شوند. در مرحله بعد، سن لجن را طولانی می‌کنیم تا گونه‌های شکارچی مانند پروتوزواها، متازواها و روتیفرها بتوانند باکتری‌های پراکنده را شکار کنند.

در نهایت، در مرحله تخریب و رشد نهان، لجن مازاد را با یک عامل فیزیکی یا شیمیایی تجزیه می‌کنیم. این عامل می‌تواند حرارت، انجماد، امواج فراصوت یا مواد اسیدی و قلیایی باشد. در این فرآیند، لخته‌ها ابتدا شکسته می‌شوند، سپس سلول‌ها تخریب شده و مواد درون سلولی آزاد می‌شوند. میزان COD محلول افزایش می‌یابد و این مواد آزادشده می‌توانند به‌عنوان منبع غذایی برای سایر میکروارگانیسم‌ها در حوض هوادهی مورد

استفاده قرار گیرند.

روش‌های مختلفی مانند تخریب حرارتی، استفاده از مواد شیمیایی، یکنواخت‌سازها، امواج فراصوت، انجماد و هیدرولیز بیولوژیکی در این حوزه بررسی شده‌اند. البته در این روش‌ها بخشی از لجن که غیرقابل تجزیه است، باقی می‌ماند و باعث افزایش COD محلول در سیستم می‌شود. بنابراین، راندمان حذف COD در تصفیه‌خانه کاهش می‌یابد.

باید توجه داشت که تمام این روش‌ها نیازمند صرف انرژی هستند و ممکن است بر عملکرد ورودی سیستم نیز اثر منفی بگذارند. در نتیجه، نمی‌توان انتظار داشت که هم لجن تولید نشود، هم انرژی مصرف نشود و هم راندمان بالا باقی بماند.

بنابراین، این که بگوییم «کاهش لجن» راه‌حلی قطعی و نهایی است، صحیح نیست. انتخاب روش مناسب به شرایط محیطی، اقتصادی و زیستی بستگی دارد. مثلاً در مناطق کویری یک‌روشن مناسب است، در حالی که در شمال کشور که آلودگی هوا مسئله مهمی نیست، ممکن است روش دیگری بهتر عمل کند. در مجموع، هیچ قطعیت مطلقاً در روش‌های مدیریت لجن وجود ندارد و باید با توجه به شرایط هر منطقه، بهترین گزینه را انتخاب کرد. ممنون از توجه شما و عذر می‌خواهم اگر وقتتان را گرفتم. آقای دکتر ابراهیمی، در خدمت شما هستیم. لطفاً در رابطه با موضوع مدیریت لجن در حوزه آب و فاضلاب توضیحات خود را ارائه بفرمایید. ایشان عضو هیئت علمی دانشگاه علوم پزشکی اصفهان هستند.



دکتر افشین ابراهیمی:

عرض سلام، ادب و احترام و خسته نباشید خدمت حضار گرامی. دوستان پیش از این، به‌طور مفصل درباره لجن فاضلاب صحبت کردند. بد نیست اشاره کنم که بسیاری از نکاتی که درباره تصفیه، تثبیت و کاهش لجن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مطرح می‌شود، در مورد تصفیه‌خانه‌های آب نیز صدق می‌کند. در واقع، شاید در اینجا وضعیت حتی دشوارتر باشد؛ زیرا علاوه بر میکروارگانیسم‌ها و بار میکروبی موجود در لجن فاضلاب، با مواد شیمیایی نیز مواجه هستیم که اثرات محیط‌زیستی و بهداشتی لجن را بیشتر می‌کنند. در این بخش می‌خواهم به‌طور خلاصه درباره یک رویکرد کلی در زمینه بازیافت (recycle) و استفاده مجدد (reuse) لجن صحبت کنم. می‌دانیم که رشد شهرنشینی و افزایش نیاز به مصرف آب

باعث توسعه تصفیه‌خانه‌ها شده است؛ اما این توسعه، آلاینده‌های خاص خود را نیز دارد، به‌ویژه در بخش مواد شیمیایی‌ای که ما به فرآیند تصفیه اضافه می‌کنیم.

براساس برآوردها، یک تصفیه‌خانه متعارف آب سالانه حدود ۱۰۰ هزار تن لجن تولید می‌کند. در حالی که برخی گزارش‌های بین‌المللی اعلام کرده‌اند که در حال حاضر روزانه بیش از ۱۰۰۰ تن از این نوع لجن تولید می‌شود. بخشی از این اختلاف به این دلیل است که در بعضی کشورها، بسیاری از رسوبات و مواد ته‌نشین‌شده در زمره لجن محسوب نمی‌شوند، در حالی که در واقع ماهیت لجن دارند.

یکی از مسائل مهم، ابعاد محیط‌زیستی این لجن‌ها است. معمولاً در تصفیه‌خانه‌های آب، زلال‌سازها سالی یک‌بار تخلیه می‌شوند و لجن حاصل اغلب در کانال‌ها، رودخانه‌ها یا زمین‌های مجاور تخلیه می‌شود. اگرچه تاسیسات متعددی برای خشک‌سازی لجن وجود دارد، اما بررسی‌ها نشان می‌دهد بسیاری از آن‌ها هم‌اکنون غیرفعال یا بلااستفاده هستند.

امروزه با توجه به کمبود آب در مناطق مختلف، به‌ویژه در نواحی مرکزی ایران، کشاورزان متقاضی استفاده از این آب‌ها هستند. البته در اینجا واژه "آب" را به صورت کلی به کار می‌برم؛ زیرا از نظر فیزیکی، لجن با پساب تصفیه‌شده تفاوت دارد، اما از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، بسته به نوع فرآیند تصفیه، ممکن است مشابهت‌هایی داشته باشد. برای مثال، اگر منبع آب تصفیه‌خانه، آب زیرزمینی باشد، معمولاً کیفیت ثابتی در طول سال دارد و در نتیجه لجن حاصل نیز کیفیتی نسبتاً پایدار خواهد داشت. اما در منابع آب سطحی، با توجه به مواد مختلفی که برای تصفیه اضافه می‌شوند، لجن‌های متنوعی تولید می‌شود.

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که درصد بالایی از لجن تصفیه‌خانه‌های آب شامل اکسید سیلیس، اکسید آلومینیوم، اکسید آهن و اکسید کلسیم است. غلظت برخی از این ترکیبات بسیار بالا گزارش شده است؛ مثلاً غلظت آلومینیوم در لجن ناشی از استفاده از آلوم به حدود ۱۲۰ هزار میلی‌گرم بر کیلوگرم و در لجن حاصل از فریک کلراید (آهن) حدود ۲۲۰ هزار میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌رسد. این مقادیر بسیار بالا هستند. علاوه بر این، عناصری مانند منگنز، روی و کروم نیز در ترکیب این لجن‌ها یافت می‌شوند. در کنار آن‌ها، سایر آلاینده‌های شیمیایی نیز وجود دارند که در بسیاری موارد بدون بررسی دقیق، در اختیار کشاورزان یا صنایع قرار می‌گیرند.

در برخی نمونه‌ها، مشاهده شده که غلظت سیلیس در لجن بسیار بالا است و این میزان در طول زمان نیز پایدار باقی می‌ماند.

در بررسی‌های انجام‌شده، مشخص شده است که حجم کل ریزمنافذ در این لجن‌ها برای آلوم حدود ۴۲ هزار سانتی‌متر مربع بر گرم و برای فریک حدود ۱۲ هزار سانتی‌متر مربع بر گرم است. این ویژگی نشان می‌دهد که این نوع لجن‌ها می‌توانند سطح ویژه‌ی بالایی داشته باشند و به‌عنوان جاذب برای آنیون‌ها و فلزات سنگین مورد استفاده قرار گیرند. در مورد سمیت این لجن‌ها، متأسفانه تحقیقات محدود و گاه متناقض است. به‌طور معمول، ترکیبات آلومینیوم و فریک در این لجن‌ها آلاینده‌های اصلی محسوب می‌شوند، اما در برخی مطالعات حضور سرب و جیوه نیز گزارش شده است. به‌همین دلیل، لازم است موضوع سمیت این لجن‌ها به‌صورت دقیق‌تر مورد مطالعه و بازنگری قرار گیرد.

برخی تحقیقات نشان داده‌اند که ارتباطاتی میان وجود این ترکیبات و بیماری‌هایی نظیر آلزایمر، پارکینسون و اختلالات عصبی وجود دارد. بنابراین باید با دقت بیشتری به ترکیبات شیمیایی موجود در این لجن‌ها نگاه کرد.

در زمینه بازیافت و استفاده مجدد (recycle and reuse)، کارهای مختلفی انجام شده است، از جمله:

- بازیابی مواد منعقدکننده از لجن و استفاده مجدد آن‌ها در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب؛
- استفاده از لجن تصفیه‌خانه آب به‌عنوان منعقدکننده در تصفیه‌ی تکمیلی پساب، برای بهبود کیفیت نهایی؛
- استفاده از لجن تصفیه‌خانه‌ها در حذف آلاینده‌ها و فلزات سنگین؛
- استفاده از لجن به‌عنوان بستر در تالاب‌های مصنوعی؛
- به‌کارگیری آن در فرآیند آب‌گیری لجن فاضلاب؛
- استفاده از لجن در تولید آجر و سرامیک، به‌دلیل درصد بالای سیلیس؛
- به‌کارگیری آن در ساخت بتن و ملات؛
- و استفاده محدود در کشاورزی، به‌ویژه برای کاربری‌های خاک‌محور و تثبیت فسفر.

در مجموع، هدف از این ارائه این بود که تأکید کنم موضوع مدیریت لجن نباید فقط محدود به لجن فاضلاب باشد. لجن حاصل از تصفیه‌خانه‌های آب نیز نیازمند توجه جدی است. در حالی که استانداردهای مرتبط با لجن فاضلاب تا حد زیادی تدوین شده‌اند، در زمینه لجن حاصل از تصفیه آب هنوز خلأ مقرراتی وجود دارد. به‌نظر می‌رسد وزارت نیرو باید در این حوزه ورود کند و با همکاری دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی، مطالعات جامع‌تری را برای شناسایی، ارزیابی و استانداردسازی این نوع لجن‌ها انجام دهد. خیلی ممنونم.

رتبه اول ششمین دوره مسابقه ایده‌های برتر در علوم و مهندسی آب و فاضلاب (محور شبکه توزیع آب و تلفات)
(برگزار شده توسط انجمن آب و فاضلاب ایران، سال ۱۴۰۳)



عنوان: اصلاح تعرفه آب بهای صنعت

نگارندگان: غزنفر پور و زهرا مردانی سید مرتضی غزنفر پور^۱ و زهرا مردانی^۲

۱- کارشناس امور منابع آب حوضه آبریز زاینده‌رود و مدیرعامل شرکت بهره‌برداری میراب زاینده‌رود

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

چکیده

- مقدمه

کشور ایران، با اقلیم عمدتاً خشک و نیمه خشک و متوسط بارندگی بسیار کمتر از متوسط جهانی، کشوری کم آب است. استقرار صنایع پرمصرف و استفاده از تجهیزات ارزان قیمت و کهنه و غیر روزآمد در بخش مصرف آب، هدر رفت شدید آب، مصرف آب بسیار فراتر از استانداردهای جهانی و عدم بازچرخانی و استفاده از پساب‌ها و آب‌های خاکستری باعث افزایش مصارف و تخریب گسترده محیط‌زیست شده است. از طرفی محدودیت منابع آب توقف رشد صنعتی کشور را به همراه داشته است. بدیهی است این موضوع نمی‌تواند به صورت طولانی مدت ادامه‌دار باشد. شروع مجدد توسعه صنعتی سازگار با محیط‌زیست، مستلزم اصلاح الگوهای مصرف صنعتی و مصرف بهینه آب است و این موضوع به جز در سایه اعمال سیاست‌های تنبیهی برای مصرف‌کنندگان پرمصرف و تشویق مصرف‌کنندگان کم‌مصرف و استفاده‌کنندگان از روش‌های مدرن مصرف بهینه آب امکان‌پذیر نیست. یکی از مهم‌ترین راه‌های اعمال سیاست‌های تنبیهی و تشویقی و اجبار مصرف‌کنندگان آب صنعتی، اصلاح تعرفه‌های آب‌بها است. اهمیت این موضوع به حدی است که در پانزدهمین جلسه کارگروه ملی سازگاری با کم‌آبی مورد تاکید قرار گرفته است. در ایده پیشنهادی، با روشی نو و مبتنی بر سیاست‌های تنبیهی و تشویقی، اصلاح تعرفه آب بهای صنعتی در یکی از پرچالش‌ترین استان‌های کشور در حوزه مصرف آب، یعنی استان اصفهان، پیشنهاد می‌شود.

- ایده و روش پیشنهادی

الف) صنایع دارای مصرف صنعتی ۲۵ مترمکعب در شبانه‌روز و کمتر: از آنجایی که صناعی از این دست، صنایع کوچک متعلق به بخش خصوصی هستند، در صورت رعایت محدودیت‌های مصرف و رعایت دامنه مجاز، پیشنهاد می‌شود؛ تعرفه آب‌بها، معادل قیمت تمام‌شده، برای این گروه از بهره‌برداران در نظر گرفته‌شود.

- تعیین تعرفه براساس قیمت تمام‌شده آب مصرفی در منابع آب سطحی، شامل تمامی هزینه‌های سخت‌افزاری، نرم‌افزاری و بالاسری مصروف برای فرآیند مهار، جمع‌آوری، ذخیره، انتقال و توزیع یک مترمکعب آب خواهد بود. این مبلغ توسط کمیته تعرفه شرکت آب و فاضلاب یا شرکت آب منطقه‌ای تعیین می‌شود. تعرفه آب‌بهای صنعتی در سال ۱۴۰۳ در استان اصفهان مبلغ ۹۸۰/۰۰۰ ریال به‌ازای هر مترمکعب بوده است.

- تعیین تعرفه براساس قیمت تمام‌شده آب مصرفی در منابع آب زیرزمینی، شامل تمامی هزینه‌های سخت‌افزاری، نرم‌افزاری و بالاسری مصروف برای فرآیند حفاظت آبخوان و تعادل بخشی دشت، به‌ازای یک مترمکعب آب استحصالی خواهد بود.

ب) صنایع دارای مصرف صنعتی بیش از ۲۵ مترمکعب در شبانه‌روز: برای محاسبه تعرفه آب‌بهای صنعتی برای صنایع دارای مصرف بیش از ۲۵ مترمکعب در شبانه‌روز، روش ذیل پیشنهاد

می‌شود:

- ضریب مصرف (C.C): عبارت است از نسبت حجم آب مصرفی سالیانه به مقدار مصرف مجاز (Permissible consumption amount)

$$\text{حجم آب مصرفی سالیانه} \\ \text{حجم مجاز مصرف سالیانه} = \text{ضریب مصرف (C.C)}$$

که C.C: ضریب مصرف است (یک ضریب تنبیهی است برای مصارف صنعتی بیش از حد مجاز) که برای ارقام کمتر از ۱، رقم ۱ در نظر گرفته می‌شود و در هر سال، با توجه به آمار و اطلاعات هر دوره و توسط شرکت آب منطقه‌ای و یا شرکت آب و فاضلاب تعیین می‌شود.

- شاخص باز چرخانی (I.r): شاخصی است تشویقی در خصوص بازگشت مجدد آب مصرفی به چرخه تولید که براساس ضریب بازچرخانی (C.r) به صورت سالیانه یا ادواری تعیین می‌شود. ضریب بازچرخانی عبارت است از نسبت آب برگشتی به چرخه تولید به آب مصرفی.

$$\text{حجم آب برگشتی به چرخه تولید} \\ \text{حجم سالیانه آب مصرفی} = \text{ضریب بازچرخانی (C.r)}$$

شاخص و ضریب بازچرخانی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- تعیین شاخص تشویقی بازچرخانی براساس ضریب بازچرخانی

بیش از ۰/۵۵	- ۰/۴	- ۰/۱	۰	ضریب بازچرخانی (C.r)
۱-۳۰	- ۱/۱۷	- ۱/۱۰	۱	شاخص باز چرخانی (I.r)
۰/۵۵	۰/۴	۰/۱		
۱/۱۷	۱/۱۰	۱		

• ضریب بازچرخانی حداکثر تا پایان اردیبهشت ماه هر سال توسط سازمان "صمت" تعیین و به شرکت آب منطقه‌ای یا شرکت آب و فاضلاب اعلام می‌شود.

• شاخص بازچرخانی، پس از راستی‌آزمایی و تایید ضریب بازچرخانی اعلام شده، توسط شرکت‌های آب منطقه‌ای یا شرکت آب و فاضلاب تعیین می‌شود.

- ضریب مصرف بهینه (C.Oc): ضریبی هم تشویقی و هم تنبیهی است و عبارت است از نسبت حجم آب مصرفی به ازای یک واحد محصول تمام‌شده در واحد صنعتی به حجم آب مصرفی به ازای یک واحد محصول تمام‌شده براساس استاندارد جهانی

$$\text{ضریب مصرف بهینه (C.Oc)} \\ = \frac{\text{حجم آب مصرفی در ازای تولید یک واحد محصول تمام شده}}{\text{حجم آب مصرفی تولید واحد یک محصول تمام شده براساس استاندارد جهانی}}$$

• ضریب مصرف بهینه، حداکثر تا پایان اردیبهشت ماه هر سال توسط سازمان "صمت" به شرکت آب منطقه‌ای یا شرکت آب و فاضلاب اعلام می‌گردد.

- شاخص تاثیر مثبت اقتصادی (I.pei): شاخص تاثیر مثبت اقتصادی، شاخصی تشویقی است در جهت حمایت از تولید ملی که هر ساله با توجه به تاثیر مثبت صنعت موردنظر در اقتصاد و تولید ناخالص ملی و منطقه‌ای، توسط سازمان "صمت" تعیین و حداکثر تا پایان اردیبهشت ماه هر سال به شرکت‌های آب منطقه‌ای یا شرکت آب و فاضلاب اعلام می‌شود.

• شاخص تاثیر مثبت اقتصادی بین ۱/۱۵ - ۱ خواهد بود.

- قیمت تمام شده (F.P) آب مصرفی:

• قیمت تمام شده آب مصرفی در منابع آب سطحی، شامل تمامی هزینه‌های سخت‌افزاری، نرم‌افزاری و بالاسری مصروف برای فرآیند مهار، جمع‌آوری، ذخیره، انتقال و توزیع حجم آب مصرفی خواهد بود.

• قیمت تمام شده آب مصرفی در منابع آب زیرزمینی، شامل تمامی هزینه‌های سخت‌افزاری، نرم‌افزاری و بالاسری مصروف برای فرآیند حفاظت آبخوان و تعادل بخشی دشت، برای حجم آب استحصالی خواهد بود.

- قیمت نهایی (T.P) بهای آب مصرفی: قیمت نهایی بهای آب مصرفی برای صنایع دارای مصرف بیش از ۲۵ مترمکعب در شبانه روز، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(T.P) = (C.c)^2 * \frac{C.oc}{I.r * I.pei} * F.P$$

که C.c: Consumption Coefficient، T.P: Total Price، C.oc: optimum consumption Coefficient، I.r: recycling Index، I.pei: positive economic impact Index، F.P: Final Price

- سخن آخر

در ایده‌ای که در خصوص تعیین تعرفه آب بهای صنعتی از نظر گذشت، سیاست‌ها و خطی‌مشی‌ها، تشویقی و تنبیهی در خصوص استفاده از آب‌های خاکستری، پساب‌ها، بازچرخانی آب و صرفه‌جویی در مصرف آب صنعتی و مصرف بهینه آن لحاظ شده و استفاده از تجهیزات و ادوات مناسب، به‌روز و کارآمد، هم‌چنین سرمایه‌گذاری صاحبان صنایع خصوصی و مدیران صنایع دولتی، در این حوزه را توجیه‌پذیر، اقتصادی و جذاب نموده و راه را برای سرمایه‌گذاری متولیان استحصال، تولید، انتقال و توزیع هموار خواهد نمود، به‌علاوه باعث برون‌رفت توسعه صنعتی کشور از چالش و معضل کمبود و محدودیت منابع آب و توقف و رکود فعلی خواهد شد.

رتبه دوم ششمین دوره مسابقه ایده‌های برتر در علوم و مهندسی آب و فاضلاب (محور شبکه توزیع آب و تلفات)
(برگزار شده توسط انجمن آب و فاضلاب ایران، سال ۱۴۰۳)



عنوان: ابداع و تولید نرم‌افزار تحلیل قبوض برق در اکسل برای شرکت‌های آب و فاضلاب ایران

نگارنده: ملیحه معززی فرهادی

کارشناس ارشد برق کنترل، آب و فاضلاب جنوب شرقی استان تهران

چکیده

- مقدمه

تحلیل داده‌ها نقش مهمی در پردازش حجم عظیمی از اطلاعات و دستیابی به بینش‌های ارزشمند برای سازمان‌ها ایفا می‌کند. در حال حاضر، اطلاعات مربوط به قبوض برق تأسیسات شرکت‌های آب و فاضلاب در یک سامانه متمرکز جمع‌آوری می‌شود. با این حال، تحلیل دستی این حجم از داده‌ها فرآیندی بسیار زمان‌بر و پرچالش است. عدم وجود یک رویکرد تحلیلی سیستماتیک، منجر به از دست رفتن فرصت‌های مهم برای بهبود عملکرد سیستم می‌شود. تحلیل قبوض برق شامل ارزیابی صحت قبوض، تحلیل روند مصرف، محاسبه راندمان تأسیسات، بررسی ساعات کارکرد تجهیزات و تحلیل جریمه‌ها و غیره است. این فرآیند می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد سیستم و کاهش هزینه‌ها کمک شایانی نماید.

- ایده پیشنهادی

نرم‌افزار تولید شده تحلیل قبوض برق با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته، تحلیلی جامع از مولفه‌های انرژی الکتریکی ارائه می‌دهد. این نرم‌افزار با قابلیت‌هایی مانند شناسایی خطاها، دسته‌بندی صورت‌حساب‌ها، محاسبه دقیق پارامترها، بررسی صحت محاسبات قبض، تحلیل الگوی مصرف و ارائه گزارش‌های مدیریتی، به مدیران کمک می‌کند تا مصرف برق را رصد و پایش کنند، هدررفت برق را کاهش دهند و مصرف تأسیسات برقی را بهینه‌سازی کنند. این نرم‌افزار گامی نو در جهت مدیریت مصرف بهینه انرژی و حفظ منابع طبیعی برای نسل‌های آینده محسوب می‌شود.

- روش پیشنهادی

برای توسعه نرم‌افزار تحلیل قبوض برق، رویکردی علمی و سیستماتیک اتخاذ شد که بر تحلیل دقیق فرآیندهای صدور قبوض و تطبیق آن‌ها با بخشنامه‌های جاری شرکت توزیع و استانداردهای حوزه آب و فاضلاب استوار است. در این راستا، ابتدا اطلاعات لازم شامل فرمول‌های محاسباتی و قوانین مرتبط از منابع معتبر مانند بخشنامه‌های شرکت توزیع، کتاب و فرم‌های داخلی تخصصی آب و فاضلاب جمع‌آوری شد. سپس نمونه قبوض برق بررسی و آیتم‌ها و روابط ریاضی مورد استفاده در محاسبات استخراج شد. در مرحله تحلیل، فرمول‌های محاسباتی مانند بهای قدرت، ضریب بار و ضریب دیمانده به‌دقت مدل‌سازی شدند. به‌عنوان مثال، فرمول محاسبه بهای قدرت به صورت رابطه (۱) است:

$$CDe = CalcDe * DeR * NDC / 30 \quad (1)$$

که CDe : هزینه دیمانده، $CalcDe$: دیمانده محاسبه شده، DeR : نرخ دیمانده و NDC : تعداد روز دوره هستند.

این مدل‌های ریاضی با جزئیات کامل در نرم‌افزار پیاده‌سازی شدند تا محاسبات دقیق و مطابق با استانداردها انجام شوند. پیاده‌سازی نرم‌افزار به‌گونه‌ای طراحی شد که نه تنها محاسبات پیچیده را به‌صورت خودکار انجام دهد، بلکه رابط کاربری ساده و قابل‌فهمی برای مدیران انرژی در شرکت‌های آب و فاضلاب ارائه کند. علاوه بر این، با توجه به احتمال تغییر در قوانین و فرمول‌ها

در آینده، امکان به‌روزرسانی آسان نرم‌افزار نیز فراهم شد. در نهایت، نتایج محاسبات نرم‌افزار با قبوض برق واقعی و محاسبات دستی انجام‌شده در شرکت‌های توزیع تطبیق داده شد تا دقت و صحت عملکرد آن تأیید شود. با این رویکرد، نرم‌افزار توانست به ابزاری قدرتمند برای کاهش خطاهای محاسباتی، افزایش سرعت پردازش و بهبود کارایی در فرآیند بررسی قبوض برق تبدیل شود.

- سخن آخر

نرم‌افزار تحلیل قبض برق طراحی شده با ارائه اطلاعات جامع در زمینه مصرف برق، هزینه‌ها و تغییرات الگوهای مصرف در بازه‌های زمانی مختلف، امکان بررسی و تحلیل دقیق‌تری از رفتارهای مصرفی تاسیسات برقی آب و فاضلاب را فراهم کرده است. داده‌ها و نمودارهای حاصل از این نرم‌افزار نشان می‌دهند که الگوهای مصرف قابل شناسایی و ارزیابی هستند و می‌توانند مبنای موثری برای تصمیم‌گیری‌های مرتبط با بهینه‌سازی مصرف و کاهش هزینه‌ها باشند. بر اساس خروجی‌های نرم‌افزار، امکان تعیین سهم هر منطقه جغرافیایی از مصرف برق کل فراهم شده که می‌تواند به برنامه‌ریزی دقیق‌تر و هدفمندتر در سطح کلان منجر شود. علاوه بر این، شناسایی نقاط پرمصرف و ارائه راه‌کارهای عملی برای مدیریت مصرف انرژی از جمله دستاوردهای مهم این نرم‌افزار محسوب می‌شود. این سیستم علاوه بر کمک به شرکت در جهت کاهش هزینه‌ها، قابلیت آن را دارد که به‌عنوان ابزاری در سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های ملی برای بهینه‌سازی شبکه توزیع برق مورد استفاده قرارگیرد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که توسعه و به‌کارگیری چنین ابزارهایی می‌تواند گامی موثر در راستای مدیریت هوشمند انرژی و پایداری شبکه برق باشد.

- مراجع

رجبی، ق.ع.، و مبینی بیدگلی، ع.، (۱۳۸۰). "مدیریت مصرف انرژی در سیستم آب و فاضلاب (چالش‌ها، راه‌کارها، عملکردها، پیشنهادات)"، سومین همایش ملی انرژی. تعرفه‌های برق و شرایط عمومی آن‌ها از اول بهمن ماه ۱۴۰۰. راهنمای جامع بهره‌برداری از تاسیسات آب و فاضلاب، جلد ششم، مدیریت مصرف انرژی در تاسیسات آب و فاضلاب. آیین‌نامه تکمیلی تعرفه‌های برق (با اعمال الحاقیه شماره ۴ و اصلاحات مربوطه).

رتبه سوم ششمین دوره مسابقه ایده‌های برتر در علوم و مهندسی آب و فاضلاب (محور شبکه توزیع آب و تلفات)
(برگزار شده توسط انجمن آب و فاضلاب ایران، سال ۱۴۰۳)



عنوان: سیستم هوشمند یکپارچه برای کاهش هدررفت آب و نظارت بر زباله‌های آبی با استفاده از اینترنت اشیا و هوش

مصنوعی

نگارنده: فاطمه فرشی

کارشناس پارک علم و فناوری نیرو

چکیده

مقدمه

در دنیای امروز، بحران‌های مرتبط با منابع آب و مدیریت پسماندها به یکی از بزرگترین چالش‌های محیط‌زیستی تبدیل شده‌اند. هدررفت آب و آلودگی منابع آبی به علت ورود زباله‌های مختلف، تأثیرات منفی زیادی بر محیط‌زیست و زندگی انسان‌ها دارند. با توجه به رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی، مدیریت هوشمند این منابع ضروری‌تر از همیشه به نظر می‌رسد. برای مقابله با این مشکلات، ایده حاضر، یک سیستم هوشمند یکپارچه است که از اینترنت اشیا (IoT) و هوش مصنوعی (AI) بهره می‌برد تا به طور هم‌زمان هدررفت آب را کاهش داده و زباله‌های آبی را نظارت و مدیریت کند. این سیستم با نصب حسگرها و دوربین‌های هوشمند در شبکه‌های آبی و منابع آبی، اطلاعات دقیقی از وضعیت آب و پسماندها جمع‌آوری کرده و به کمک الگوریتم‌های پیشرفته، به شناسایی نشت‌ها، پیش‌بینی مشکلات و تشخیص زباله‌ها می‌پردازد.

این ایده نه تنها در کاهش هدررفت منابع آب تأثیرگذار خواهد بود، بلکه با نظارت بر زباله‌های آبی و بهینه‌سازی بازیافت پسماندها، به حفاظت از محیط‌زیست و پایداری منابع طبیعی کمک خواهد کرد. به این ترتیب، این سیستم می‌تواند نقش مهمی در مدیریت پایدار آب و زباله ایفا کند و الگویی نوین برای شهرها و کشورهایی که با چالش‌های مشابه روبرو هستند، ارائه دهد.

هدف

این ایده با هدف کلی استفاده از تکنولوژی‌های روز دنیا در جهت حل چالش‌های هدررفت منابع آب و مدیریت زباله‌ها ارائه شده است تا بتواند راه‌کاری ارائه کند که علاوه بر کاهش هدررفت آب، از ورود زباله‌های جامد و مضر به منابع آبی جلوگیری شده و فرایندهای بازیافت و تصفیه بهینه شوند.

ویژگیهای کلیدی ایده:

- ۱- نظارت بر هدررفت آب:

 - استفاده از حسگرهای IoT در شبکه‌های آبرسانی برای شناسایی نشت‌ها، تحلیل فشار و جریان آب و ارائه هشدارهای زودهنگام.
 - استفاده از الگوریتم‌های AI برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی نشت‌ها و بهینه‌سازی توزیع منابع آب.

- ۲- نظارت بر زباله‌های آبی:

 - نصب حسگرها و دوربین‌های هوشمند برای شناسایی زباله‌های وارد شده به منابع آبی (رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، مخازن)
 - تحلیل ترکیب و نوع زباله‌ها (پلاستیک، فلزات، مواد آلی) و ارسال هشدارهای فوری برای مقابله با آلودگی.
 - جمع‌آوری و مدیریت داده‌ها برای پیشگیری از آلودگی‌های آینده و بهینه‌سازی فرایند بازیافت زباله‌های آبی.

۳- مدیریت بهینه پسماندهای تصفیه آب:

- پیاده‌سازی سیستم‌های هوشمند برای نظارت بر تولید پسماند و لجن در تصفیه‌خانه‌ها و فرایندهای بهینه‌سازی بازیافت آن‌ها.

- الگوریتم‌های AI برای پیش‌بینی حجم و ترکیب پسماند و تعیین بهترین روش‌های دفع یا بازیافت آن‌ها.

۴- یکپارچگی و هماهنگی میان سیستم‌های آب و زباله:

- طراحی یک پلتفرم مدیریت یکپارچه که بتواند داده‌ها را از منابع مختلف (آب، زباله، تصفیه‌خانه‌ها) جمع‌آوری و آنالیز کرده و به مدیران کمک کند تا تصمیمات بهتر و مبتنی بر داده اتخاذ کنند.

- استفاده از بلاکچین برای افزایش شفافیت داده‌ها و اطمینان از امنیت اطلاعات.

نتایج و مزایا:

- کاهش هدررفت آب از طریق شناسایی سریع نشت‌ها و بهینه‌سازی مصرف

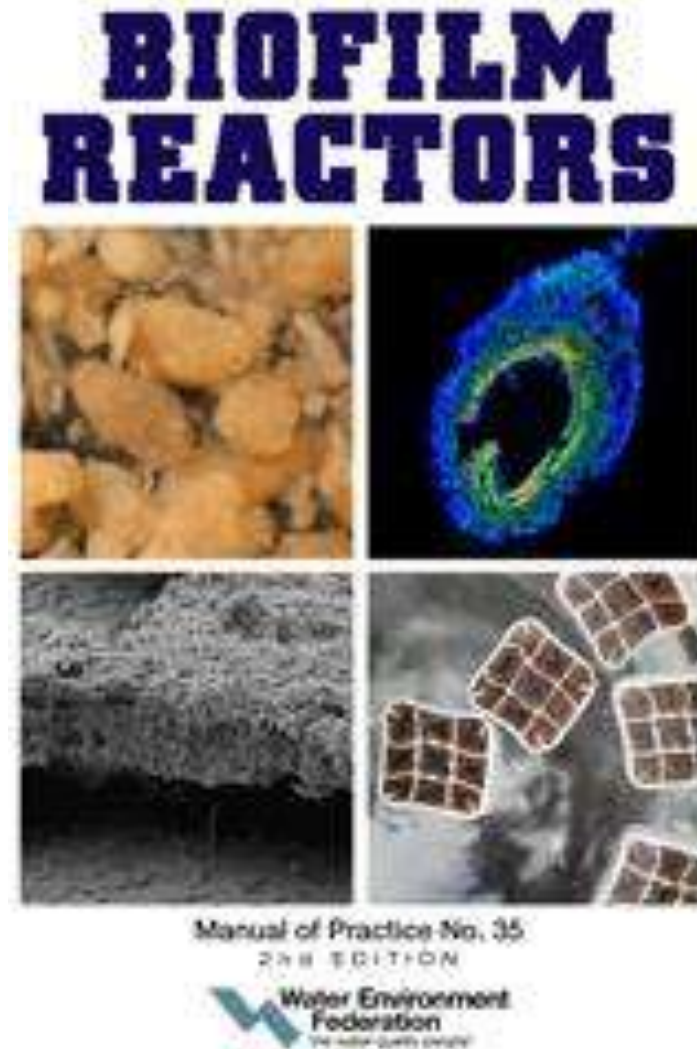
- پیشگیری از آلودگی منابع آبی با شناسایی زباله‌های موجود در منابع آب و دفع به‌موقع آن‌ها

- بازیافت و استفاده مجدد از پسماندهای آبی و لجن تولیدی در تصفیه‌خانه‌ها

- مدیریت بهینه منابع آب و زباله و کاهش هزینه‌های ناشی از هدررفت و آلودگی

- افزایش شفافیت و اطلاع‌رسانی به‌موقع از طریق گزارش‌ها و هشدارهای خودکار

عنوان: واکنشهای بیوفیلم
ناشر: فدراسیون محیط‌زیست آب (WEF)
زمان انتشار: سال ۲۰۲۵



کتاب **Biofilm Reactors, 2nd Edition (MOP 35)**. این مرجع فنی به‌طور دقیق شامل فصل‌ها و موضوعات زیر است:

۱- مقدمه

- مروری بر فرآیندهای رشد چسبیده (Fixed-Film) و جایگاه آن‌ها در تصفیه فاضلاب
- تاریخچه و کاربردهای صنعتی و شهری

۲- زیست‌شناسی فرآیندهای رشد چسبیده

- ساختار و عملکرد بیوفیلم‌ها
- میکروبیولوژی، سینتیک واکنش‌ها و انتقال جرم

۳- طراحی و بهره‌برداری فیلترهای چکنده و سیستم‌های ترکیبی TF/SC

- معیارهای طراحی هیدرولیکی و آلی
- مشکلات بهره‌برداری و راهکارها

۴- تماس‌دهنده‌های بیولوژیکی چرخان (RBC)

- اصول طراحی، کنترل رشد بیوفیلم و نگهداری

۵- راکتورهای بیوفیلم بستر متحرک (MBBR)

- انتخاب و طراحی مدیا
- مدل سازی و بهینه سازی عملکرد

۶- فرآیندهای هیبریدی (IFAS) و مشابه

- ترکیب رشد معلق و چسبیده
- مزایا، محدودیتها و کاربردها

۷- فیلترهای بیولوژیکی و فناوریهای نوظهور

- فیلترهای هوادهی شده بیولوژیکی (BAF)
- فناوریهای جدید و در حال توسعه

۸- تصفیه نهایی

- زلال سازی و فیلتراسیون پساب

۹- مدل سازی فرآیندها

- توسعه و کاربرد مدلها برای IFAS, MBBR, BAF و TF
- استفاده از مدلها در طراحی و پیش بینی عملکرد

۱۰- مطالعات موردی

- نمونههای واقعی از طراحی، ارتقا و رفع مشکلات عملیاتی

این مرجع برای طیف گستردهای از متخصصان و تصمیم گیران حوزه آب و فاضلاب کاربردی است، از جمله:

- مهندسان طراح تصفیه خانهها به ویژه در فرآیندهای رشد چسبیده و هیبریدی
- مشاوران و پیمانکاران پروژههای آب و فاضلاب
- مدیران و بهره برداران تصفیه خانهها که به دنبال بهینه سازی عملکرد هستند
- پژوهشگران و دانشجویان رشتههای مهندسی محیط زیست و مهندسی آب
- سازمانهای خدمات شهری و آبفا برای برنامه ریزی و ارتقای سیستمها

اطلاعات بیشتری از این کتاب در لینک زیر موجود است:

<https://www.accesswater.org/publications/-10118327/biofilm-reactors-2nd-edition>

اخبار و فعالیت‌های عمده انجام شده انجمن آب و فاضلاب ایران در سه ماهه دوم سال ۱۴۰۴ به شرح زیر است:

- برگزاری دومین جلسه شورای سیاستگذاری همایش ۱۴۰۴ (۲۵ تیرماه)
- برگزاری جلسات سوم و چهارم شورای اجرایی همایش ۱۴۰۴ (۱۱ خردادماه و ۳۰ تیرماه)
- برگزاری جلسه صد و یکم هیئت مدیره انجمن آب و فاضلاب ایران (۱ مردادماه)
- انتشار خبرنامه شماره ۱۱۱-۱۱۲ (۳۱ تیرماه)
- وبینار مشترک انجمن آب و فاضلاب ایران و دانشگاه صنعتی اصفهان (۶ مردادماه)
- جلسه آقای دکتر تابش با آقای دکتر امینی و معاونین و مدیران شرکت مهندسی آب و فاضلاب (۱۱ مردادماه)
- انتشار قسمت اول مصاحبه با آقای مهندس نامجو در کانال‌های تاریخ شفاهی صنعت آب و فاضلاب ایران (مردادماه)
- برگزاری جلسات پنجم و ششم شورای اجرایی همایش ۱۴۰۴ (۱۵ و ۲۸ مردادماه)
- برگزاری جلسه صد و دوم هیئت مدیره انجمن آب و فاضلاب ایران (۲۹ مردادماه)
- برگزاری سومین جلسه شورای سیاستگذاری همایش ۱۴۰۴ (۲۹ مردادماه)
- انتشار خبرنامه شماره ۱۱۳ (۳۱ مردادماه)
- مصاحبه دکتر تابش با مجموعه نام دل، مصاحبه دکتر تابش با خبرگزاریها، مصاحبه مطبوعاتی دکتر نایب، مصاحبه دکتر جلیلی قاضی زاده با شبکه اینترنتی (مردادماه)
- انتشار قسمت دوم مصاحبه با آقای مهندس نامجو در کانال‌های تاریخ شفاهی صنعت آب و فاضلاب ایران (شهریورماه)
- برگزاری وبینار تخصصی ۵۵ (۵ شهریورماه)
- تشکیل و برگزاری کارگروه‌های بررسی بحران آب (۱۱ شهریورماه)
- برگزاری جلسه صدم و سوم هیئت مدیره انجمن آب و فاضلاب ایران (۲۶ شهریورماه)
- برگزاری جلسات هفتم و هشتم شورای اجرایی همایش ۱۴۰۴ (۱۱ و ۳۰ شهریورماه)
- انتشار خبرنامه شماره ۱۱۳ (۳۱ شهریورماه)
- انتشار نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب، دوره ۱۰، شماره ۲، شهریورماه ۱۴۰۴ (۳۱ شهریورماه)

انجمن آب و فاضلاب ایران
IWWA
Iran Water & Wastewater Association

خبرنامه انجمن آب و فاضلاب ایران

IWWA Newsletter

Vol. 10, No. 113, August 2025

سال دهم، شماره صد و یازدهم، مرداد ۱۴۰۴

مطلب این شماره:

- اخبار انجمن
- اخبار صنعت
- یادداشت‌های ویژه
- معرفی پروژه‌ها
- معرفی استانداردها
- معرفی افراد

مطلب این شماره:

- اخبار انجمن
- اخبار صنعت
- یادداشت‌های ویژه
- معرفی پروژه‌ها
- معرفی استانداردها
- معرفی افراد

همکاران این شماره:

دکتر مسعود تاشی
دکتر جعفر یزدی
محمدرضا سموعی مقدم
سلمان اسپهبدشیرازی
رامند مظفری نیایور

ساختن اول:

رنگ شهروند، یک مدور منابع آب؛ عبور از بحران با همبستگی

سیاست شماره ۹۶:

سوال: بهترین عامل استحسانات فرنی در مصرف آب در خانه‌ها چیست؟

انگلیسی از: مازن مسرف و آروین زاهدی

۳۰ فصل: تجهیزات کامند مصرف آب منزل

۳۰ فصل: سیستم‌های تصفیه و تصفیه آب

انگلیسی از: آروین اسپهبدشیرازی و رامند مظفری نیایور

۳۰ فصل: سیستم‌های تصفیه و تصفیه آب

انگلیسی از: آروین اسپهبدشیرازی و رامند مظفری نیایور

انجمن آب و فاضلاب ایران
IWWA
Iran Water & Wastewater Association

خبرنامه انجمن آب و فاضلاب ایران

IWWA Newsletter

Vol. 10, No. 111-112, June-July 2025

سال دهم، شماره صد و یازدهم و صد و بیستم، خرداد و تیر ۱۴۰۴

مطلب این شماره:

- اخبار انجمن
- اخبار صنعت
- یادداشت‌های ویژه
- معرفی پروژه‌ها
- معرفی استانداردها
- معرفی افراد

مطلب این شماره:

- اخبار انجمن
- اخبار صنعت
- یادداشت‌های ویژه
- معرفی پروژه‌ها
- معرفی استانداردها
- معرفی افراد

همکاران این شماره:

دکتر مسعود تاشی
دکتر جعفر یزدی
محمدرضا سموعی مقدم
سلمان اسپهبدشیرازی
رامند مظفری نیایور

ساختن اول:

آب، خط مقدم امنیت ملی

سیاست شماره ۹۶:

سوال: بهترین عامل استحسانات فرنی در مصرف آب در خانه‌ها چیست؟

انگلیسی از: مازن مسرف و آروین زاهدی

۳۰ فصل: تجهیزات کامند مصرف آب منزل

۳۰ فصل: سیستم‌های تصفیه و تصفیه آب

انگلیسی از: آروین اسپهبدشیرازی و رامند مظفری نیایور

۳۰ فصل: سیستم‌های تصفیه و تصفیه آب

انگلیسی از: آروین اسپهبدشیرازی و رامند مظفری نیایور

انجمن آب و فاضلاب ایران
IWWA
Iran Water & Wastewater Association

خبرنامه انجمن آب و فاضلاب ایران

IWWA Newsletter

Vol. 10, No. 114, September 2025

سال دهم، شماره صد و چهاردهم، شهریور ۱۴۰۴

مطلب این شماره:

- اخبار انجمن
- اخبار صنعت
- یادداشت‌های ویژه
- معرفی پروژه‌ها
- معرفی استانداردها
- معرفی افراد

مطلب این شماره:

- اخبار انجمن
- اخبار صنعت
- یادداشت‌های ویژه
- معرفی پروژه‌ها
- معرفی استانداردها
- معرفی افراد

همکاران این شماره:

دکتر مسعود تاشی
دکتر جعفر یزدی
محمدرضا سموعی مقدم
سلمان اسپهبدشیرازی
رامند مظفری نیایور

ساختن اول:

زنگ مهر، رنگ بیداریش برای آب

سیاست شماره ۹۶:

سوال: کاربرد آب در کوره‌های زیر زمینی چیست؟

انگلیسی از: مازن مسرف و آروین زاهدی

۳۰ فصل: تجهیزات کامند مصرف آب منزل

۳۰ فصل: سیستم‌های تصفیه و تصفیه آب

انگلیسی از: آروین اسپهبدشیرازی و رامند مظفری نیایور

۳۰ فصل: سیستم‌های تصفیه و تصفیه آب

انگلیسی از: آروین اسپهبدشیرازی و رامند مظفری نیایور

لینک آپارات	موضوع (ارائه دهنده)	رویداد	ردیف
https://www.aparat.com/v/hevFM?playlist=28325845	ویروس کرونا در صنعت آب و فاضلاب (دکتر عبدالله رشیدی)	وبینارهای تخصصی انجمن آب و فاضلاب ایران	۱
https://www.aparat.com/v/Antvj?playlist=28327448	راه کارهای بهبود کیفیت پساب برکه‌های تثبیت فاضلاب (دکتر حسین ساسانی)		
https://www.aparat.com/v/Pob7C?playlist=29641530	مروری بر ظرفیت‌های ارتقای پژوهش و نوآوری در حوزه آب کشور (دکتر مجتبی شفیعی)		
https://www.aparat.com/v/Uf3N5?playlist=28368237	نشت‌یابی در شبکه‌های آبرسانی (دکتر محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده)		
https://www.aparat.com/v/4QcMo?playlist=30860968	مدیریت شورابه‌های ناشی از سامانه‌های نمک‌زدایی با تاکید بر فناوری‌های ZLD (دکتر عباس اکبرزاده)		
https://www.aparat.com/v/mTSiK?playlist=737673	چالش‌های روش‌های جایگزین برای بهبود و مدیریت کیفیت آب (دکتر مسعود یونسین، مهندس سلیمه رضایی‌نیا و دکتر محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده)		
https://www.aparat.com/v/DtoQY?playlist=33226803	ارزیابی عملکرد مدل‌های متابولیسم آب شهری قابلیت‌ها و محدودیت‌ها (دکتر کوروش بهزادبان)		
https://www.aparat.com/v/FPtCY?playlist=34242002	سواد آبی در جوامع شهری (دکتر شروین جمشیدی)		
https://www.aparat.com/v/5c7Ph?playlist=35313047	تأثیرات شرایط اقلیمی بر روی ظرفیت شبکه‌ها و شکست (احسان روشنی)		
https://www.aparat.com/v/W8P7J?playlist=35547113	ارزیابی اثرات محیط‌زیستی پروژه‌های آب و فاضلاب با رویکرد چرخه حیات (LCA) (مهندس هانیه صفرپور)		
https://www.aparat.com/v/y1euk?playlist=36262652	کاربردهای اقتصاد چرخشی در صنعت آب و فاضلاب (دکتر سیدحسین سجادی‌فر)		
https://www.aparat.com/v/36WoO?playlist=37676753	توسعه و بهره‌برداری از شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب با رویکرد تمرکززدایی (دکتر علی حقیقی)		
https://www.aparat.com/v/f8dyx?playlist=37677090	نقشه‌راه برای ارتقای شبکه‌های آبرسانی موجود به هوشمند (دکتر محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده)		
https://www.aparat.com/v/RPkeb?playlist=38227690	مبانی نظری تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار شبکه‌های توزیع آب (دکتر مسعود تابش)		
https://www.aparat.com/v/mbNDM?playlist=39035474	آشنایی با تکنیک PCR در تحقیقات محیط‌زیست و بهداشت محیط (دکتر رحیم عالی)		
https://www.aparat.com/v/hwC9l?playlist=39248099	بررسی ۲۵،۰۰۰ مقاله محیط‌زیست برای یافتن داغترین موضوعات تحقیقاتی (دکتر علیرضا بازارگان)		
https://www.aparat.com/v/6Ewy5?playlist=39248537	توسعه مدل روندیابی مقیاس قاره‌ای میزوروت به منظور لحاظ دریاچه‌ها و مخازن (دکتر شروان قراری)		
https://www.aparat.com/v/epxDt	مروری بر وضعیت و تجارب تصفیه آب و فاضلاب در ژاپن (یحیی محزون)		
https://www.aparat.com/v/EaeTg	سیستم‌های آبی پایدار و تاب‌آور (دکتر راضیه فرمانی)		
https://www.aparat.com/v/3sxtT?playlist=737673	ارزیابی و بهینه‌سازی انرژی در سیستم‌های توزیع آب (دکتر سعید هاشمی)		
https://www.aparat.com/v/Fcvyw?playlist=737673	بازچرخانی و مدیریت کیفی زهاب‌های کشاورزی (دکتر بهمن یارقالی)		
https://www.aparat.com/v/IFHhK?playlist=737673	بازچرخانی آب‌های خاکستری در ساختمان‌های بلندمرتبه و مجتمع‌های مسکونی جدید در قالب		

	مباحث الزامی جهت ساخت مسکن (دکتر عباس اکبرزاده و همکاران)		
https://www.aparat.com/v/D7BvT?playlist=737673	مقدمه‌ای بر یادگیری ماشین برای کاربردهای مهندسی آب شهری (دکتر سیدامیر هوشنگ آیتی)		
https://www.aparat.com/v/D7BvT	طراحی پایدار زیرساخت‌های دفع آب سطحی و فاضلاب شهری به کمک بهینه‌سازی چند هدفه و سیستم‌های کمک تصمیم‌گیری (دکتر امین ابراهیم بخشی پور)		
https://www.aparat.com/v/rKPvH/	چالش‌های مدل‌سازی در بهره‌برداری بهینه و هوشمند از شبکه‌های توزیع آب (دکتر مهدی دینی)		
https://www.aparat.com/v/jTbgx/	مدلسازی سیلاب و زهکشی شهری- اهمیت و رویکردها و مقدمه‌ای بر مدل TU-FLOW و کاربردهای آن (دکتر حامد توکلی‌فر، دکتر دانکن کیتس)		
https://www.aparat.com/v/Nig5q/	کاربرد متدولوژی ارزش برای بهبود پروژه‌های بزرگ آب و آبفا (دکتر کامران امامی)		
https://www.aparat.com/v/AxQw3	آلودگی منابع آب و خاک به آرسنیک و روش‌های پالایش آن (دکتر بهمن یارقلی)		
https://www.aparat.com/v/kdcZC	مدل‌های داده‌محور و برخط پیش‌بینی سیلاب در سیستم‌های جمع‌آوری آب باران شهری (مهندس فرزاد پیاده)		
https://www.aparat.com/v/cQevG	پیل سوختی میکروبی به‌عنوان یک راه‌حل پایدار برای تصفیه فاضلاب: از تحقیق تا کاربرد (دکتر علیرضا ولی‌پور مرندي)		
https://www.aparat.com/v/zNPCU	بیوراکتورهای غشایی در تصفیه فاضلاب: وضعیت موجود، چالش‌ها و فرصت‌های پیش‌رو (دکتر مسعود طاهریون)		
https://www.aparat.com/v/AOrNB	اثرات تغییر اقلیم بر کیفیت رواناب‌های شهری: از مدل‌سازی تا رویکردهای مدیریتی مبتنی بر توسعه پایدار (دکتر یاسر طهماسبی بیرگانی)		
https://www.aparat.com/v/5SVaJ	نبرد شبکه‌های متمرکز و غیرمتمرکز جمع‌آوری آب شهری: از دیدگاه افزونگی (مهندس سینا حصارکزاری)		
https://www.aparat.com/v/O3SCK	مدیریت ناترازی تولید و مصرف آب با تکیه بر مدیریت مصرف آب (دکتر عباس اکبرزاده)		
https://www.aparat.com/v/OnIs2	واکاوی تجربه کشور چین در حفاظت از منابع طبیعی و مدیریت مصرف آب (دکتر بنفشه زهرایی)		
https://www.aparat.com/v/TtImP	ضربه آبی، چرا و چگونه؟ از مفاهیم تا اجرا (مهندس ابوالفضل رضایی‌راد)		
https://www.aparat.com/v/ieWtp	پکیج‌های تصفیه فاضلاب؛ معیارهای طراحی و روش ساخت (مهندس حمیدرضا خسروجردی)		
https://www.aparat.com/v/DcoFP	سپتاز، یک معضل محیط‌زیستی کشور، چالش‌ها، راه‌حل‌ها (دکتر ذبیح اله یوسفی)		
https://www.aparat.com/v/Fvb7q	قدرت تحول آفرین سنجش از دور و هوش مصنوعی (دکتر احد نظرپور)		
https://www.aparat.com/dashboard/vidostat/185Cp	مطالعه ترکیبات مختل‌کننده غدد درون‌ریز (EDCs) در رودخانه کارون و تصفیه‌خانه فاضلاب (دکتر علی اکبر بابائی)		

https://apararat.com/v/n5B73	بررسی انواع میکرو پلاستیک‌ها و استر فتالات‌ها در فاضلاب و نقش واحدهای تصفیه‌خانه فاضلاب در حذف آن‌ها (مطالعه موردی تصفیه‌خانه فاضلاب اهواز) (دکتر افشین تکدستان)
https://www.apararat.com/v/JL0OZ	معرفی نسل جدید مواد اولیه PE100-RD مناسب جهت لوله و اتصالات پلی‌اتیلنی مورد استفاده در سامانه‌های لوله‌گذاری انتقال آب با گندزاداهای پایه کلر (دکتر غلامرضا پیرچراغی، مهندس حمیدرضا شمسی و مهندس علیرضا صحاف امین)
https://www.apararat.com/v/XIujP	چرخه معیوب آب بدون درآمد و مکانیسم نشت آب شناخت و راهکار (مهندس محمدرضا عزیزی)
https://www.apararat.com/v/yas7w5j	مدل یادگیری ماشین ارتقا یافته توسط فیزیک مسئله برای مدل‌سازی شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب (دکتر علی حقیقی)
https://www.apararat.com/v/vrwl09a	ارتقای عملکرد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به کمک ابزار مدل‌سازی و استراتژی‌های کنترل هوشمند (مهندس علی خواجویان)
https://www.apararat.com/v/qxu7o4r	نحوه طراحی، نگهداری و تعمیرات و تعویض شیرآلات شبکه‌های توزیع آبرسانی شهری (مهندس روح الله توکلی)
https://www.apararat.com/v/rbq717e	چالش‌های مدل‌سازی شبکه توزیع آب در شرکت‌های آب و فاضلاب (مهندس محمدامین غیبی)
https://apararat.com/v/ckv6314	کاربرد مدل پویایی سیستم در مدیریت و برنامه‌ریزی آب شهری (مهندس صادق دانش پژوه)
https://www.apararat.com/v/iojt09e	نمک‌زدایی آب در ایران: وضعیت موجود، چالش‌ها و فرصت‌ها (دکتر مسعود طاهریون)
https://www.apararat.com/v/xp125f3	شبکه‌های توزیع آب هوشمند با رویکرد پیش‌بینی شبکه آب و مدل‌های داده‌مبنا (مهندس محمد رجیبی)
https://apararat.com/v/nqkqc80	تعیین محل نشت‌ها در شبکه‌های توزیع آب به روش شبیه‌سازی هیدرولیکی (دکتر رضا معاشری)
https://www.apararat.com/v/znmnpnv/	بررسی نوسانات جریان در شبکه‌های توزیع آب شهری با وجود مخازن ذخیره آب داخل ساختمان‌ها (دکتر رامتین مظاهری)
https://irwwa.ir	مسائل و چالش‌های کلیدی برای مدیریت شبکه‌های توزیع آب در شرایط عدم قطعیت (Prof. Maria Conceicao Cunha)
https://apararat.com/v/oor14x9	مدل‌های شکست برای سیستم‌های آب شهری: قابلیت انتقال و عدم قطعیت‌ها (Dr-Ing. Bahnam Askari Lasaki)
https://apararat.com/v/resx9a1	بازچرخش و استفاده مجدد از فاضلاب شهری و صنعتی در شهرک‌های صنعتی: رویکردها، چالش‌ها، مقررات بین‌المللی و ملی، درجه تصفیه با توجه به نوع مصارف صنعتی (پروفسور افشین تکدستان)
https://apararat.com/v/sdccc10w	بهینه‌سازی راهبردهای ZLD و MLD برای بازیابی نمک با صرفه اقتصادی از پساب‌های شور

	(Dr-Ing. Hobias Togen)		
https://apararat.com/v/xhd9r91	زیرساخت های آبی به عنوان یک سیستم تطبیقی پیچیده (Dr Manuel Herrera)		
https://www.apararat.com/v/6OhwE?playlist=31020035	سامانه های فاضلاب، اپیدمی ها و بیماری های نوظهور	نشست های تخصصی انجمن آب و فاضلاب ایران	۲
https://www.apararat.com/v/IXWfd?playlist=31174320	تاب آوری شبکه های آب و فاضلاب		
https://www.apararat.com/v/7JxVU?playlist=35531526	هوشمندسازی و نوآوری در سامانه های آب و فاضلاب		
https://www.apararat.com/v/lSgM7?playlist=31219788	بازنگری شاخص و استاندارد کیفیت منابع آب ایران		
https://www.apararat.com/v/tn4E9?playlist=32316111	چالش های تعیین الگوی مصرف آب		
https://www.apararat.com/v/DZzYX?playlist=879646	تاب آوری زیرساخت های آب و فاضلاب در شرایط بحران به ویژه سیلاب		
https://www.apararat.com/v/t1iaZ?playlist=33416246	استفاده از آب خاکستری در محیط های شهری		
https://www.apararat.com/v/o1geI?playlist=36877054	چالش ها، راهبردها و انتظارات از وزیر آتی نیرو در حوزه آب		
https://www.apararat.com/v/LxjEw?playlist=879646	نقش اقتصاد در مدیریت مصرف آب		
https://www.apararat.com/v/s3lwQ?playlist=879646	کاهش تلفات واقعی		
https://www.apararat.com/v/nBNj5?playlist=879646	تلفات ظاهری آب		
https://www.apararat.com/v/PO35T?playlist=879646	مدیریت مصرف آب		
https://www.apararat.com/v/xyr2O?playlist=879646	نمک زدایی آب های شور و بازیافت آب به عنوان منابع راهبردی در مقابله با تنش آبی کشور		
https://www.apararat.com/v/dVKvu?playlist=879646	مدیریت مصرف آب و سازگاری با کم آبی		
https://www.apararat.com/v/hEXdv?playlist=879646	مدیریت تعارضات آب و بازتعریف مسئله زاینده رود		
https://www.apararat.com/v/Ax3cG?playlist=879646	دستاوردها و چالش های استفاده از آب های نامتعارف		
h https://www.apararat.com/v/xyr2O	نمک زدایی آب های شور و بازیافت آب به عنوان منابع راهبردی در مقابله با تنش آبی کشور		
https://www.apararat.com/v/BFhCa	رویکردهای برنامه ایمنی آب		
https://www.apararat.com/v/LxjEw	نقش اقتصاد در مدیریت مصرف آب		
https://www.apararat.com/v/Lzf1g	چالش های انتقال آب دریا به فلات مرکزی		
https://www.apararat.com/v/B5Lle	تاب آوری سامانه های آب و فاضلاب، با نگاه به تجربه همدان و شهرکرد		
https://www.apararat.com/v/41JAS	چالش های استفاده دوباره از پساب های شهری در صنعت و فضای سبز		
https://apararat.com/v/jBUwJ	بررسی چالش ها و پیامدهای تغییر اقلیم و مداخلات انسانی بر کیفیت آب		
https://apararat.com/v/eotT5	مدیریت بهینه مصرف آب با رویکرد الزام صنایع به استفاده از پساب		
https://apararat.com/v/qOUfQ	راه کار و چالش های سرمایه گذاری در کاهش هدررفت آب در سامانه های آبرسانی		
https://apararat.com/v/ylr1g40	نشست تخصصی فرونشست زمین، چالش ها و راه کارها		
https://apararat.com/v/wjprm10	نشست تخصصی کاربرد هوش مصنوعی در صنعت آب و فاضلاب		
https://apararat.com/v/cawfc9	نشست تخصصی مدیریت لجن در تصفیه خانه های آب و فاضلاب		
https://www.apararat.com/v/hcuQk?playlist=5771644	مراسم افتتاحیه	اولین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران (۱۳۹۵)	۳
https://www.apararat.com/v/j2IAK?playlist=5771644	نشست تخصصی اول؛ سیاست های تأمین آب شرب در ایران		
https://www.apararat.com/v/LajYD?playlist=5771644	نشست تخصصی دوم؛ سیاست های صنعت جمع آوری فاضلاب و بازیافت پساب		
https://www.apararat.com/v/6LBfm?playlist=5771644	نشست تخصصی سوم؛ تأثیر مسائل اجتماعی، فرهنگی و مشارکت جامعه در مدیریت مصرف آب		
https://www.apararat.com/v/hr4Un?playlist=5771644	مراسم اختتامیه		

https://www.aparat.com/v/AmjKX	مراسم افتتاحیه	اولین همایش ملی مدیریت مصرف و هدررفت آب (۱۳۹۶)	۴
https://www.aparat.com/v/PO35T	نشست تخصصی اول؛ مدیریت مصرف آب		
https://www.aparat.com/v/nBNj5	نشست تخصصی دوم؛ تلفات ظاهری آب		
https://www.aparat.com/v/s31wQ	نشست تخصصی سوم؛ کاهش تلفات واقعی		
https://www.aparat.com/v/wmjDk	مراسم اختتامیه	دومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران و دومین همایش ملی عرضه و تقاضای آب شرب و بهداشتی (۱۳۹۷)	۵
https://www.aparat.com/v/SAOxw	مراسم افتتاحیه		
https://www.aparat.com/v/hEXdy	نشست تخصصی اول؛ مدیریت تعارضات آب و بازتعریف مسئله زاینده‌رود		
https://www.aparat.com/v/dVKvu	نشست تخصصی دوم؛ مدیریت مصرف آب و سازگاری با کم‌آبی		
https://www.aparat.com/v/Ax3cG	نشست تخصصی سوم؛ دستاوردها و چالش‌های استفاده از آب‌های نامتعارف		
https://www.aparat.com/v/pYO7g	مراسم اختتامیه	دومین همایش ملی مدیریت مصرف آب با رویکرد کاهش هدررفت و بازیافت (۱۳۹۸)	۶
https://www.aparat.com/v/SHiuG	مراسم افتتاحیه		
https://www.aparat.com/v/tn4E9	نشست تخصصی اول؛ چالش‌های تعیین الگوی مصرف آب		
https://www.aparat.com/v/DZzYX	نشست تخصصی دوم؛ تاب‌آوری زیرساخت‌های آب و فاضلاب در شرایط بحران به ویژه سیلاب		
https://www.aparat.com/v/t1iaZ	نشست تخصصی سوم؛ استفاده از آب خاکستری در محیط‌های شهری	سومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران (۱۳۹۹)	۷
https://www.aparat.com/v/nQ2Ez	مراسم اختتامیه		
https://www.aparat.com/v/V7BNT	مراسم افتتاحیه		
https://www.aparat.com/v/6OhwE	نشست تخصصی اول؛ سامانه‌های فاضلاب، اپیدمی‌ها و بیماری‌های نوظهور		
https://www.aparat.com/v/IXWfd	نشست تخصصی دوم؛ تاب‌آوری شبکه‌های آب و فاضلاب		
https://www.aparat.com/v/7JxVU	نشست تخصصی سوم؛ هوشمندسازی و نوآوری در سامانه‌های آب و فاضلاب		
https://www.aparat.com/v/ISgM7	نشست تخصصی چهارم؛ بازنگری شاخص و استاندارد کیفیت منابع آب ایران		
https://www.aparat.com/v/cGUUn1	کلینیک صنعت اول؛ شبکه‌های توزیع آب		
https://www.aparat.com/v/ntsvY	کلینیک صنعت دوم؛ کیفیت آب		
https://www.aparat.com/v/Fz5wu	کلینیک صنعت سوم؛ تصفیه فاضلاب و بازیافت آب		
https://www.aparat.com/v/IKLRc	کلینیک صنعت چهارم؛ شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب		
https://www.aparat.com/v/yLp7u	مراسم اختتامیه		
https://www.aparat.com/v/FWHLm	مراسم افتتاحیه		
https://www.aparat.com/v/xyr2O	نشست تخصصی اول؛ نمک‌زدایی آب‌های شور و بازیافت آب به‌عنوان منابع راهبردی در مقابله با تنش آبی کشور		
https://www.aparat.com/v/BFhCa	نشست تخصصی دوم؛ رویکردهای برنامه‌ایمینی آب		
https://www.aparat.com/v/LxjEw	نشست تخصصی سوم؛ نقش اقتصاد در مدیریت مصرف آب		
https://www.aparat.com/v/5c82a	کلینیک صنعت اول؛ محور شبکه‌های توزیع آب و کاهش هدررفت		

https://www.aparat.com/v/KnEdF	کلینیک صنعت دوم؛ محور بازیافت آب	همایش ملی مدیریت مصرف آب (۱۴۰۰)	۹
https://www.aparat.com/v/A5wkz	کلینیک صنعت سوم؛ محور کیفیت آب		
https://www.aparat.com/v/OgGXj	مراسم اختتامیه		
https://www.aparat.com/v/OB57I	مراسم افتتاحیه		
https://www.aparat.com/v/Lzf1g	نشست تخصصی چالش‌های انتقال آب دریا به فلات مرکزی		
https://www.aparat.com/v/B5Lle	نشست تخصصی تاب‌آوری سامانه‌های آب و فاضلاب، با نگاه به تجربه همدان و شهرکرد		
https://www.aparat.com/v/41JAS	نشست تخصصی چالش‌های استفاده دوباره از پساب‌های شهری در صنعت و فضای سبز		
https://www.aparat.com/v/16VTE	کلینیک صنعت اول؛ محور کیفیت آب		
https://www.aparat.com/v/PupUv	کلینیک صنعت دوم؛ محور شبکه‌های توزیع و هدررفت آب		
https://www.aparat.com/v/hr8Qs	کلینیک صنعت سوم؛ محور بازیافت آب و تصفیه فاضلاب		
https://www.aparat.com/v/nRdX3	مراسم اختتامیه	همایش ملی کیفیت آب و چهارمین همایش ملی مدیریت مصرف آب (۱۴۰۱)	
https://www.aparat.com/v/kiHYq	پیام آقای مهندس محمودیان		
https://www.aparat.com/v/Uaun9	کارگاه ایمنی آب	دومین همایش ملی کیفیت آب و چهارمین همایش ملی مدیریت مصرف آب (۱۴۰۲)	
https://www.aparat.com/dashboard/videstat/UwoCu	مراسم افتتاحیه		
https://www.aparat.com/dashboard/videstat/YHG3	سخنرانی جناب آقای دکتر مهدی قاسمیه		
https://www.aparat.com/dashboard/videstat/Q5jre	سخنرانی جناب آقای دکتر مسعود تابش		
https://www.aparat.com/dashboard/videstat/Ovg0e	سخنرانی جناب آقای دکتر مسعود تجربی		
https://www.aparat.com/v/Zz6aS	سخنرانی سرکار خانم دکتر سمیه رفیعی		
https://www.aparat.com/dashboard/videstat/Gs89r	مراسم تجلیل از پیشکسوتان برگزیده		
https://www.aparat.com/v/jBUwJ	نشست تخصصی اول؛ بررسی چالش‌ها و پیامدهای تغییر اقلیم و مداخلات انسانی بر کیفیت آب		
https://www.aparat.com/v/eotT5	نشست تخصصی دوم؛ مدیریت بهینه مصرف آب با رویکرد الزام صنایع به استفاده از پساب		
https://www.aparat.com/v/qOUfQ	نشست تخصصی سوم؛ راه‌کار و چالش‌های سرمایه‌گذاری در کاهش هدررفت آب در سامانه‌های آبرسانی		
https://www.aparat.com/v/GDMw7	کلینیک صنعت اول؛ طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع آب و مدیریت مصرف		پنجمین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران (۱۴۰۳)
https://www.aparat.com/v/HuZRi	کلینیک صنعت دوم؛ کیفیت آب و پساب		
https://www.aparat.com/v/nCJ0p	کلینیک صنعت سوم؛ تصفیه و بازچرخانی فاضلاب شهری و صنعتی		
https://www.aparat.com/v/j90wr	مراسم اختتامیه		
https://www.aparat.com/v/fhttc6r	مراسم افتتاحیه		
https://www.aparat.com/v/ylr1g40	نشست تخصصی فرونشست زمین، چالش‌ها و راه‌کارها		
https://www.aparat.com/v/wjprm10	نشست تخصصی کاربرد هوش مصنوعی در صنعت آب و فاضلاب		
https://www.aparat.com/v/cawfci9	نشست تخصصی مدیریت لجن در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب		
https://www.aparat.com/v/wyioho8	کلینیک صنعت-محور طراحی و بهره‌برداری از شبکه توزیع آب و مدیریت مصرف		
https://www.aparat.com/v/bxcbjtu	کلینیک صنعت - محور تصفیه و بازچرخانی فاضلاب شهری و صنعتی		
https://www.aparat.com/v/iyzomj1	مراسم اختتامیه		

کنفرانس‌های داخلی

عنوان کنفرانس	برگزارکنندگان	محل برگزاری	تاریخ برگزاری	سایت کنفرانس
چهاردهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران	دانشگاه صنعتی شریف	دانشگاه صنعتی شریف	۲۹ مهرماه تا ۱ آبان ماه ۱۴۰۴	https://14icce.sharif.edu/
بیست و چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران	انجمن هیدرولیک ایران - دانشگاه بیرجند	دانشگاه بیرجند	۷ و ۸ آبان ماه ۱۴۰۴	https://www.conf.iha.ir/
نهمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران	انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران دانشگاه آزاد اسلامی-واحد علوم و تحقیقات	دانشگاه آزاد اسلامی-واحد علوم و تحقیقات	۲۰ و ۲۱ آبان ماه ۱۴۰۴	https://watesconf.srb.iau.ir/
سومین همایش ملی مدیریت کیفیت آب و پنجمین همایش ملی مدیریت مصرف آب با رویکرد کاهش هدررفت و بازیافت	انجمن آب و فاضلاب ایران - دانشگاه شهید بهشتی	دانشگاه شهید بهشتی (پردیس شهید عباسپور)	۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴	https://iwwa-conf.ir/

کنفرانس‌های خارجی

عنوان کنفرانس	محل برگزاری	تاریخ برگزاری	سایت کنفرانس
7th Young Water Professional Mexico Regional Conference	Mexico	24 - 26 Sep 2025	https://7th-iwa-ywpmexico-2025.com/
10th IWA-ASPIRE Conference and Water New Zealand Conference & Exhibition	New Zealand	29 Sep – 3 Oct 2025	https://www.iwaaspire2025.org/
IWA XV Latin American Workshop and Symposium on Anaerobic Digestion: Contributing to the energy transition and decarbonization	Brazil	14 – 17 Oct 2025	https://daal.ufc.br/?lang=en
The 19th IWA Conference on Sludge Management -Toward material cycle and low carbon society	Kyoto/Japan	21 – 24 Oct 2025	https://iwa-19th-sludgemanagement.jp/
AWSISA Africa & Global South Water & Sanitation Dialogue	South Africa	09 - 12 Nov 2025	https://www.awsisa-watersandialogue.org/
IWA 22nd International Conference on Diffuse Pollution & Eutrophication	Chile Antofagasta	18 - 21 Nov 2025	https://iwadipcon2025.com
IWA Water and Development Congress & Exhibition 2025	Thailand	8 – 12 Dec 2025	https://waterdevelopmentcongress.org/
7th IWA Emerging Water Leaders Forum	Thailand	8 – 12 Dec 2025	https://waterdevelopmentcongress.org/
Water Energy Nexus – Supported	United Arab Emirates	17 Feb 2026	https://waterenergynexus.org/
6th IWA International Symposium on Water, Wastewater and Environment in Ancient Civilizations	Italy Naples	22 - 24 Feb 2026	https://iwa-wwtac-2026.sciencesconf.org/
14th IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse	Cape Town /South Africa	16 - 20 Mar 2026	https://iwareuse2025.com/
IWA Water Safety Conference & Exhibition 2026	Sri Lanka Ratmalana	23 - 25 Mar 2026	https://www.waterboard.lk/conference/iwa/
7th IWA Specialist Group Conference Advanced Oxidation Technologies for Water and Wastewater Treatment and Recycling	Frankfurt /Germany	8-10 Apr 2026	https://iwa-aop.org/
Congress Water Smart Economy & Society 2025 (WSES2025)- Supported	Rotterdam /Netherlands	25-28 May 2026	https://wses2025.dryfta.com/



**3rd National Conference on
Water Quality Management**
&
**5th National Conference on
Water Consumption Management
with Loss Reduction and Reuse Approach**

2-4 Dec. 2025
Abbaspou School of Engineering
Shahid Beheshti University, Tehran, Iran



**همایش ملی
مدیریت کیفیت آب**
&
**همایش ملی
مدیریت مصرف آب**
با رویکرد کاهش هدررفت و بازیافت

۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴
پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور
دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

محورهای همایش

- رویکردهای اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و حقوقی در مدیریت مصرف و استفاده از پساب
- تأثیر تغییر اقلیم بر تغییرات کمی و کیفی آب‌های سطحی و زیرزمینی
- ارزیابی و آسیب‌شناسی روش‌های جایگزین در مدیریت کیفیت آب
- کاهش مصرف و ارتقای بهره‌وری آب در بخش صنعت
- سیلاب‌های شهری و مدیریت رواناب‌های سطحی
- فناوری‌های ساده و ارزان قیمت بازیافت پساب
- مدیریت و راهبری تصفیه‌خانه‌های آب
- پیوند آب-انرژی در بازیافت پساب
- فناوری‌های نو در حوزه بازیافت
- مدیریت هوشمند کیفیت آب
- اقتصاد و کیفیت آب
- برنامه‌ایمنی آب
- هدررفت واقعی، ظاهری و مرفاد مجاز بدون درآمد در شبکه‌های توزیع آب
- تأثیرات محیط‌زیستی پساب دستگاه‌های آب شیرین‌کن بر کیفیت آب
- مدیریت فاضلاب و پسماند حاصل از فرایندهای بازیافت
- آلاینده‌های ویژه و نوظهور در آب آشامیدنی و پساب
- استانداردها و ضوابط کمی و کیفی آب و فاضلاب
- استفاده ایمن از پساب و کاهش ریسک آن
- مدیریت و بازیافت زهاب‌های کشاورزی
- مدیریت هوشمند شبکه‌های توزیع آب
- بایش کمی و کیفی پساب بازیافتی
- پایش کیفی اکوسیستم‌ها
- مدیریت مصرف آب

محور ویژه:

- عوامل و چالش‌های فائزازی در بخش آب و تأثیر آن بر تاب‌آوری شهری

مهلت ارسال مقالات کامل: ۵ مهرماه ۱۴۰۴



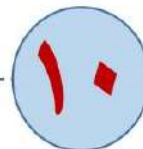
آدرس **دیرخانه:** تهران، حکیمیه، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور،
دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست
تلفن: ۰۲۱-۷۷۳۱۲۸۹۶ نامبر: ۰۲۱-۷۷۳۱۲۸۹۶
فکرام/ واتساب / ایسا: ۰۹۹۱۸۹۱۲۷۵

• iwwa-conf.ir
• irwwa.conf@gmail.com
• t.me/iwwa_conf
• Instagram.com/irwwa.ir





فراخوان دهمین دوره انتخاب پایان نامه برتر



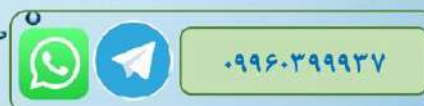
ویژه دانش آموختگان سال های ۱۴۰۱ به بعد



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

از علاقه مندان دعوت می شود تا برای شرکت در مسابقه، **حداکثر تا تاریخ ۲۰ مهرماه ۱۴۰۴** با مراجعه به سایت انجمن به نشانی **IRWWA.IR**، اقدام به دریافت فرم شرکت در مسابقه نموده و پس از تکمیل، فرم مربوطه را همراه با فایل پایان نامه و مقالات منتشر شده ISI و علمی-پژوهشی خود، به آدرس ایمیل مسابقات انجمن به نشانی **iwwa.competitions@gmail.com** ارسال نمایند.

جوایز نفرات اول تا سوم در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری، هم زمان با برگزاری "سومین همایش ملی مدیریت کیفیت آب و پنجمین همایش ملی مدیریت مصرف آب" که از ۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴ در پردیس شهید عباسپور دانشگاه شهید بهشتی برگزار می شود، اعطا می شود.





ششمین دوره المپیاد آب و فاضلاب

سال ۱۴۰۴



یادواره

مهندس سیدعلی محمودیان

آخرین مهلت ثبت نام: **۲۴ بهمن ماه ۱۴۰۴**

نحوه و زمان برگزاری:

مرحله اول: به صورت تستی

۳۰ بهمن ماه ۱۴۰۴

مرحله دوم: به صورت تشریحی

(متعاقباً اعلام می شود)

داوطلبان می توانند در **یک یا هر دو بخش** زیر، به انتخاب خود در المپیاد شرکت کنند:

- ❖ گزینه اول: طراحی و بهره برداری شبکه های آب، فاضلاب و آب سطحی
- ❖ گزینه دوم: فرآیندهای تصفیه، طراحی و بهره برداری تصفیه خانه های آب و فاضلاب

✚ به نفر اول هر گزینه جایزه نفیسی اهدا خواهد شد.

✚ برای اطلاع از آخرین تغییرات آیین نامه برگزاری المپیاد به سایت انجمن مراجعه فرمایید.

✚ شرکت در المپیاد، برای عموم دانشجویان در تمامی مقاطع و متخصصین صنعت آب و فاضلاب مجاز است.

هزینه ثبت نام

اعضای انجمن: ۱۵۰ هزار تومان

سایرین: ۲۰۰ هزار تومان



۰۲۱-۸۸۳۹۱۳۹۰

۰۹۹۶۰۳۹۹۹۳۷

علاقه مندان می توانند برای کسب اطلاعات بیشتر به وبسایت **انجمن آب و فاضلاب ایران** مراجعه کنند و با دفتر انجمن تماس حاصل فرمایند.



هفتمین دوره مسابقه ایده برتر در علوم و مهندسی آب و فاضلاب

در محورهای هدررفت آب، بازیافت آب، کیفیت آب و سایر موضوعات مرتبط

همراه با جوایز نقدی، لوح تقدیر و چاپ ایده در مجله علمی "علوم و مهندسی آب و فاضلاب" برای رتبه‌های برتر

لطفاً برای دریافت فایل فرمت و فرم اصالت ایده به سایت انجمن به نشانی irwwa.ir مراجعه کرده و پس از تکمیل، فایل‌ها را به ایمیل

irwwa.competitions@gmail.com

ارسال فرمایید.

برای کسب اطلاعات بیشتر می‌تواند به وبسایت انجمن آب و فاضلاب

ایران مراجعه کنید و یا با دفتر انجمن تماس حاصل فرمایید.



۰۲۱-۸۸۳۹۱۳۹۰



۰۹۹۶۰۳۹۹۹۳۷



تاریخ شفاهی صنعت آب و فاضلاب



برای اولین بار ثبت تاریخ
صنعت آب و فاضلاب از
دریچه دوربینی مالز زبان خبرگان
ایستاد صنعت

Oral History of
Water and waste water
Industry of IRAN
Iran water and waste water
association
<https://www.irwwa.ir>



[www.youtube.com
/@ohiwwa-l6d](https://www.youtube.com/@ohiwwa-l6d)



https://t.me/OH_iwwa



[https://www.aparat.com
/OH_iwwa](https://www.aparat.com/OH_iwwa)

لوگو	سطح عضویت	نام شرکت
<p>آبساران مهندسين مشاور</p> <p>Absaran Consulting Engineers</p> <p>www.absaran-co.ir</p> 	الماسی	مهندسين مشاور آبساران
<p>وزارت نیرو</p> <p>شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور</p> <p>(مادر تخصصی)</p>  <p>شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان</p>	الماسی	شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان
<p>وزارت نیرو</p> <p>شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور</p> <p>(مادر تخصصی)</p>  <p>شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجان غربی</p>	الماسی	شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجان غربی
 <p>مهندسین مشاور طرح تحقیقات آب و فاضلاب</p>	الماسی	مهندسين مشاور طرح و تحقیقات اصفهان
<p>وزارت نیرو</p> <p>شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور</p> <p>(مادر تخصصی)</p>  <p>شرکت آب و فاضلاب کاشان</p>	الماسی	شرکت آب و فاضلاب کاشان
 <p>شرکت فرآیند ارقام پرداز</p>	الماسی	فرآیند ارقام پرداز
<p>وزارت نیرو</p> <p>شرکت آب و فاضلاب مشهد</p> <p>(مادر تخصصی)</p> 	طلایی	شرکت آب و فاضلاب مشهد
 <p>شرکت فناور ایمن لوتوس</p>	طلایی	فناور ایمن لوتوس
 <p>TAVANA</p>	طلایی	شرکت مهندسی خطوط لوله توانا

 <p>UMMAB عمران میادین آب (سهامی خاص) عضو گروه هتکو</p>	<p>طلایی</p>	<p>شرکت عمران میادین آب</p>
	<p>طلایی</p>	<p>شرکت پارس رهاب شبکوه</p>
 <p>طوس آب شرکت مهندسی مشاور</p>	<p>نقره‌ای</p>	<p>مهندسی مشاور طوس آب</p>
 <p>مهندسی مشاور پارس آراین آب</p>	<p>نقره‌ای</p>	<p>مهندسی مشاور پارس آراین آب</p>
	<p>نقره‌ای</p>	<p>پویاک</p>
 <p>صنایع و کیوم پارس</p>	<p>نقره‌ای</p>	<p>صنایع و کیوم پارس</p>
 <p>مهندسی مشاور آبران</p>	<p>نقره‌ای</p>	<p>مهندسی مشاور آبران</p>
 <p>زعداب</p>	<p>نقره‌ای</p>	<p>خدمات مهندسی برق و الکترونیک رعدآب</p>
	<p>نقره‌ای</p>	<p>رشاب طرح</p>
 <p>POD Persia Optimized Designing شرکت بهینه طراحی پرشیا</p>	<p>نقره‌ای</p>	<p>بهینه طراحی پرشیا</p>
 <p>مهندسی مشاور زاینده آب سهامی خاص ZAYANDAR CONSULTING ENGINEERS CO.</p>	<p>نقره‌ای</p>	<p>زاینده آب</p>
	<p>برنزی</p>	<p>مهندسی مشاور یکم</p>
 <p>ABRAM ETTESAL</p>	<p>برنزی</p>	<p>آبان بسپار پارسیان</p>

 <p>فراگیر انرژی و پالایش مادیار Madyar Global Energy And Water Treatment Co</p>	برنزی	فراگیر انرژی و پالایش مادیار
 <p>هپیکو Hapico</p>	برنزی	خط لوله هامون (هپیکو)
 <p>Sanjesh Afzar Asia Co. Ltd.</p>	برنزی	سنجش افزار آسیا
<p>وزارت نیرو شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور</p>  <p>شرکت آب و فاضلاب استان فارس</p>	برنزی	آب و فاضلاب فارس
 <p>شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجان شرقی</p>	برنزی	شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجان شرقی
<p>مهندسين مشاور آينده ميترا</p> 	برنزی	مهندسين مشاور آينده ميترا
 <p>گوه مينا شرکت مهندسی و ساخت بویلر و تجهیزات مینا</p>	برنزی	شرکت مهندسی و ساخت بویلر و تجهیزات مینا
 <p>آب سوز شرکت مهندسين مشاور آب سو</p>	برنزی	شرکت مهندسين مشاور آب سو
 <p>FANAVARAN KHERAD RAD Industrial company شرکت مهندسی فن آوران خرد راد</p>	برنزی	شرکت مهندسی فن آوران خرد راد
 <p>فرآیند زیست تپت: ۸۴۲ ۶۶</p>	برنزی	شرکت فرآیند زیست
	برنزی	شرکت دربارود جنوب

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

مبلغ (ریال)	نوع
۲۰۰۰۰۰۰۰	۱ صفحه در یک شماره
۴۰۰۰۰۰۰۰	۲ صفحه در یک شماره
۹۰۰۰۰۰۰۰	۱ صفحه در چهار شماره پیایی*
۱۲۰۰۰۰۰۰۰	۲ صفحه در چهار شماره پیایی*

* شامل یک‌سال عضویت حقوقی انجمن

حق عضویت اعضای حقیقی

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

شماره حساب: ۱۳۵۷۲۰۶۲۳

شماره شب: IR930180000000000135720623

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

الماسی (سالانه ۲۵) (میلیون تومان)	طلایی (سالانه ۲۰) (میلیون تومان)	نقره‌ای (سالانه ۱۵) (میلیون تومان)	برنزی (سالانه ۱۰) (میلیون تومان)	سطح عضویت (مبلغ پرداختی)
سالانه ۱۵ میلیون تومان	سالانه ۱۲ میلیون تومان	سالانه ۸ میلیون تومان	سالانه ۵ میلیون تومان	دریافت اعتبار یک‌ساله (نحوه استفاده از اعتبار دریافتی، در ذیل جدول شرح داده شده است)
*	*	*	*	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 مترای 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 حروف چینی: نرم‌افزار Microsoft Word 2013 یا بالاتر

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

❖ نام نویسنده(گان):

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

❖ نام مؤسسه:

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

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

توجه به نکات زیر در ارسال مقاله ضروری است:

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

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

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

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

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

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

❖ دستورالعمل نگارش و تنظیم مقالات:

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

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

❖ انواع مقالات:

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

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

❖ چکیده فارسی:

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

❖ چکیده انگلیسی: باید دقیقاً معادل چکیده فارسی باشد.

❖ واژه‌های کلیدی فارسی و انگلیسی:

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

❖ متن مقاله:

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

متن مقاله شامل بخش‌های چکیده، مقدمه، مواد و روش‌ها (روش تحقیق)، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری و مراجع و هم‌چنین شکل‌ها و جدول‌ها است. در صورت لزوم، بخش‌های 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 تصفیه‌خانه بابا شیخ علی شهر اصفهان در سال ۱۳۹۵. در ضمن اگر شکل یا جدولی از مرجع دیگری اخذ شده است، به

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

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

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

❖ معادلات:

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

❖ مراجع:

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

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

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

در نگارش انواع مراجع از فرمت زیر استفاده شود:

• مقاله فارسی:

تابش، م.، بهبودیان، ص.، و بیگی، س.، (۱۳۹۳)، "پیش‌بینی بلندمدت تقاضای آب شرب (مطالعه موردی: شهر نیشابور)"،

تحقیقات منابع آب/ایران، ۱۰(۳): ۱۴-۲۵.

غبری، 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.
- به کارگیری 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- شفاف‌سازی در مورد استفاده از هوش مصنوعی

- در صورتی که از هوش مصنوعی در تهیه مقاله استفاده شده باشد، توصیه می‌شود نویسندگان در بخش «تقدیر و تشکر» یا در بخشی جداگانه مانند «استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی» به این موضوع اشاره کنند. این شفاف‌سازی به خوانندگان کمک می‌کند تا از جنبه‌هایی که هوش مصنوعی در تهیه مقاله کمک کرده است آگاه باشند و هم‌زمان اصول شفافیت علمی حفظ شود. به‌عنوان مثال، نویسندگان می‌توانند توضیح دهند که از هوش مصنوعی برای ویرایش زبانی، اصلاح نگارشی، یا ساختار بندی مقاله استفاده کرده‌اند و بخش‌هایی از مقاله که به‌واسطه ابزارهای هوش مصنوعی بهبود یافته است را به‌صورت مختصر معرفی کنند. این اقدام هم به پژوهشگران و هم به داوران اطمینان می‌دهد که تمامی داده‌ها و تحلیل‌های علمی به‌طور 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 مدل‌های هوش مصنوعی می‌توان به‌عنوان یک ابزار کمک‌رسان 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 آن‌که اصالت و اعتبار منابع انتخاب‌شده را به‌صورت دقیق بررسی نمایند.
- نویسندگان باید توجه داشته باشند که تنها از منابع معتبر علمی و پایگاه‌های داده‌ای قابل‌اعتماد استفاده کنند و از استناد به منابعی که ممکن است اعتبار علمی کافی نداشته باشند و یا به‌صورت مصنوعی توسط مدل‌های زبانی تولید شده باشند، بپرهیزند. بدین ترتیب، هوش مصنوعی تنها به‌عنوان ابزاری برای تسهیل جستجو و گردآوری منابع معتبر عمل می‌کند و اصالت منابع به دقت بررسی می‌شود.

۵- حفظ استقلال علمی پژوهشگران و اصالت تحقیقات

- پژوهشگران باید تمامی مراحل اصلی تحقیق، از جمله طراحی آزمایش، جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل یافته‌ها و نتیجه‌گیری نهایی را به‌صورت مستقل و با دانش تخصصی خود انجام دهند. استفاده از هوش مصنوعی نباید به‌گونه‌ای باشد که نقش اصلی پژوهشگر در تولید علم و تحلیل علمی تحت تأثیر قرار گیرد.

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

۶- مسئولیت‌پذیری نویسندگان در برابر محتوا

- نویسندگان به‌عنوان مسئول اصلی محتوای علمی مقاله، وظیفه دارند که اطمینان حاصل کنند تمامی داده‌ها و تحلیل‌های ارائه‌شده اصیل و مستقل هستند. هوش مصنوعی نباید در تولید داده‌های علمی یا نتیجه‌گیری‌های پژوهشی جایگزین کار اصلی پژوهشگر شود و در صورت استفاده از هوش مصنوعی برای جنبه‌های پشتیبانی، لازم است شفافیت در این خصوص حفظ شود. نویسندگان مسئول محتوای دست‌نوشته خود هستند، حتی آن قسمت‌هایی که توسط یک ابزار هوش مصنوعی تولید شده است. در نتیجه باید در قبال هرگونه نقض اصول اخلاقی در انتشار آن پاسخگو باشند.

نتیجه‌گیری

این دستورالعمل با هدف حمایت از اصول علمی و حفظ اصالت پژوهش‌ها در نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب تنظیم شده است. ما به‌عنوان یک نشریه علمی، به کاربردهای مثبت و مسئولانه هوش مصنوعی به‌عنوان دستیار پژوهشی احترام می‌گذاریم و استفاده از این ابزارها را به‌شرط رعایت دقیق اصول علمی و تحقیقاتی توصیه می‌کنیم. از نویسندگان دعوت می‌شود که با رعایت این توصیه‌ها، ضمن بهره‌گیری از فناوری‌های جدید، بر اصالت و کیفیت پژوهش‌های خود تمرکز کنند تا مقالاتی با ارزش علمی بالا و دارای صحت و اعتبار منتشر شود.

❖ تذکر مهم:

براساس مصوبه هیئت تحریریه و تایید هیئت مدیره انجمن آب و فاضلاب ایران، کلیه مقالاتی که از ابتدای سال ۱۴۰۴ به مجله ارسال می‌شود 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 به‌نام انجمن آب و فاضلاب ایران در بانک تجارت شعبه دانشگاه (کد ۱۸۶) واریز و فیش آن را به‌همراه فایل‌های مقاله در سایت نشریه بارگزاری کنند.

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering

Vol. 10, No. 2, Summer 2025

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

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

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

Editorial Board:

Farmani, R. (Ph.D.): Associate Professor, University of Exeter (UK)
Giustolisi, O. (Ph.D.): Professor, University of Bari (Italy)
Jalili Ghazizadeh, M.R. (Ph.D.): Associate Professor, University of Shahid Beheshti
Nazif, S. (Ph.D.): Associate Professor, University of Tehran
Rashidi Mehrabadi, A. (Ph.D.): Associate Professor, University of Shahid Beheshti
Safavi, H.R. (Ph.D.): Professor, Isfahan University of Technology
Sajadifar, S.H. (Ph.D.): Tehran Water and Wastewater Engineering Company and Assistant
Professor, Islamic Azad University
Sarrafzadeh, M.H. (Ph.D.): Professor, University of Tehran and Chairholder of UNESCO Chair
on Water Reuse
Savic, D. (Ph.D.): Professor, University of Exeter (UK)
Tabesh, M. (Ph.D.): Professor, University of Tehran
Takdastan, A. (Ph.D.): Professor, Ahwaz Jundishapur University of Medical Science
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

Editorial Staff:
Graphic Designer:
Page Setting:
Publisher:
Address:
Tel:
Fax:
Print ISSN:
Online ISSM:
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



ISSN 2588-3941

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering

Volume 10, No. 2, Summer 2025

Preface (From data to decision: The future of water and wastewater management with artificial intelligence) 2

Dr. Mohammad Javad Abdi and Dr. Seyed Hossein Sajjadifar

Papers

Technical-Economic Study of Urban Drinking Water Distribution Methods 4

Farzaneh Fotuhi Firuzabad, Mohammadreza Ekhtesasi and Abdorasoul Negaresh

Determining the Instantaneous Peak Factor in Water Distribution Networks 19

Ramtin Mazaheri, Mohammadreza Jalili Ghazizadeh and Homayoun Motiee

Numerical Study of the Flow Skew Angle Impact on the Flow Pattern of Complex Bridge Piers 29

Masoume Rostamabadi, Hamidreza Sama and Seyed Hossein Mohajeri

Mathematical Analysis of Sub-Atmospheric Vapor Pipeline (SAVP) 43

Transmission for Seawater Desalination

Mona Shojaei and Mohsen Nosrati

Examining the Contribution of Wastewater Treatment Plant Features on the Results of 55

Artificial Intelligence-Based Models Using SHAP

Vahid Nourani, Mahsa Dehghan and Aida Hosseini Baghanam

Modeling and Forecasting the Average Water Consumption of Each Urban Household Unit 71

Affected by the COVID-19 Pandemic: A Case Study of Mazandaran Province

Masoumeh Shirozhan, Robabeh Kazemi and Mohammad Ali Ramezani

General Section

Round-Table (Specialized meeting on sludge management in water and wastewater treatment plants) 80

Best Idea 90

Book Presentation 96

IWWA News 98