ISSN 2588-3941

نشریه علمی

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

سال دهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴

پیشگفتار (مدیریت هوشمند خشکسالی و کم‌آبی در ایران: از تجارب منطقه‌ای تا انقلاب هوش مصنوعی) ۲
پژمان طاهری

مقالات علمی

مدل‌سازی ارزیابی عملکرد مالی صنعت آب و فاضلاب با رویکرد تحلیل عاملی تأییدی ۳
امیر نوروزی سارنگ، علی‌رضا مهرآذین و ابوالقاسم مسیح‌آبادی

مکان‌یابی نقطه میانگین ناحیه فشاری در شبکه‌های توزیع آب بر اساس تحلیل هیدرولیکی ۱۹
رضا معاشری و محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده

ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌های فاضلاب شهری در برابر تخلیه‌های صنعتی با استفاده از روش RAMCAP مطالعه موردی: شهر تهران ۳۰
عقیل قربانی شاه‌نجفی، سیدحسین هاشمی و سیدناصر باشی ازغدی

ارزیابی عملکرد یک پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد زیستی برای نمک‌زدایی از آب شور ۴۱
رئوف ربیعه و سیدمرتضی ضمیر

حذف کروم از محلول‌های آبی در راکتور پیوسته بستر ثابت با گرانول‌های کروی نانوزئولیت اصلاح شده با لیگاند آمونیوم بروماید ۴۹
اعظم ده‌نبی و نیما ذوالفقاری

ارائه مدل مالی تطبیق‌پذیر ایجاد انرژی پایدار با استفاده از روش برق‌آبی در شرکت آب و فاضلاب مشهد ۶۱
جواد براتی، مریم رسول‌زاده، مهشید سامی، علیرضا صدقیان و ناهید رجب‌زاده

مطالب عمومی

مصاحبه (مهندس یاسر اسماعیلی) ۷۰
میزگرد (نشست تخصصی کاربرد هوش مصنوعی در صنعت آب و فاضلاب) ۷۲
پایان‌نامه برتر ۸۵
معرفی کتاب ۸۸
اخبار انجمن ۸۹

www.jwwse.ir

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال دهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۳
انجمن آب و فاضلاب ایران

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

سال ۱۰، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴

این نشریه دارای مجوز کمیسون 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.

صاحب امتیاز انجمن آب و فاضلاب ایران

مدیر مسئول دکتر مسعود تابش

سردبیر دکتر علی حقیقی

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 محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی
دکتر عبدالله رشیدی مهرآبادی: دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی
دکتر دراگان ساویچ: استاد، دانشگاه اگزتر، لندن
دکتر سید حسین سجادی فر: شرکت آب و فاضلاب تهران و استادیار دانشگاه آزاد اسلامی
دکتر محمد حسین صراف زاده: استاد دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران و رئیس کرسی یونسکو در بازیافت آب
دکتر حمیدرضا صفوی: استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
دکتر ناصر طالب بیدختی: استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شیراز
دکتر راضیه فرمانی: دانشیار، دانشگاه اگزتر، انگستان
دکتر اورازیو گیوستولیسی: استاد، دانشگاه پلی تکنیک باری، ایتالیا
دکتر سارا نظیف: دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران
دکتر منوچهر وثوقی: استاد دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف
دکتر جعفر یزدی: دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی

شورای سیاستگذاری صنعت آب و فاضلاب

دکتر هاشم امینی: مدیر عامل شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور
دکتر احمد سلامت: مشاور مدیرعامل و مدیرکل دفتر انرژی و سامانه‌های کنترل، 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 اب و فاضلاب کشور
مهندس حمیدرضا هنری: عضو هیئت علمی بازنشسته دانشگاه علوم پزشکی تهران

کارشناس اجرایی: ناهید اختری
طراح و صفحه آرا: ناهید اختری، دکتر سید احمدرضا شاهنگیان
ناشر: انجمن آب و فاضلاب ایران
آدرس: تهران، خیابان طالقانی، بین وصال و قدس، پلاک ۴۲۹، طبقه ۴، واحد ۷
تلفن: ۰۲۱-۸۸۹۵۶۰۹۷
نمابر: ۰۲۱-۸۸۳۹۱۳۹۰
شاپا چاپی: 2588-3941
شاپا الکترونیکی: 2588-396X
ایمیل: info@jwwse.ir

فهرست مطالب

پیشگفتار (مدیریت هوشمند خشکسالی و کم‌آبی در ایران: از تجارب منطقه‌ای تا انقلاب هوش مصنوعی) **۲**
پژمان طاهری

مقالات علمی

مدل‌سازی ارزیابی عملکرد مالی صنعت آب و فاضلاب با رویکرد تحلیل عاملی تأییدی **۳**
امیر نوروزی سارنگ، علی‌رضا مهرآذین و ابوالقاسم مسیح آبادی

مکان‌یابی نقطه میانگین ناحیه فشاری در شبکه‌های توزیع آب بر اساس تحلیل هیدرولیکی **۱۹**
رضا معاشری و محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده

ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌های فاضلاب شهری در برابر تخلیه‌های صنعتی **۳۰**
با استفاده از روش RAMCAP مطالعه موردی: شهر تهران
عقیل قربانی شاه‌نجفی، سیدحسین هاشمی و سیدناصر باشی ازغدی

ارزیابی عملکرد یک پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد زیستی برای نمک‌زدایی از آب شور **۴۱**
رئوف ربیعه و سیدمرتضی ضمیر

حذف کروم از محلول‌های آبی در راکتور پیوسته بستر ثابت **۴۹**
با گرانول‌های کروی نانوزئولیت اصلاح شده با لیگاند آمونیوم بروماید
اعظم ده‌نبی و نیما ذوالفقاری

ارائه مدل مالی تطبیق‌پذیر ایجاد انرژی پایدار با استفاده از روش برق‌آبی در شرکت آب و فاضلاب مشهد **۶۱**
جواد براتی، مریم رسول‌زاده، مهشید سامی، علیرضا صدقیان و ناهید رجب‌زاده

مطالب عمومی

مصاحبه (مهندس یاسر اسماعیلی) **۷۰**
میزگرد (نشست تخصصی کاربرد هوش مصنوعی در صنعت آب و فاضلاب) **۷۲**
پایان‌نامه برتر **۸۵**
معرفی کتاب **۸۸**
اخبار انجمن **۸۹**

مدیریت هوشمند خشکسالی و کم‌آبی در ایران: از تجارب منطقه‌ای تا انقلاب هوش مصنوعی

دکتر پژمان طاهری
شرکت مهندسی آب و فاضلاب استان تهران و
عضو هیئت مدیره انجمن آب و فاضلاب ایران

ایران طی سه دهه گذشته با خشکسالی‌های مستمر و تشدید تنش آبی مواجه بوده، وضعیتی که امنیت آبی کشور را به چالشی اساسی بدل ساخته است. اثرات ترکیبی تغییر اقلیم، رشد جمعیت و الگوهای مصرف ناپایدار، بسیاری از مناطق کشور را به شرایط کم‌آبی مزمن سوق داده است. برخلاف دهه‌های گذشته که دوره‌های خشکسالی با فواصل ترمیم همراه بود، امروز شاهد ناترازی دائمی میان عرضه و تقاضای آب هستیم. این واقعیت، ضرورت تغییر رویکرد و گذار از مدیریت مبتنی بر تأمین به مدیریت تطبیقی و تقاضامحور را اجتناب‌ناپذیر ساخته و تاب‌آوری ملی آب را به یک الزام بدل کرده است.

تجارب منطقه‌ای کشورهای خشک و نیمه‌خشک، در خاورمیانه و شمال آفریقا، به‌ویژه عراق، ترکیه و اردن، نکات مهمی برای ایران به همراه دارد. عراق با کاهش جریان رودخانه‌ها به‌دلیل ساخت سد در بالادست و خشکسالی‌های طولانی، ناچار به اتکا بیشتر به منابع آب زیرزمینی و بازسازی سیستم‌های آبیاری شده است. ترکیه با ساخت سدهای بزرگ، مدیریت یکپارچه حوضه‌های آبریز و توسعه آبیاری نوین، بهره‌وری منابع آبی خود را افزایش داده است. اردن نیز در شرایط خشکسالی و بحران، به ترویج فناوری‌های صرفه‌جویی آب و اجرای پروژه‌های بازچرخانی روی آورده است. در کنار این کشورها، نمونه‌هایی موفق مانند فلسطین اشغالی، تونس و مراکش در مناطقی با اقلیم مشابه و استرالیا در آن سوی دنیا با راه‌کارهایی هم‌چون بازچرخانی آب، بازیابی منابع، آبیاری سازگار با اقلیم، مدیریت یکپارچه منابع، مشارکت نهادهای مردمی و ارتقای آگاهی عمومی، توانسته‌اند تاب‌آوری خود را افزایش دهند. درحالی‌که معیار ایده‌آل‌ترین تاب‌آوری ۱/۰۰ (۱۰۰٪) است و برای بسیار از جوامعی که نام برده‌شد این معیار استخراج‌شده و برنامه‌های مدیریت منابع آب در جهت ارتقای آن به‌صورت کمی در حال اجرا است، هنوز حدود معیار تاب آوری آبی برای ما ناشناخته مانده است. نگاهی به تجارب بیان شده نشان می‌دهد که نوآوری فناورانه، اصلاح سیاست‌ها، ارتقای مدیریت ها و مشارکت جامعه، ارکان اصلی افزایش تاب‌آوری در برابر خشکسالی و کم‌آبی در اقلیم‌های خشک و نیمه خشک هستند.

در شرایط تداوم کم‌آبی، تخصیص هوشمند منابع موجود به محور اصلی مدیریت پایدار تبدیل می‌شود. در همین راستا، پیشرفت‌های هوش مصنوعی و کارآیی آن تحلیل داده‌ها، امکان پایش لحظه‌ای مصرف، بارش، کیفیت آب و وضعیت زیرساخت‌ها را فراهم آورده است. با اتکاء به این فناوری، سازمان‌های مسئول تأمین و توزیع آب می‌توانند توزیع را بهینه، تلفات را کاهش و در شرایط بحران، مصارف حیاتی را در اولویت قرار دهند. ادغام پایش‌های هوشمند و تحلیل‌های پیش‌بینی‌گر و مدیریت برمبنای گزینه های تصمیم یار، دیگر یک آرمان آینده‌نگرانه نیست، بلکه ضرورتی عملی برای تخصیص، تأمین و توزیع کارآمد منابع آب است.

از دیگر سو هزینه‌های بالا و پیچیدگی‌های انتقال آب از منابع دریایی دوردست و نگرانی از اثرات نامطلوب ناشی از انتقال آب بین حوزه‌ای، لزوم تمرکز بر بهره‌برداری بهینه از منابع موجود را دوچندان کرده است. آب‌های زیرزمینی که زمانی به‌عنوان ذخیره پنهان تلقی می‌شدند، اکنون تحت‌فشار بی‌سابقه قرارگرفته‌اند. در این شرایط، رویکرد احیای هوشمند و مدیریت‌شده سفره‌های زیرزمینی، بازیابی ذخایر زیرزمینی با پساب کلان شهرها و بازچرخانی آب، راه‌کاری عملی، زودبازده و مقرون به‌صرفه در مقایسه با طرح های بزرگ انتقال و هزینه‌های تصاعدی مدیریت آب بدون درآمد (برای بخش‌های هدررفت واقعی و هدر رفت ظاهری به‌جز مؤلفه مصارف غیرمجاز) هستند. این رویکرد نه تنها تاب‌آوری سامانه‌های آبی محلی را افزایش می‌دهد، بلکه با روندهای جهانی مدیریت چرخشی آب، جایی که هر قطره آب ارزشمند تلقی می‌شود و دوباره به چرخه بازمی‌گردد نیز، هم‌سو است. عامل کلیدی تحقق این اقدامات، گذار به حکمرانی مشارکتی و تطبیقی آب است. وضعیت موجود حاصل از ساختارهای حاضر مدیریت آب هستند که تاکنون آزموده شده‌اند و این‌چنین نمایانده‌اند که در مواجهه با چالش‌های پیچیده و پویا، کارآمدی پایینی داشته‌اند. توانمندسازی ذی‌نفعان محلی، تقویت همکاری‌های بین‌بخشی، ادغام دانش علمی در فرآیند تصمیم‌گیری و نوسازی مدیریت با تزریق تدریجی متخصصین جوان، گام‌های اساسی برای ساخت آینده‌ای تاب‌آور در حوزه آب کشور است. تجربه کشورهایی که موفق به عبور از بحران‌های آبی شده‌اند، نشان می‌دهد که حکمرانی فراگیر و نوآوری فناورانه، حتی در شرایط دشوار نیز می‌تواند به نتایج پایدار منجر شود

در پایان، خاطر نشان می شود که همگرایی تجارب منطقه‌ای، پیشرفت‌های فناورانه و حکمرانی مشارکتی، فرصت کم‌نظیری برای بازتعریف رویکرد ایران در مواجهه با خشکسالی و کم‌آبی فراهم می‌آورد. پذیرش مدیریت هوشمند، بهره‌گیری از تجارب منطقه‌ای و استفاده از ظرفیت علمی و اجرایی متخصصین داخلی، بین‌المللی و جوانان، می‌تواند بخش آب کشور را به الگویی از تاب‌آوری و نوآوری بدل سازد، چرا که ظرفیتی که در کشور وجود دارد می تواند همه این عوامل را بخوبی جذب نماید. در خاتمه این فرصت را مغتنم شمرده و با توجه به پتانسیل‌های اجرایی، ظرفیت های مهندسی و علمی آب و فاضلاب، دسترسی به متخصصین و نیز امکان فراهم آمده برای استفاده از تجارب بین‌المللی، برگزاری یک رویداد مستقل با محوریت عنوان این پیشگفتار را به مراجع آب و فاضلاب کشور پیشنهاد می‌نمایم.

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال دهم، شماره ۱، صفحات ۳-۱۸، بهار ۱۴۰۴

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 10, No. 1, PP. 3-18, Spring 2025
DOI: 10.22112/jwwse.2024.425035.1384

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی ارزیابی عملکرد مالی صنعت آب و فاضلاب با رویکرد تحلیل عاملی تأییدی

امیر نوروزی سارنگ[۱]، علی‌رضا مهرآذین[۲*] و ابوالقاسم مسیح‌آبادی[۲]

۱- دانشجوی دکتری، گروه حسابداری، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران.

۲- استادیار گروه حسابداری، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران.

*نویسنده مسئول، ایمیل: a.r.mehrazeen@iau-neyshabur.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۶

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴

© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

ارزیابی عملکرد مالی یکی از مهم‌ترین حوزه‌های عملکردی است زیرا اطلاعات مالی زیربنای بسیاری از تصمیم‌گیری‌ها قرار می‌گیرد. برای ارزیابی عملکرد مالی نیاز به داشتن شاخص‌هایی مبتنی بر اطلاعات مربوط و قابل اتکا است که سازمان‌ها از این شاخص‌های متنوع دربستر تکنیک‌های کمی برای ارزیابی عملکرد استفاده می‌کنند. اگرچه این نوع ارزیابی‌ها، اطلاعات مفیدی را فراهم می‌آورد، اما به‌دلیل لحاظ کردن کلیه شاخص‌ها، بدون توجه به درجه اهمیت آن‌ها، تصویر جامعی از عملکرد کل شرکت حاصل نشده و منتج به نتایج جزیره‌ای می‌شود. لذا انتخاب و شناسایی شاخص‌های گزیده با استفاده از مدل‌های علمی، اثر زیادی بر نتایج ارزیابی عملکرد خواهد داشت. در این پژوهش، ابتدا مدل اولیهی ارزیابی عملکرد صنعت آب و فاضلاب پیشنهاد و با شیوه مدل‌سازی معادلات ساختاری مدل نهایی میدانی، در راستای برنامه‌ریزی و کنترل مدیریت ارائه شده است. این پژوهش حاضر، براساس داده‌های سال‌های ۱۳۷۷-۱۳۹۷ با رویکرد پنل دیتا (۷۰۰ نمونه، شامل ۳۵ شرکت و ۲۰ سال فعالیت) انجام شد. پس از انجام آزمون‌های مقدماتی ضرایب همبستگی (مدل اولیه) و بارهای عاملی متغیرهای پنهان مستقل (مدل ثانویه) با تحلیل عاملی تأییدی شناسایی شد. نتایج گواه آن است که بین متغیرها، ضریب همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد و بیش‌ترین بار عاملی به شاخص‌های فعالیت (۰/۸۸۹) و کم‌ترین به شاخص‌های نقدینگی (۰/۱۱۵) با سطح اطمینان معنی‌داری ۹۵ درصد اختصاص دارد. مدل ثانویه (ساختاری) پیشنهادی با آزمون‌های متعدد نیکویی برازش، تأیید نشد و با انجام اصلاحاتی بین متغیرهای قابل‌مشاهده، مدل میدانی نهایی صنعت ارائه شد. در پایان، نتایج ضرایب رگرسیونی مدل تحلیل عاملی و شیوه‌ی موجود (وزن دهی توسط اعضای هیئت مدیره) با آزمون فرض و ضریب همبستگی مقایسه شد (ضریب ۱۹/۹ درصد در سطح اطمینان ۹۹ درصد) که نشان از ارتباط بسیار ضعیف دو مدل ارزیابی دارد.

کلمات کلیدی: ارزیابی عملکرد مالی، مدل‌سازی معادلات ساختاری، برنامه‌ریزی و کنترل، صنعت آب و فاضلاب.

Research Paper

Modeling the Evaluation of the Financial Performance of the Water and Wastewater Industry with a Confirmatory Factor Analysis Approach

Amir Norouzi Sarang[1], Alireza Mehrazeen[2*] and Abolghasem Masih Abadi[2]

1- Ph.D. Student in Accounting, Department of Accounting, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Accounting, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran.

*Corresponding Author, Email: a.r.mehrazeen@iau-neyshabur.ac.ir

Received: 06/01/2024
Revised: 26/06/2024
Accepted: 14/07/2024

© IWWA

Abstract

Financial performance evaluation is a crucial functional area, as financial information forms the foundation for many decision-making processes. While such evaluations provide valuable insights, considering all indicators without weighing their importance results in a fragmented view of the overall company performance. Therefore, the selection and identification of key indicators using scientific models significantly impact the evaluation results. In this study, an initial performance evaluation model for water and wastewater industry was proposed, and the final field model was presented through structural equation modeling in line with management planning. This research, based on data from 2018-1998 using a panel data approach, identified a positive and significant correlation among variables. The proposed secondary (structural) model did not confirm through multiple fit tests and required adjustments, resulting in the final field model for the industry. Finally, the results of regression coefficients of the factor analysis model were compared with the existing method, indicating a very weak relationship between the two evaluation models.

Keywords: Financial performance evaluation, Structural equation modeling, Planning and control, Water and wastewater industry.

۱- مقدمه

مدیریت، تغییر شرایط موجود "بودن" به شرایط مطلوب "شدن" است و شامل طیف گسترده‌ای از فعالیت‌ها است که تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی نظر به شرایط متنوع محیط سازمانی (اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، فرهنگی) اهمیت ویژه‌ای دارد، به‌گونه‌ای که امروزه صاحب‌نظران دانش مدیریت، مدیریت را معادل تصمیم‌گیری می‌دانند. در راستای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی راهبردی، سازمان‌ها از ابزارهای متنوعی استفاده می‌کنند و سامانه‌های ارزیابی عملکرد و بازخورد آن‌ها، قادر به تغذیه اطلاعات مدیریت هستند. واحدهای نهادی از شیوهای متنوعی در ارزیابی عملکرد بهره می‌برند که بیش‌تر بر پایه تحلیل تعدادی شاخص و ارتباط بین آن‌ها است. هرچند، این سامانه‌ها قادر به ارزیابی عملکردند، اما به‌دلیل عدم شناسایی وزن و درجه اهمیت نسبی شاخص‌ها، تک‌بعدی بودن، فقدان بنیان علمی (نظیر خودهمبستگی، جمله اخلال، نرمالیتی و مانایی)، عدم شناسایی بارهای عاملی (ضرایب رگرسیونی) اعتبار علمی لازم را ندارند. لذا در این پژوهش، در راستای رفع نواقص فوق و ارتقای سطح کیفی و علمی نتایج، ارزیابی عملکرد مالی در صنعت آب و فاضلاب با شیوه‌هایی کمی انجام‌شده است. ارزیابی عملکرد در صنعت آب و فاضلاب موجب عمق بخشیدن دیدگاه استفاده‌کنندگان و ذی‌نفعان از اطلاعات شده و کارایی و شفافیت بیشتری نسبت به گذشته ایجاد می‌کند (داودآبادی و قناد، ۱۳۹۲).

صنعت آب و فاضلاب کشور (۱۳۹۷) با بازار هدف ۳۷/۹ میلیون مشترک، حجم سرمایه‌گذاری ۴۷۱ هزار میلیارد در دارایی‌های مؤثر (تجدید ارزیابی‌شده در سال ۱۳۹۱)، گردش مالی عملیاتی ۱۶۱ هزار میلیارد ریال و سهم ۲/۰۲ درصد در تولید ناخالص داخلی اقتصاد کشور، یکی از صنایع بزرگ و راهبردی کشور است. در این صنعت بسیار حساس و راهبردی، متأثر از سلامت و بهداشت آحاد جامعه، انتظارات ذی‌نفعان (قوای سه‌گانه)، قیمت‌گذاری دولتی (اقتصاد اقتصادی)، جذب منابع سرمایه‌ای گسترده از بودجه‌های عمرانی دولت، محدودیت منابع آبی و مسائل متنوع محیط‌زیستی، مدیریت نقدینگی، استفاده بهینه از منابع مالی محدود و... نقش راهبردی ارزیابی عملکرد مالی را برای مدیریت ارشد (وزارت نیرو و شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور) دوچندان کرده است. در این پژوهش، ارزیابی عملکرد مالی این صنعت در راستای تولید اطلاعات "مربوط بودن"[۱] (مشخصه بنیادین کیفیت اطلاعات حسابداری) برای مدیریت ارشد در راستای تصمیم‌گیری و کنترل در بستر نظام یکپارچه کنترل مدیریت صنعت با رویکردهای مدل‌های کمی که قادر به تولید اطلاعات قابل‌اطمینان است (مدل‌سازی معادلات ساختاری - تحلیل عاملی تأییدی)، انجام‌شده است. محدوده مکانی پژوهش، صنعت آب و فاضلاب کشور (۳۵ شرکت با شخصیت حقوقی مستقل) و محدوده زمانی ۱۳۷۷-۱۳۹۷ که داده‌های آن از بانک اطلاعاتی SQL_Server سامانه الکترونیکی "ارزیابی شاخص‌های عملکرد مالی" جمع‌آوری شده است. در راستای محاسبات، از بسته نرم‌افزارهای $SPSS_{23}$, $MINITAB_{18}$, $SAS_{0.07}$ و $AMOS_{23}$ به فراخور نیاز استفاده‌شده است.

۲- مبانی نظری

ارزیابی عملکرد، فرآیند سنجش، اندازه‌گیری و مقایسه میزان و نحوه دستیابی به وضعیت ایده‌آل (مطلوب) با معیارها و نگرش معین با شاخص‌های خاص طی بازه زمانی معین با هدف بازنگری، اصلاح و بهبود مستمر فعالیت‌های عملیاتی در زمینه‌های گوناگون است. ارزیابی عملکرد، مختص واحدهای اقتصادی نبوده و شامل سطوح کلان دولت، منطقه‌ای، شرکت‌ها و دستگاه‌های دولتی و سطوح عملیاتی واحدهای نهادی می‌شود. ضرورت و اهمیت طراحی و استقرار سامانه‌های ارزیابی عملکرد در صنعت آب و فاضلاب، نظر به محدودیت منابع، جذب منابع گسترده اعتبارات دولتی، سرمایه‌گذاری کلان، حیطه فعالیت جغرافیایی گسترده، قیمت‌گذاری اجتماعی (اقتصادی دستوری)، خدمات بهینه، انتظارات ذی‌نفعان، تأمین نیازهای اطلاعاتی و غیره را دوچندان نموده است (داوود آبادی و همکاران، ۱۳۹۹).

مدیریت از طریق شیوه‌های متنوع ارزیابی عملکرد، نقاط ضعف و قوت را شناسایی و با تعیین علت‌های ریشه‌ای ضعف‌ها و مغایرت‌ها، قبل از آن‌که فرصت‌ها از دست برود، اقدام‌های اصلاحی مناسب برای بهبود عملکرد، اتخاذ راهبردها، بهینه‌سازی فعالیت‌ها، بهره‌جویی بهینه از سرمایه‌گذاری‌ها، ایجاد حداکثر ثروت یا تأمین انتظارات ذی‌نفعان را فراهم می‌کنند (داودآبادی و همکاران، ۱۳۹۹). خلاصه هدف‌های کلان ارزیابی عملکرد (مالی) در سطوح گوناگون صنعت آب و فاضلاب به‌شرح زیر است:

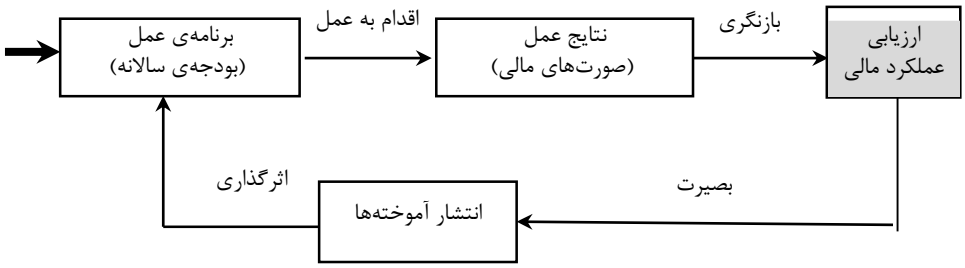
- شناسایی شاخص‌های بهینه برای ارزیابی عملکرد مالی با شیوه‌های علمی و ایجاد مدل ارزیابی جامع برای ارزیابی عملکرد مناسب برای صنعت آب و فاضلاب.
- فراهم کردن امکان ارزیابی عملکرد مدیریت در ایفای وظیفه مباشرتی (حساب‌دهی) و استفاده بهینه از امکانات و منابع موجود،

برای دستیابی به برنامه‌ها و سیاست‌های هدف‌گذاری شده، توأم با شیوه‌های اقتصادی، کارآمدی و اثربخشی فعالیت‌ها.

- فراهم کردن اطلاعات لازم برای تصمیم‌های مدیریت در تخصیص منابع از طریق تصمیم‌گیری متکی به اطلاعات قابل‌اطمینان و پرهیز از تصمیم‌گیری غیر بهینه.
- کمک به برنامه‌ریزی و کنترل بر اساس شاخص‌های احصا شده و تجزیه و تحلیل بهتر انحرافات در برنامه‌ها.
- ایجاد بسترهای مکفی برای ایجاد همکاری و تبادل متقابل اطلاعات با حسابرسی داخلی و عملیاتی و بودجه‌ریزی عملیاتی.
- شناسایی میزان تحقق عملکرد واقعی فعالیت‌ها (نقاط قوت و ضعف) و ارائه شیوه‌هایی برای بهبود و برنامه‌ریزی آتی.
- شناسایی، ارزیابی، تجزیه و تحلیل، رتبه‌بندی و شرکت‌های زیرمجموعه یک صنعت (هلدینگ) از منظر شناسایی تحقق عملکرد واقعی، نظر به برنامه‌ها و سیاست‌های هدف‌گذاری شده. (داودآبادی و همکاران، ۱۳۹۹)
- افزایش بهره‌وری از طریق رویکرد همتاسنجی[۲] مبتنی بر شناسایی واحدهای بهینه در صنعت ازنظر شاخص‌های ارزیابی احصاء شده.

۳- مدل یادگیری سازمانی صنعت آب و فاضلاب

مدل یادگیری سازمانی نظام یکپارچه کنترل مدیریت صنعت آب و فاضلاب، طی ۲۵ سال قدمت، در قالب فعالیت تیمی (خردجمعی) توانسته ضمن ایجاد باورهای جدید از روابط گروهی و یادگیری جمعی، با ایجاد وحدت رویه در صنعت، دست به دگرگونی عملیاتی زده و در مسیر حرکت با هم‌افزایی فکری حاصل از جذب خبرگان صنعت، مجموعه نرم‌افزارهای این نظام را به لحاظ کیفی ارتقا بخشد. این مدل در چهار سطح راهبردی صنعت (شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور و وزارت نیرو)، شرکت‌های آب و فاضلاب استانی، واحدهای خودگردان و مستقل و مدیریت تخصصی (کسب و کار) در یک محیط یکپارچه (شکل ۱) طراحی و استقراریافته است.



شکل ۱- چرخه نظام یکپارچه کنترل مدیریت صنعت آب و فاضلاب کشور (خشایی و داودآبادی، ۱۳۸۵)

۴- ضرورت انجام تحقیق

مهم‌ترین نیازها و الزام‌های ارزیابی عملکرد در صنعت آب و فاضلاب، موارد زیر است:

- نظر به انحصاری بودن فعالیت‌های این صنعت (انحصار طبیعی) و فقدان امکان رقابت، بهترین شیوه برای بهبود کیفیت ارائه خدمات، ایجاد فضای رقابتی سالم یا شبهه رقابت بین شرکت‌های استانی است. ارزیابی عملکرد، از شیوه‌های ایجاد فضای رقابتی، رتبه‌بندی و کیفیت ارائه‌ی خدمات است که این مستلزم وجود شاخص‌های مناسب، شیوه‌های معتبر ارزیابی، نگهداری، ذخیره‌سازی نتایج حاصل از بررسی‌ها و تحلیل‌ها است.
- کنترل، نظارت و ارزیابی عملکرد واحدهای عملیاتی و تعیین درجه و میزان انطباق عملیات آن‌ها باهدف‌ها و برنامه‌های هدف‌گذاری شده و با بهره‌گیری از شیوه‌های علمی قابل استدلال یکی از وظایف مدیریت است. این رویکرد با بهره‌گیری از شیوه‌های کمی ارزیابی امکان‌پذیر است (کنترل زمان وقوع)؛ زیرا مدیریت، مستلزم فرآیند برنامه‌ریزی، هدایت، کنترل و ارزشیابی عملیات در راستای هماهنگی مطلوب میان منابع انسانی و مادی که در نیل به سیاست‌های هدف‌گذاری شده، به‌صورت کارآمد است و کنترل، بخشی از این فرآیند است.
- تولید اطلاعات قابل‌اطمینان صنعت آب و فاضلاب برای تدوین برنامه‌ها، خط‌مشی‌ها و راهبردهای عملیاتی صنعت و تدوین ضوابط تدوین بودجه عملیاتی سالانه و هدف‌گذاری سیاست‌ها بر پایه برنامه‌های عملیاتی، ضوابط علمی و اطلاعات کمی. اطلاعات این بخش، قادر به تغذیه نیازهای ذی‌نفعان برون‌سازمانی ناظر نیز است.
- کمک به توانمندسازی مدیریت مالی شرکت‌های آب و فاضلاب استانی برای استفاده کارآمد از منابع مالی گوناگون، سنجش میزان کارآمدی مدیریت در استفاده از امکانات موجود (بالقوه و بالفعل) و کنترل هزینه‌ها نظر به سیاست‌های اجتماعی

قیمت‌گذاری آب و فاضلاب توسط دولت و موارد مشابه.

برنامه‌ی کاری و هدف‌های ارزیابی عملکرد در چهار سطح راهبردی مدیریت صنعت شرکت‌های آب و فاضلاب مطابق جدول ۱ است (داودآبادی و همکاران، ۱۳۹۹).

جدول ۱- هدف‌های ارزیابی عملکرد مالی در سطوح گوناگون مدیریت صنعت آب و فاضلاب کشور

سطوح راهبردی	برنامه کاری و هدف‌ها
صنعت (شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور)	▪ استخراج شاخص‌ها، تعیین جایگاه هر شرکت در شکل‌گیری نتایج فعالیت‌ها در صنعت و تعیین شاخص‌ها به‌عنوان معیار مقایسه و تهیه‌ی اطلاعات بنیادین، بهره‌وری، منابع انسانی، تخصیص منابع و مشترکان و... (دوره یک‌ساله). این نتایج هر ساله، تحت‌عنوان نشریه "گزارش عملکرد" چاپ و منتشر می‌شود. این مجموعه حاوی تعدادی شاخص، به تفکیک بخش‌های گوناگون (۶ بخش عملکرد مالی، اقتصادی، کارکنان، مشترکان، تخصیص و تجهیز منابع و فرآیندهای مدیریت داخلی) است.
بنگاه (مدیریت بخشی یا شرکت‌های استانی)	▪ ارزیابی و تعیین جایگاه واحدهای عملیاتی با هدف‌های بهبود ارزیابی نتایج عملکرد در شکل‌گیری نتایج فعالیت و تعیین معیارهای مقایسه‌ای واحدهای عملیاتی با یکدیگر (به‌طورمعمول دوره یک‌ساله).
واحدهای تخصصی	▪ ارزیابی عملکرد فعالیت‌های بهره‌برداری، تجزیه و تحلیل اثربخشی و کارآمدی درون‌سازمانی واحدهای عملیاتی (دوره یک‌ساله).
کسب و کار	▪ ارزیابی عملکرد نتایج واحدهای عملیاتی با یکدیگر و معیاری برای مقایسه اطلاعات صنعت در راستای بهبود و ارتقای سطح فعالیت‌ها (به‌طور معمول دوره یک‌ساله).

۵- پیشینه تحقیق

برپایه مطالعات گسترده در سامانه‌های اطلاع‌رسانی الکترونیکی داخلی و خارجی، پژوهش‌های مالی مرتبط با موضوع و نوع مدل این پژوهش یافت نشد. بیش‌تر مطالعات ارزیابی عملکرد مالی، حول مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه[۳] نظیر مدل شباهت به گزینه‌های ایده‌آل[۴]، تحلیل سلسله مراتبی[۵]، کارت امتیاز متوازن یا مؤلفه‌های چندمتغیره (نظیر رگرسیون خطی و اقتصادسنجی - پنل دیتا) بود. در خصوص مدل انتخابی پژوهش (مدل‌سازی معادلات ساختاری - تحلیل عاملی تأییدی)، بیش‌تر موضوعات حول محور علوم رفتاری (علوم تربیتی، روانشناسی، اخلاق و رفتار، اقتصاد رفتاری، مسائل متنوع علوم اجتماعی و...) بود. برای نمونه داوودآبادی و همکاران (۱۳۹۴) بهبود ارزیابی عملکرد مالی با رویکرد تحلیل رابطه‌ای خاکستری (GRA) را بررسی کردند. دراین پژوهش نماینده شاخص‌های مالی تعیین و شرکت‌های آب و فاضلاب براساس نماینده شاخص‌ها رتبه بندی شده بودند، درنتیجه بین دو وضعیت بدون نماینده شاخص‌ها و با نماینده شاخص‌ها تفاوت قابل ملاحظه‌ای در ارزیابی عملکرد مشاهده شد.

Tehrani et al. (2012) عملکرد شرکت‌ها را به‌روش تحلیل پوششی داده‌ها بررسی کردند. نتایج نشان‌داد روش مورد استفاده می‌تواند عملکرد شرکت‌ها را به‌دقت اندازه گیری و ارزیابی کند و موقعیت شرکت‌ها را در بین سایر شرکت‌ها مشخص نماید. گلی آیسک و دهدار (۱۳۹۵) عملکرد مالی صنعت آب و فاضلاب شهری را براساس مدل BSC مورد ارزیابی قراردادند. نتایج نشان داد جنبه‌های مدل ارزیابی متوازن با ارزیابی عملکرد وابسته‌اند. این موضوع دریک سطح آماری بررسی شد که نشان می‌دهد بین معیارهای ارزیابی متوازن و عملکرد شرکت‌ها رابطه مستقیمی وجود دارد. در نتیجه بهبود معیارهای ارزیابی متوازن باعث بهبود عملکرد سازمان‌ها می‌شود. رضایی و امیرحسینی (۱۳۹۶) در پژوهشی عملکرد مالی را به شیوه الگوریتم درخت تصمیم‌گیری ارزیابی کردند و با شناسایی مهم‌ترین نسبت‌های مالی عملکرد شرکت‌ها را مورد بررسی قراردادند. نتایج نشان داد تحلیل عاملی تاییدی و الگوریتم درخت تصمیم‌گیری شیوه مناسبی درشناسایی نسبت‌های موثر درعملکرد شرکت‌ها هستند.

در تحقیق دیگری نمازی و مصلی نژاد (۱۴۰۰) شاخص‌های حسابداری مدیریت آب را با رویکرد فراترکیب و فن ارزیابی متوازن بررسی کردند. دراین تحقیق ارزیابی‌ها براساس شاخص کمی و کیفی درحسابداری آب مورد بررسی قرارگرفت. داودآبادی و راه پیما (۱۴۰۰) درمطالعه ای شاخص‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر را به شیوه تحلیل پوششی داده‌ها ارزیابی کردند. در این تحقیق عملکرد شاخص‌های نقدینگی، فعالیت، اقتصادی، سود آوری و سرمایه گذاری مورد بررسی قرارگرفت. نتایج نشان داد که مدل تحلیل پوششی داده‌ها یکی از مطمئن‌ترین شیوه‌های علمی و مدیریتی با چندین شاخص نهاده و ستانده است که می‌تواند با درنظر گرفتن تمامی جوانب از جمله اولویت شاخص‌ها نسبت به یکدیگر، گزینه‌ها را سنجیده و آن‌ها را به شیوهای علمی اولویت‌گذاری کند که نتیجه آن انتخاب اولویت‌ها یا شناسایی مولفه‌های موثر در مسائل مدیریت است. نظری‌پور (۱۴۰۰) نقش حسابداران در افزایش بهره‌وری آب را به‌روش تحلیل عاملی اکتشافی و تاییدی بررسی کرد. نتایج نشان‌داد که روش‌های علمی تاثیر به‌سزایی درافزایش کارایی و اثربخشی سازمان‌ها نسبت به روش‌های سنتی دارد.

Mollaalizadeh Zavardehiaa et al. (2021) درمطالعه‌ای عملکرد مالی شرکت‌های پتروشیمی خلیج فارس با شیوه

نظرسنجی پرسشنامه‌ای، هفت عامل اثرگذار درعملکرد مالی را مورد بررسی قراردادند که روش تحلیل عاملی تاییدی نیز اعتبار آن را مورد تایید قرارداد. کلامی و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی عوامل موثر بر بازاریابی اجتماعی در حوزه صنعت آب و فاضلاب کشور را شناسایی و تحلیل کردند. آن‌ها برای شناسایی عوامل از روش تحلیل محتوا و برای تحلیل روابط متغیرها از روش معادلات ساختاری استفاده کردند. نتایج نشان‌داد که عوامل مؤثر بر بازاریابی اجتماعی، شامل ۲۰ مؤلفه در قالب ۶ بعد (خودپنداری، کنترل رفتاری ادراک شده، دینداری، هنجارهای ذهنی، نگرش هنجارهای اخلاقی) هستند. هم‌چنین نتایج معادلات ساختاری نشان داد عوامل نگرش بیشترین تاثیر و دینداری کمترین تأثیر را بر بازاریابی اجتماعی دارد.

Wang et al. (2023) عملکرد شرکت‌ها را برپایه منطق فازی بررسی کردند. براساس نتایج این پژوهش عوامل محیطی موثر درعملکرد شرکت‌ها براساس مولفه های ورودی و خروجی نوعی تکنیک قابل اطمینان خواهد بود. González-García et al. (2023) عملکرد مالی نیروگاه زمین گرمایی لاس هومروس مکزیک را ارزیابی کردند. آن‌ها سودآوری نیروگاه لاس هومروس را در دو سناریوی قرارداد واگذاری و سناریوی مشارکت کامل در بازار برق مکزیک را بررسی کردند. نتایج نشان‌داد که در چارچوب قرارداد واگذاری، نیروگاه لاس هومروس از سودآوری بالایی برخوردار است، اما درصورت مشارکت کامل در بازار باز، عدم قطعیت‌های قیمتی ممکن است بر سودآوری تأثیر منفی بگذارد.

بنابراین بررسی‌ها نشان می‌دهد اگرچه تحلیل‌هایی برای شناسایی مولفه‌های ارزیابی عملکرد مالی شرکت‌ها انجام‌شده است، اما هنوز میزان اثرگذاری شاخص‌های موثر در ارزیابی عملکرد بر پایه روش‌های علمی و مقایسه نتایج با روش‌های سنتی به‌صورت جامع صورت نگرفته است. درایران، در اجرا، نه تنها مقایسه تحلیل نتایج علمی با روش‌های سنتی به‌صورت کامل وجود ندارد، بلکه از روش‌های علمی ذکر شده نیز استفاده نمی‌شود.

۶- سؤال‌ها

این پژوهش، در راستای پاسخ‌گویی به سؤال‌های زیر انجام شده است:

- آیا شاخص‌های مالی بر ارزیابی عملکرد مالی صنعت آب و فاضلاب مؤثر است؟
- آیا شاخص‌های نقدینگی بر ارزیابی عملکرد مالی صنعت آب و فاضلاب مؤثر است؟
- آیا شاخص‌های فعالیت بر ارزیابی عملکرد مالی صنعت آب و فاضلاب مؤثر است؟
- آیا شاخص‌های سرمایه‌گذاری بر ارزیابی عملکرد مالی صنعت آب و فاضلاب مؤثر است؟
- آیا شاخص‌های سودآوری بر ارزیابی عملکرد مالی صنعت آب و فاضلاب مؤثر است؟
- اولویت شاخص‌های مالی مؤثر بر ارزیابی عملکرد مالی صنعت آب و فاضلاب کدام‌اند؟

۷- متغیرها (مستقل و وابسته)

بر پایه مطالعات گسترده‌ای که سبب پیشنهاد مدل اولیه و ثانویه پژوهش شد، متغیرها به‌شرح زیر لحاظ شدند.

- **متغیرهای مستقل مکنون (پیش‌گو) (درون‌زا):** این متغیرها قابل‌کنترل‌اند. مطابق مدل پیشنهادی اولیه، متغیرهای مستقل مکنون عبارت‌اند از شاخص‌های نقدینگی[۶] (Liq)، فعالیت[۷] (Act)، سرمایه‌گذاری[۸] (Cap) و سودآوری[۹] (Pro) که دارای متغیرهای قابل‌مشاهده (اندازه‌گیری) به‌شرح زیر است:
  - نقدینگی: جاری (Cur)، آنی (Qui) و نسبت دارایی‌های جاری (Ass).
  - فعالیت: نسبت گردش دارایی‌ها (Was)، دوره وصول مطالبات (RCP) و دارایی‌های ثابت به ارزش ویژه (Iwc).
  - سرمایه‌گذاری: کل بدهی به ارزش ویژه (Tdw)، بدهی جاری به ارزش ویژه (Cdw)، نسبت بدهی بلندمدت (Der) و نسبت پوشش بدهی‌ها (Ltw) و نسبت مالکانه (Nta).
  - شاخص‌های سودآوری (Pro): بازدهی فروش (Ros)، بازدهی دارایی (Roa)، بازدهی حقوق مالکانه (Ron).
- **متغیر وابسته‌ی مکنون (پاسخ) (برون‌زا):** ارزیابی عملکرد مالی که متغیری پنهان و فاقد متغیر قابل‌مشاهده است.

۸- مدل مفهومی پژوهش

مدل اولیه پیشنهادی مفهومی پژوهش، یک فرضیه اولیه است که توسط محقق پیش‌فرض می‌شود. این مدل شامل روابط بین متغیرهای مورد ارزیابی و عوامل دیگر است که بر روی عملکرد مالی تأثیر می‌گذارند. این مدل اولیه براساس نظریه و تئوری‌های قبلی و مطالعات پیشین تعیین می‌شود و بر پایه مدل‌های کمی مدل‌سازی معادلات ساختاری (تحلیل عاملی تأییدی)، مطابق شکل‌های ۲ و ۳ است. در این مدل‌ها، به‌جای استفاده از رگرسیون خطی چند

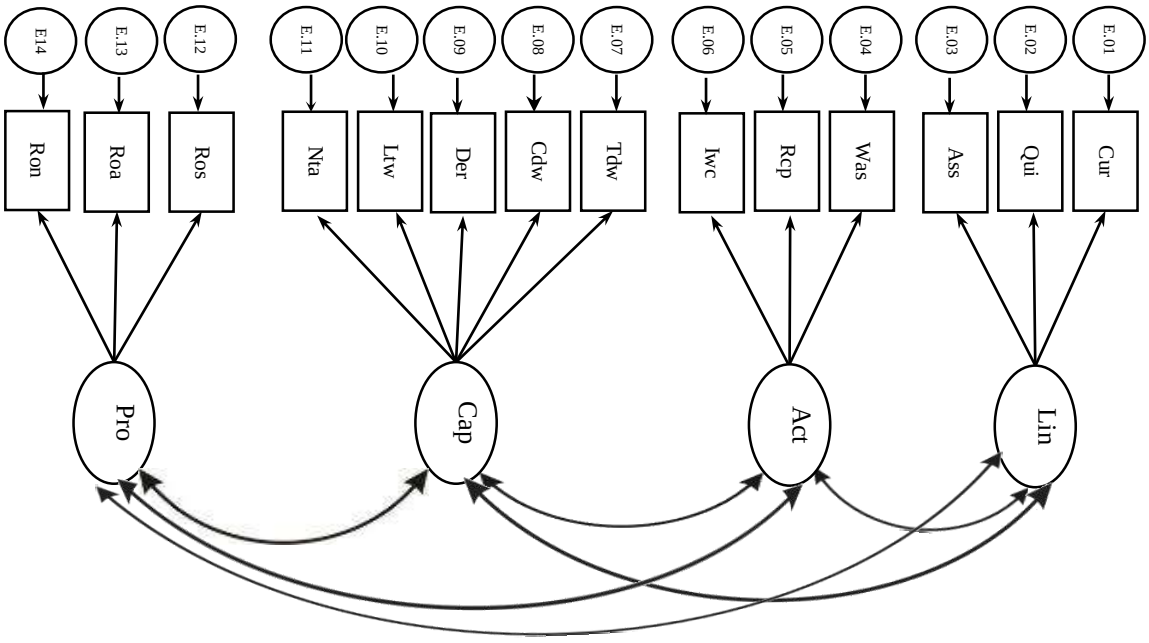
متغیره، از شیوه مدل‌سازی معادلات ساختاری[10] (تحلیل عاملی تأییدی)[11] استفاده‌شده است. در این شیوه آماری، به‌جای بهره‌گیری از میانگین متغیرها از بارهای عاملی و میزان خطای اندازه‌گیری بهره‌گرفته می‌شود (شیوه حداکثر درست نمایی)[12].

در مدل‌سازی معادلات ساختاری، همواره پژوهش‌گر، مدلی را پیشنهاد، داده‌هایی جمع‌آوری و آن‌ها را آزمون و با بهره‌گیری از آزمون‌های متنوع نیکویی برازش، مدل پیشنهادی در سطح اطمینان قابل‌قبول تأیید یا مردود می‌شود (درصورت مردودی، مدل پیشنهادی باید اصلاح شود) درنتیجه مدل ثانویه یا مدل نهایی تشکیل می‌شود. مدل ثانویه یا مدل نهایی در تحلیل عاملی تأییدی مدلی است که پس از اعتبارسنجی مدل اولیه و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها تعیین می‌شود. در این مرحله، اعتبار و دقت مدل اولیه تأیید یا رد می‌شود و تصحیح و بهبودهای لازم براساس یافته‌های آماری و تحلیل داده‌ها صورت می‌گیرد تا مدل نهایی تشکیل شود. در رگرسیون خطی، با بهره‌گیری از متغیرهای مستقل، تغییرات (واریانس) متغیر وابسته قابل پیش‌بینی و ارتباط بین متغیرها با یکدیگر مشخص است.

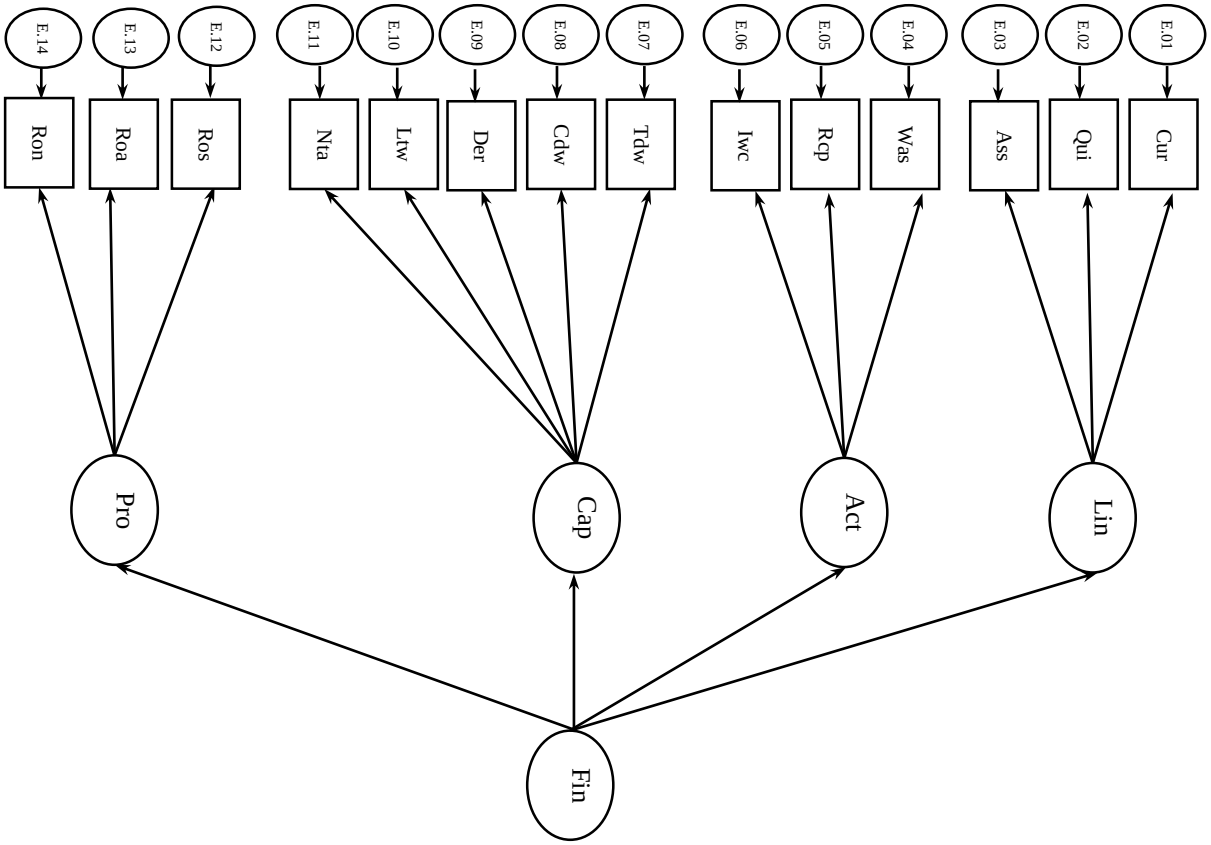
در مدل‌سازی معادلات ساختاری، یک ساختار رابطه‌ای بین متغیرهای مدل ارائه و چگونگی ارتباط عناصر ساختار شناسایی می‌شود. در رگرسیون خطی (حداقل مربعات معمولی[13] یا تعمیم‌یافته)، از شیوه کمینه‌کردن مجموع تفاضل‌های مربعات بین متغیرهای مشاهده‌پذیر (مستقل) و وابسته استفاده می‌شود. به تعبیری، قدرت پیش‌بینی کنندگی متغیرهای مستقل با استفاده از این تفاضل حاصل می‌شود. مدل‌سازی معادلات ساختاری، شیوه‌ای متفاوت برای تجزیه و تحلیل داده‌ها است و به‌جای کمینه‌کردن مجموع تفاضل‌های بین متغیرهای مستقل و وابسته، در جست و جوی کمینه‌کردن تفاضل بین واریانس و کوواریانس متغیرهای مشاهده‌پذیر است. شناسایی متغیرهای پنهان در رگرسیون خطی، امکان‌پذیر نیست. در رگرسیون خطی نمی‌توان با بهره‌گیری از متغیرهای مشاهده‌پذیر، متغیرهای پنهان را اندازه‌گیری کرد. در مدل‌سازی معادلات ساختاری، با بهره‌گیری از متغیرهای مشاهده‌پذیر، متغیرهای پنهان اندازه‌گیری می‌شوند. درواقع، در مدل‌هایی که متغیر پنهان با چند متغیر اندازه‌گیری وجود دارد، تحلیل رگرسیونی کاربرد ندارد.

بهره‌گیری از شیوه مدل‌سازی معادلات ساختاری، از رگرسیون خطی کارآمدی بیش‌تری دارد (ابارشی و یعقوبی، ۱۳۹۴). مشخصه‌های خاص مدل عبارتند از:

- چهار متغیر مستقل مکنون: شاخص‌های نقدینگی (Lin)، فعالیت (Act)[14] ، سرمایه‌گذاری (Cap) و سودآوری- (Pro).
- ۱۴ متغیر قابل‌مشاهده (اندازه‌گیری) (شاخص‌های مالی) و ۱۴ خطای متغیر قابل‌اندازه‌گیری (err).
- چهار خطای باقی‌مانده برای متغیر مستقل مکنون (Resid).
- چهار مسیر بار عاملی متغیرهای پنهان مستقل و چهار آزمون معنی‌داری مسیر بار عاملی.
- شش ضریب همبستگی با سطح معنی‌داری آزمون بین متغیرهای مستقل مکنون فرعی.



شکل ۲- مدل اولیه (اندازه‌گیری) ارتباط متقابل شاخص‌های ارزیابی عملکرد مالی



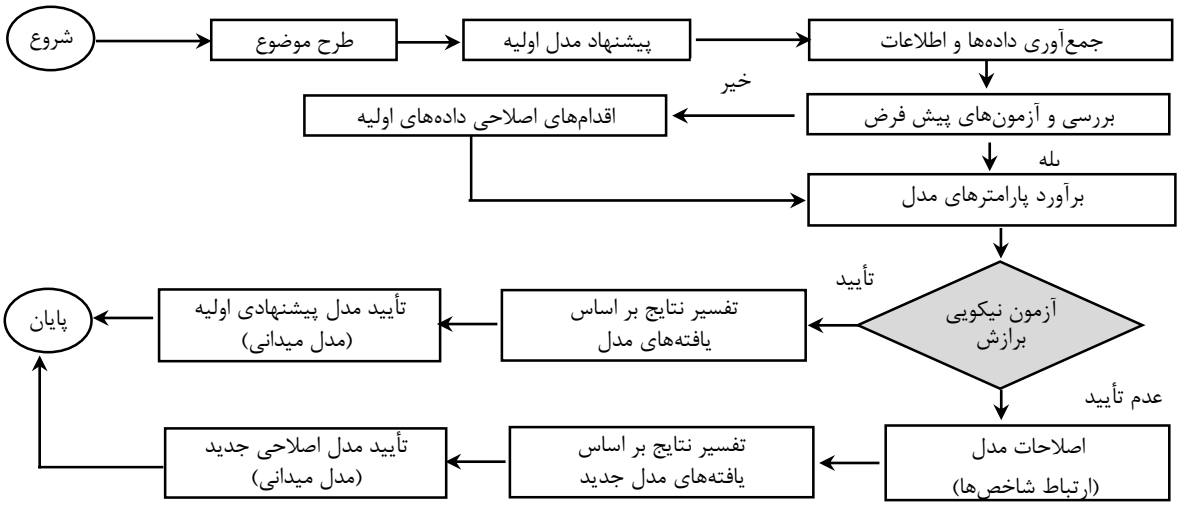
شکل ۳- مدل ثانویه (ساختاری) شناسایی تأثیر شاخص‌های مالی بر ارزیابی عملکرد مالی

۹- روش تحقیق، نمونه و روش نمونه‌گیری

این پژوهش، ازلحاظ هدف از نوع کاربردی است و از طرح شبه تجربی و رویکرد پس رویدادی استفاده می‌کند. هنگامی از این شیوه، بهره‌گیری می‌شود که داده‌های پژوهش، به‌گونه‌ای طبیعی موجود باشند یا از واقعیت‌هایی که بدون دخالت مستقیم پژوهش‌گر اتفاق افتاده، فراهم شود. این شیوه، برای پژوهش‌هایی است که پژوهش‌گر در جست‌وجوی علت روابط معینی است که درگذشته اتفاق افتاده است. شیوه تحقیق از منظر جمع‌آوری داده‌ها و مبانی نظری از نوع توصیفی است و به‌منظور استخراج شاخص‌ها با توجه به ابعاد گسترده مدیریت در این پژوهش از متغیرهای قابل‌اندازه‌گیری مالی برگرفته از گزارش شاخص‌ها و نسبت‌های تدوین‌شده در گزارش سالانه شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور با عنوان کتابچه ابجد که براساس نظر خبرگان تدوین می‌شود جمع‌آوری‌شده است که در این پژوهش نیز به‌عنوان شاخص‌های ارزیابی عملکرد مالی به روش علمی (تحلیل عاملی تأییدی) مورداستفاده قرارگرفته است.

از آن‌جا که هدف پژوهش فراگیر شدن نتایج آن در سازمان است، لذا تصمیم بر آن است که نمونه آماری شامل تمامی افراد جامعه باشد. به‌عبارت‌دیگر در این پژوهش جامعه برابر نمونه است و از روش سرشماری استفاده‌شده است. بنابراین داده‌های ۳۵ شرکت مستقل شامل متغیرهای تحقیق بر مبنای داده‌های تاریخی مربوط به سال‌های مالی ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۷ استخراج و شاخص‌های موردنظر محاسبه شد و برای بررسی و ارزیابی وزن شاخص‌ها، از نمونه‌ای متشکل از ۵ نفر خبرگان حاضر در هیئت‌مدیره شرکت آب و فاضلاب کشور استفاده شد. به‌این‌ترتیب نتایج حاصل از روش تحلیل عاملی تأییدی درنهایت با نظر این خبرگان مورد مقایسه قرارگرفت.

لازم به توضیح است که استفاده از روش تحلیل عاملی تأییدی درشناسایی شاخص‌های مؤثر در عملکرد صنعت آب و فاضلاب به‌عنوان یک روش علمی نیز دارای نقاط قوت و ضعف است که ازجمله نقاط قوت آن می‌توان به‌دقت بالا، تعمیم‌پذیری، شناسایی عوامل مؤثر، امکان تشخیص روابط پنهان بین شاخص‌های عملکردی و هم‌چنین کمک به مدیران در خصوص شناسایی فرایند بهبود عملکرد اشاره کرد و درخصوص نقاط ضعف این روش می‌توان از پیچیدگی استفاده از آن در مورد تحلیل داده‌ها و کشف روابط بین داده‌های پنهان و قابل‌مشاهده، زمان بربودن، وابستگی به داده‌ها و تعیین عوامل مؤثر در ارزیابی عملکرد که نیاز به مطالعات دقیق‌تر و تخصص بیشتری دارد را نام برد.



شکل ۴- نمای تصویری (شماتیک) مراحل اجرایی پژوهش به‌اختصار

۱۰- یافته‌های پژوهش

حل مسائل کاربردی با مدل‌سازی معادلات ساختاری، مستلزم محاسبات بسیار گسترده است که در این بخش فقط نتایج نهایی ارائه‌شده است.

۱۰-۱- بررسی و آماده‌سازی داده‌ها

حصول اطمینان از صحت اطلاعات از موضوعات بسیار اثربخش در مدل‌سازی معادلات ساختاری و آزمون‌های آماری است و عدم صحت داده‌های اولیه، سبب نتایج اریب[۱۵] (نظیر رگرسیون کاذب) می‌شود.

داده‌های مفقود (گمشده)[۱۶]: با بررسی ظاهری و ترسیم نمودارهای چارک – چارک (Q-Q)، جعبه‌ای و هیستوگرام و برخی پارامترهای پراکندگی (کمینه و بیشینه)، هیچ داده مفقودی یافت نشد.

داده‌های پرت[۱۷]: شناسایی داده‌های پرت از طریق کد نویسی در محیط نرم‌افزار SAS.07 انجام شد. داده‌هایی که بیش‌تر از ۲/۵ برابر انحراف معیار از میانگین مشاهدات فاصله‌دارند، داده‌های پرت‌اند. برای شناسایی داده‌های پرت، ابتدا مقدار خطای آزمایش شناسایی و مقدار پیش‌بینی‌شده هریک از مشاهده‌ها و انحراف مقادیر مشاهده‌شده از مقادیر پیش‌بینی‌شده به‌عنوان باقی‌مانده داده‌ها، باید شناسایی شوند. داده‌هایی که مقدار باقی‌مانده آن‌ها بیش‌تر از ۲/۵ برابر انحراف معیار خطای آزمایش باشد، داده‌های پرت‌اند؛ زیرا مجموع انحراف تمامی داده‌ها از میانگین برابر صفر است ($\Sigma|x_i-\mu|=0$). از سویی ۹۹ درصد از مشاهده‌ها توزیع جامعه‌ی نرمال در دامنه ۲/۵۸ برابر انحراف معیار در دو طرف میانگین واقع‌اند $p[\mu-2.58\sigma \le xi \le \mu+2.58\sigma]$. لذا، داده‌های دامنه بالای ۹۹ درصد، داده‌های قابل‌قبول‌اند. مطابق محاسبات، تعداد ۱۹ فقره داده پرت شناسایی شد که برای تصحیح آن‌ها از میانگین صنعت در همان سال استفاده شد (شرکت‌های صنعت آب و فاضلاب، حیطه جغرافیایی گسترده‌ای دارند به‌طوری‌که تمام شهرها و روستاهای کشور (بالای ۲۰ خانوار) تحت پوشش عملیاتی آن‌ها هستند و فعالیت آن‌ها متأثر از شرایط جغرافیایی و توپوگرافی منطقه‌ای است. لذا داده‌های پرت مرتبط به شرکت‌هایی بود که در سنوات گذشته بحران‌های طبیعی داشتند (نظیر زلزله کرمان در سال ۱۳۸۲، سیل سیستان و بلوچستان در سال ۱۳۷۶، خشک‌سالی‌های مستمر فلات مرکزی و...).

نرمالیتی متغیرها: در راستای شناسایی نرمالیتی متغیرها، نظر به ماهیت شاخص‌ها، از آزمون اندرسون دارلینگ[۱۸]، نمودارهای چارک – چارک (Q-Q) و هیستوگرام در بستر نرم‌افزار Minitab18 استفاده شد (جدول ۳). برای اطمینان بیش‌تر از آزمون‌های شاپیرو ویلک[۱۹] و کرامر- وان مایس[۲۰] در بستر نرم‌افزار SAS.07 نیز استفاده شد.

$$\begin{cases} H_0: X \sim N(0, 1) \\ H_1: \text{Not } H_0 \end{cases} \quad (۱)$$

مطابق جدول ۳، نظر به این‌که سطح معنی‌داری آزمون (Sig)، کم‌تر از سطح α است (یک درصد)، لذا با احتمال ۹۹ درصد اطمینان، متغیرهای پژوهش توزیع نرمال ندارند، به‌استثنای متغیر نسبت پوشش بدهی‌ها (Ltw) که سطح معنی‌داری آزمون (Sig) آن بیش‌تر از سطح α و توزیع آن نرمال است. در ادامه نظر به مقیاس اندازه‌گیری داده‌ها، برای نرمالیزه کردن متغیرها (شاخص‌های مالی)، از شیوه تبدیل جانسون[۲۱] در نرم‌افزار Minitab18 استفاده و محاسبات مرتبط با معادلات ساختاری براساس این داده‌ها، انجام شد.

جدول ۳: نتایج آزمون اندرسون دارلینگ (A.D) شناسایی نرمالیتی متغیرهای پژوهش

	متغیر	میانگین	انحراف معیار	مقدار آزمون	سطح معنی‌داری
نقدینگی (Liq)	جاری (Cur)	۱۳۰/۲	۷۴/۲۵	۱۸/۷۷	۰/۰۰۰
	آنی (Qui)	۱۲۲/۹	۷۱/۲۱	۲۰/۲۱	۰/۰۰۰
	دارایی‌های جاری (Ass)	۷/۲۶۲	۴/۲۶۱	۹/۹۵۱	۰/۰۰۰
فعالیت (Act)	گردش دارایی‌ها (Was)	۶/۳۶۲	۲/۹۵۳	۳/۶۲۱	۰/۰۰۰
	دوره‌ی وصول مطالبات (RCP)	۱۳۶/۱	۷۳/۱۳	۱۷/۱۷	۰/۰۰۰
	دارایی‌های ثابت به ارزش ویژه (Iwc)	۱۰۳/۴	۱۰۸/۱	۵۴/۵۱	۰/۰۰۰
سرمایه‌گذاری (Cap)	کل بدهی به ارزش ویژه (Tdw)	۱۲۳/۵	۱۲۷/۶	۵۴/۷۱	۰/۰۰۰
	بدهی جاری به ارزش ویژه (Cdw)	۱۵/۴۲	۱۴/۴۱	۴۲/۵۱	۰/۰۰۰
	نسبت بدهی بلندمدت (Der)	۱۰۷/۴	۱۱۵/۴	۵۲/۷۷	۰/۰۰۰
	نسبت پوشش بدهی‌ها (Ltw)	۵۳/۱۲	۱۸/۰۸	۰/۴۹۱	۰/۴۹۱
	نسبت مالکانه (Nta)	۳/۴۲۱	۲/۹۶۶	۶۸/۹۱	۰/۰۰۰
سودآوری (Pro)	بازدهی فروش (Ros)	۰/۰۱۹	۰/۴۲۳	۳۱/۵۵	۰/۰۰۰
	بازدهی دارایی (Roa)	۰/۲۶۴	۰/۲۸۸	۱۱۳/۱	۰/۰۰۰
	بازدهی حقوق مالکانه (Ron)	۰/۱۲۱	۰/۰۹۵	۴۶/۷۷	۰/۰۰۰

ضریب کیسر میرالکین[۲۲] (KMO) و آزمون کرویت بارتلت[۲۳]: برای مناسب بودن شاخص‌ها برای تحلیل عاملی تأییدی از ضریب KMO و آزمون کرویت بارتلت در بستر نرم‌افزار SPSS۲۴ استفاده شد (جدول ۴).

$$\begin{cases} H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \ldots = \sigma_{10} \\ H_1: \text{At least one } \sigma_i^2 \text{ is not equal to the others.} \end{cases} \quad (۲)$$

جدول ۴- ضریب KMO و نتایج آزمون کرویت بارتلت متغیرهای پژوهش

KMO		۰/۷۶۹
آزمون کرویت بارتلت	آماره کای دو	۲۰۹۶۵/۵
	درجه آزادی	۱۰۵
	مقدار (Sig)	۰/۰۰۰

برپایه جدول ۴، مقدار ضریب KMO معادل ۰/۷۶۹ است، درنتیجه داده‌ها برای انجام تحلیل عاملی تأییدی بسیار مناسب‌اند. سطح معنی‌داری آزمون کرویت بارتلت نیز معنی‌دار است (۹۹ درصد اطمینان) و فرض مقابل قابل‌قبول است، یعنی بین متغیرهای پژوهش (متغیرهای پنهان وابسته) ضریب همبستگی معنی‌داری وجود دارد و اطلاعات متغیرها، برای انجام تحلیل عاملی تأییدی صلاحیت مکفی دارند.

۲-۱۰- یافته‌های مدل اولیه

پس از انجام پیش‌آزمون‌های مرتبط، در این مرحله محاسبات مدل اولیه (شکل ۲) با بهره‌گیری از نرم‌افزار AMOS23[۲۴] انجام شد. اطلاعات این بخش، اعتبار بسیار زیادی دارد و در راستای برنامه‌ریزی‌های مدیریت ارشد صنعت استفاده فراوان می‌شود. جدول ۵، ضرایب رگرسیونی استانداردشده[۲۵] بین متغیرهای مشاهده‌پذیر با متغیرهای مکنون (پنهان) را نشان می‌دهد. در ستون نسبت بحرانی، مقادیر آزمون تی استیودنت (t) (آزمون میانگین ساده) و سطح معنی‌داری آزمون (p) (۵ درصد) هریک از مسیرهای رگرسیونی متغیرهای قابل‌مشاهده به متغیرهای پنهان (مستقل و وابسته) ارائه‌شده است. مطابق جدول ۵، تمام ضرایب رگرسیونی متغیرهای قابل‌اندازه‌گیری معنی‌دارند، به‌دلیل این‌که سطح نقطه بحرانی آن در فاصله اطمینان ($-1.96 \geq x \geq 1.96$) قرار دارد و مقدار سطح معنی‌داری آزمون آن‌ها (p) کم‌تر از سطح α (۵ درصد) است. درواقع، ستون سطح احتمال (p)، معیاری بهینه در راستای تصمیم‌گیری و تجزیه و تحلیل اطلاعات برای مدیریت ارشد است. نماد *** در ستون سطح احتمال (P) به آن معنی است که مقدار (P) نزدیک به صفر و معنی‌دار است، یعنی روابط رگرسیونی توسط مدل تأییدشده و باید در مدل باقی بمانند. در ستون تخمین (Estimate) مقادیر استانداردشده ضرایب رگرسیونی بین متغیرهای قابل اندازه‌گیری و متغیر پنهان ارائه‌شده است و هرچه مقدار آن بیش‌تر باشد مطلوب‌تر است. بیش‌ترین بار عاملی به شاخص جاری (۱/۰۱۸) و کم‌ترین شاخص دوره وصول مطالبات (۰/۰۴۷) اختصاص دارد. اطلاعات این

جدول، نشان از نقش و اهمیت اطلاعات با ضریب اطمینان زیاد در راستای تصمیم‌گیری‌های بهینه مدیریت دارد و مدیریت ارشد باید براساس آن‌ها برنامه‌های راهبردی را تدوین کند. مطابق جدول، شاخص‌های دوره وصول مطالبات و نسبت گردش دارایی‌ها باید به‌دلیل بار عاملی ضعیف باید از مدل حذف شوند.

جدول ۵- ضرایب رگرسیون استانداردشده و آزمون‌های متغیرهای قابل‌اندازه‌گیری

مشاهدات			برآورد	خطای استاندارد	نسبت بحرانی	سطح معنی داری
Ron	<---	Pro	۰/۴۱۶			
Roa	<---	Pro	۰/۵۹۲	۰/۱۵۸	۱۰/۴۱۳	۰/۰۰۰
Ros	<---	Pro	۱/۰۱۲	۰/۲۱۳	۱۲/۰۵۴	۰/۰۰۰
Cur	<---	Liq	۱/۰۱۸			
Qui	<---	Liq	۰/۹۶۵	۰/۰۱۵	۶۳/۱۱۸	۰/۰۰۰
Ass	<---	Liq	۰/۳۵۶	۰/۰۳۴	۱۰/۰۶۹	۰/۰۰۰
Was	<---	Act	۰/۲۹۹			
RCP	<---	Act	۰/۰۴۹	۰/۰۵۶	۲/۹۰۸	۰/۰۰۴
Iwc	<---	Act	۰/۷۵۰	۰/۲۳۵	۱۰/۲۲۶	۰/۰۰۰
Tdw	<---	Cap	۰/۹۹۶			
Cdw	<---	Cap	۰/۶۴۶	۰/۰۲۸	۲۲/۲۵۵	۰/۰۰۰
Der	<---	Cap	۰/۹۸۸	۰/۰۰۷	۱۴۴/۷۱۴	۰/۰۰۰
Ltw	<---	Cap	۰/۹۹۵	۰/۰۰۱	-۱۹۰/۷۱۹	۰/۰۰۰
Nta	<---	Cap	۰/۹۵۱	۰/۰۱۲	-۷۷/۷۴۳	۰/۰۰۰

جدول ۶ ضرایب همبستگی بین متغیرهای پنهان مستقل و وابسته با سطح معنی‌داری آزمون را نشان می‌دهد. مطابق جدول، ضریب همبستگی بین متغیرهای پژوهش در سطح مطلوبی است و در سطح معنی‌داری حداقل اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است. اما ضرایب همبستگی شاخص‌های نقدینگی و فعالیت (۵۲/۸ درصد) و شاخص‌های نقدینگی و سرمایه‌گذاری (۵/۵۵ درصد) هرچند بین آن‌ها، ضریب همبستگی مثبت و مستقیم وجود دارد، اما از منظر آماری معنی‌دار نیستند. یعنی ارتباط بین دو متغیر معنی‌دار نیست و در تصمیم‌گیری و تدوین برنامه‌های راهبردی مدیریت ارشد شرکت نقشی ندارند و باید در تصمیم‌گیری‌ها و برنامه‌ریزی‌ها لحاظ نشوند (از مدل حذف شوند). ضریب همبستگی بین شاخص‌های فعالیت و سرمایه‌گذاری در سطح بسیار مطلوبی است (۸۰ درصد) و تأثیر پررنگی بر یکدیگر دارند و برنامه‌ریزی‌های مدیریت بسیار موثق‌اند. این جدول برای مدیریت ارشد صنعت آب و فاضلاب (شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور) در راستای تدوین راهبردهای عملیاتی مالی بسیار کاربرد دارد. مطابق جدول ۶، فرضیه دوم پژوهش (بین شاخص‌های مالی رابطه‌ای مثبت و معنی‌داری در صنعت آب و فاضلاب وجود دارد) با حداقل ۹۵ درصد تأیید می‌شود.

جدول ۶- ضریب همبستگی و آماره‌های معنی‌داری بین متغیرها

متغیرمکنون			برآورد	خطای استاندارد	نسبت بحرانی	سطح معنی‌داری
نقدینگی	<-->	فعالیت	۰/۵۲۸	۰/۰۱۶	-۰/۲۶۱	۰/۷۹۴
فعالیت	<-->	سرمایه‌گذاری	۰/۸۰۰	۰/۰۴۲	۹/۴۴۸	۰/۰۰۰
نقدینگی	<-->	سرمایه‌گذاری	۰/۵۵۵	۰/۰۳۸	۱/۰۷۳	۰/۲۸۳
سودآوری	<-->	نقدینگی	۰/۷۷۹	۰/۰۱۹	۶/۱۳۹	۰/۰۰۰
سودآوری	<-->	فعالیت	۰/۵۳۵	۰/۰۱۰	۵/۷۷۸	۰/۰۰۰
سودآوری	<-->	سرمایه‌گذاری	۰/۷۲۳	۰/۰۲۰	۶/۸۰۰	۰/۰۰۰

۱۰-۳- یافته‌های مدل ثانویه

نتایج مرتبط با مدل ثانویه پژوهش (شکل ۳)، شناسایی بارهای عاملی متغیرهای پنهان مستقل (شاخص‌های مالی) بر متغیر پنهان ارزیابی عملکرد است. یافته‌های این بخش، محور فعالیت‌های علمی پژوهش است که اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت ارشد در راستای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری مالی است (جدول ۷).

جدول ۷- ضرایب رگرسیون استانداردشده متغیرهای پنهان

برآورد				خطای استاندارد	نسبت بحرانی	سطح معنی داری	برآورد				خطای استاندارد	نسبت بحرانی	سطح معنی داری
Liq	<---	Fine	۰/۱۱۵	۰/۰۰۶	-۲/۴۲۳	۰/۰۱۵	Ros	<---	Pro	۱/۰۲۵			
Act	<---	Fine	۰/۸۸۹	۰/۵۰۲	۳/۰۲۹	۰/۰۰۲	Roa	<---	Pro	۰/۵۷۳	۰/۰۴۰	۱۶/۵۶۹	۰/۰۰۰
Cap	<---	Fine	۰/۴۶۹	۰/۱۰۴	۲/۶۹۳	۰/۰۰۷	Ron	<---	Pro	۰/۴۱۰	۰/۰۳۵	۱۱/۵۱۸	۰/۰۰۰
Pro	<---	Fine	۰/۳۱۰	۰/۰۰۴	۲/۱۸۹	۰/۰۲۹	Tdw	<---	Cap	۰/۹۹۶			
Cur	<---	Liq	۱/۰۲۶				Cdw	<---	Cap	۰/۶۶۳	۰/۰۲۷	۲۳/۲۸۸	۰/۰۰۰
Qui	<---	Liq	۰/۹۵۷	۰/۰۱۸	۵۲/۹۱۹	۰/۰۰۰	Der	<---	Cap	۰/۹۸۹	۰/۰۰۷	۱۵۲/۰۹۷	۰/۰۰۰
Ass	<---	Liq	۰/۳۶۳	۰/۰۳۴	۱۰/۱۰۰	۰/۰۰۰	Ltw	<---	Cap	۰/۹۹۵	۰/۰۰۱	۱۹۹/۳۰۱	۰/۰۰۰
Was	<---	Act	۰/۳۰۸				Nta	<---	Cap	۰/۹۵۵	۰/۰۱۲	۸۱/۵۸۲	۰/۰۰۰
RCP	<---	Act	۰/۰۵۲	۰/۰۵۵	۳/۰۷۳	۰/۰۰۲							
Iwc	<---	Act	۰/۷۵۸	۰/۲۳۴	۱۰/۴۵۸	۰/۰۰۰							

مطابق جدول ۷، تمام ضرایب رگرسیونی متغیرهای مستقل و متغیرهای قابل‌مشاهده (شاخص‌های مالی)، معنی‌دارند، یعنی باید در مدل باقی بمانند (سطح حداقل ۹۵ درصد اطمینان). این ضرایب رگرسیونی (بارهای عاملی)، درواقع همان ضرایب اهمیت و درجه نسبی متغیرهای پنهان و شاخص‌ها است که نقشی راهبردی در تصمیم‌گیری‌های مدیریت دارند. نتایج این جدول راهنمایی ارزشمندی در تدوین راهبردهای عملیاتی است و نشان از نقش و اهمیت اطلاعات با قطعیت زیاد در تصمیم‌گیری‌های مدیریت دارد. ضرایب رگرسیونی (شاخص‌های مالی مستقل) بر ارزیابی عملکرد صنعت آب و فاضلاب در وضعیت استانداردشده به‌ترتیب اولویت شاخص‌های فعالیت (۰/۸۸۹)، سرمایه‌گذاری (۰/۴۶۹)، سودآوری (۰/۳۱۰) و نقدینگی (۰/۱۱۵) هستند. رابطه (۳) به‌عنوان مدل رگرسیونی برای تبیین اثر شاخص‌های مالی مستقل بر ارزیابی عملکرد صنعت آب و فاضلاب ارائه می‌شود.

$$Fine = 0.889Act + 0.469Cap + 0.310Pro + 0.115Liq + \delta \quad (۳)$$

که $Fine$: متغیر پنهان ارزیابی عملکرد صنعت آب و فاضلاب، Act: شاخص‌های فعالیت، Cap: شاخص‌های سرمایه‌گذاری، Pro: شاخص‌های سودآوری، Liq: شاخص‌های نقدینگی و δ: جمله خطای مدل (اختلال تصادفی) هستند.

متغیر پنهان مستقل شاخص‌های فعالیت، بیش‌ترین تأثیر را بر ارزیابی عملکرد مالی دارد (شاخص‌های نقدینگی کم‌ترین). لذا، بیش‌ترین توجه مدیریت ارشد باید در خصوص مؤلفه‌های این متغیر باشد. مؤلفه‌های ضرایب متغیرهای فوق، باید توسط مدیریت ارشد صنعت در بستر مدل‌های کمی و کیفی تجزیه و تحلیل شده و پس از نتایج حاصله، باید برنامه‌ریزی‌های مدونی برای بهبود و ارتقای آن‌ها اتخاذ شود. وضعیت رگرسیونی (بارهای عاملی) استانداردشده متغیرهای قابل‌اندازه‌گیری، در سطح به نسبت مطلوبی است که بیش‌ترین تأثیر را شاخص نسبت جاری بر متغیر پنهان مستقل نقدینگی دارد. شاخص دوره وصول مطالبات بار عاملی بسیار ضعیفی دارند، لذا باید از مدل حذف شوند و بیش‌ترین تمرکز مدیریت بر شاخص نسبت جاری باشد.

برپایه جدول ۷، فرضیه اصلی یک (شاخص‌های مالی بر ارزیابی عملکرد مالی در صنعت آب و فاضلاب موثق‌اند) و فرضیه‌های فرعی ۱ الی ۴ نیز با ضریب اطمینان زیاد تأیید می‌شوند. درواقع، با حداقل ۹۹ درصد اطمینان، شاخص‌های نقدینگی، فعالیت، سودآوری و سرمایه‌گذاری در صنعت آب و فاضلاب بر ارزیابی عملکرد مالی موثق‌اند. این موضوع به‌صراحت گواه است، مدیریت ارشد صنعت (شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور)، باید در این زمینه با شناسایی پارامترهای شاخص‌ها، برنامه‌ریزی‌های راهبردی برای بهبود فعالیت‌های صنعت داشته باشد. منطبق بر جدول ۷، پاسخ سؤال اصلی یک (آیا شاخص‌های مالی بر ارزیابی عملکرد صنعت آب و فاضلاب مؤثر است؟) و سؤال‌های فرعی یک الی چهار "آری" است؛ یعنی شاخص‌های مالی بر ارزیابی عملکرد در صنعت آب و فاضلاب موثق‌اند. در راستای پاسخ‌گویی به سؤال اصلی دوم (اولویت شاخص‌های مالی مؤثر بر ارزیابی عملکرد در صنعت آب و فاضلاب مؤثر کدام‌اند؟) اولویت تأثیر شاخص‌های مالی بر شاخص‌های سودآوری به‌ترتیب

عبارت‌اند از شاخص‌های فعالیت (۰/۸۸۹)، سرمایه‌گذاری (۰/۴۶۹)، سودآوری (۰/۳۱۰) و نقدینگی (۰/۱۱۵).

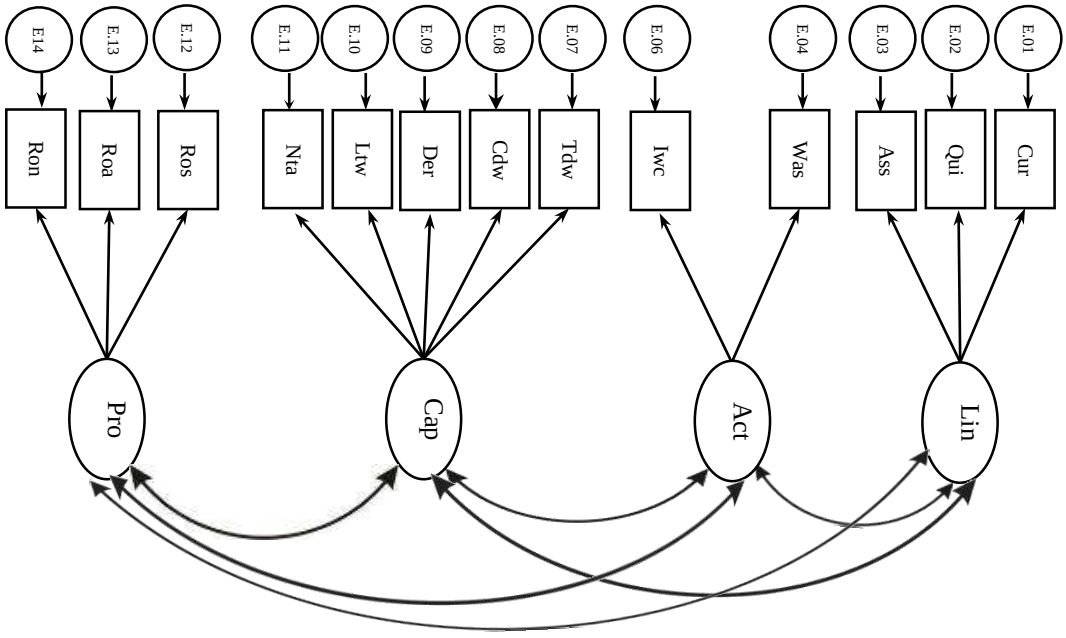
۱۰-۴- برازش مدل ثانویه (آزمون‌های نیکویی برازش)

برازش مدل، به آن معنی است که آیا مدل پیشنهادی، داده‌های پژوهش را نمایندگی می‌کند؟ درواقع، مدل مفهومی پژوهش توسط داده‌های تجربی حمایت می‌شوند؟ از منظر دانش آمار، معیارهای نیکویی برازش نشان می‌دهند که آیا مدل مفهومی پژوهش، قادر با بازتولید کوواریانس‌های قابل‌مشاهده در میان متغیرهای قابل‌مشاهده است یا خیر؟ در ادامه، نظر به گستردگی آزمون‌های نیکویی برازش، فقط به برخی از شاخص‌های بنیادین، مطابق جدول ۸ اشاره‌شده است.

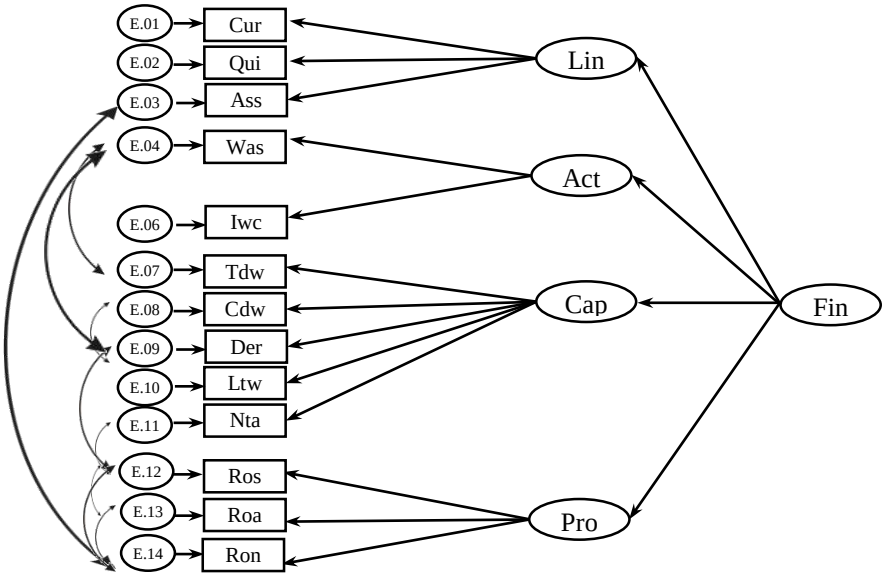
جدول ۸- نتایج آزمون‌های CMIN از شاخص‌های بنیادین برازش مدل‌های ساختاری

مدل	تعداد پارامترها	کای-دو	درجه آزادی	سطح معنی‌داری (P)	نسبت کای-دو به درجه آزادی
مدل پیش‌فرض	۳۳	۷۵۲۷	۸۷	۰/۰۰۰	۸۶/۵
مدل اشباع شده	۱۲۰	۰/۰۰۰	۰		
مدل استقلال	۱۵	۲۱۱۴۱	۱۰۵	۰/۰۰۰	۲۰۱/۳

در جدول ۸، مقدار ستون CMIN مقدار آزمون کای-دو است (۷۵۲۷) و (P) در این جدول سطح تحت پوشش آماره کای-دو (χ^2) است که مقدار آن صفر است. مقدار سطح معنی‌داری آزمون از سطح اطمینان α (۵ درصد) کم‌تر است، لذا در سطح اطمینان حداقل ۹۵ درصد اطمینان، مدل برازش مطلوبی را ارائه نمی‌دهد. مقدار کای مربع به‌هنجار (CMIN/DF) که ماحصل تقسیم مقدار کای مربع به درجه آزادی است و مقدار آن باید بین یک و دو باشد. نظر به این‌که مقدار آن کم است درنتیجه، انطباق داده‌های تجربی با مدل نظری مورد تأیید نیست. لذا باید با تعدیلاتی، مدل‌های اولیه و ثانویه پژوهش اصلاح شود (بازتعریف مدل)[۲۶] از شیوهای متداول، حذف متغیرهای قابل‌اندازه‌گیری است که سطح آزمون ضریب همبستگی و ضرایب رگرسیونی آن‌ها (بار عاملی) در سطح اطمینان قابل‌قبول (۹۵ درصد) بی‌معنی باشند. شیوهای دیگر، استفاده از نرم‌افزار AMOS$_{23}$ است. این نرم‌افزار قادر به ارائه اصلاحات مسیرهای رگرسیونی، ضرایب همبستگی بین متغیرهای پنهان و وابسته یا متغیرهای قابل‌اندازه‌گیری با متغیرهای مکنون و ارائه تأثیر تغییرات مقدار آماره کای-دو (χ^2)، سطح آزمون‌های نیکویی برازش برای بهبود است. لذا، در راستای اصلاح مدل پیشنهادی، از دستور (Modification Indices) در نرم‌افزار AMOS$_{23}$ استفاده‌شده که نتایج آن مطابق شکل‌های ۵ و ۶ است. نتیجه نهایی، شکل‌های ۵ و ۶ مدل میدانی و نهایی ارزیابی عملکرد مالی در صنعت آب و فاضلاب در راستای فرآیندهای متنوع مدیریتی است (هدف بنیادین پژوهش).



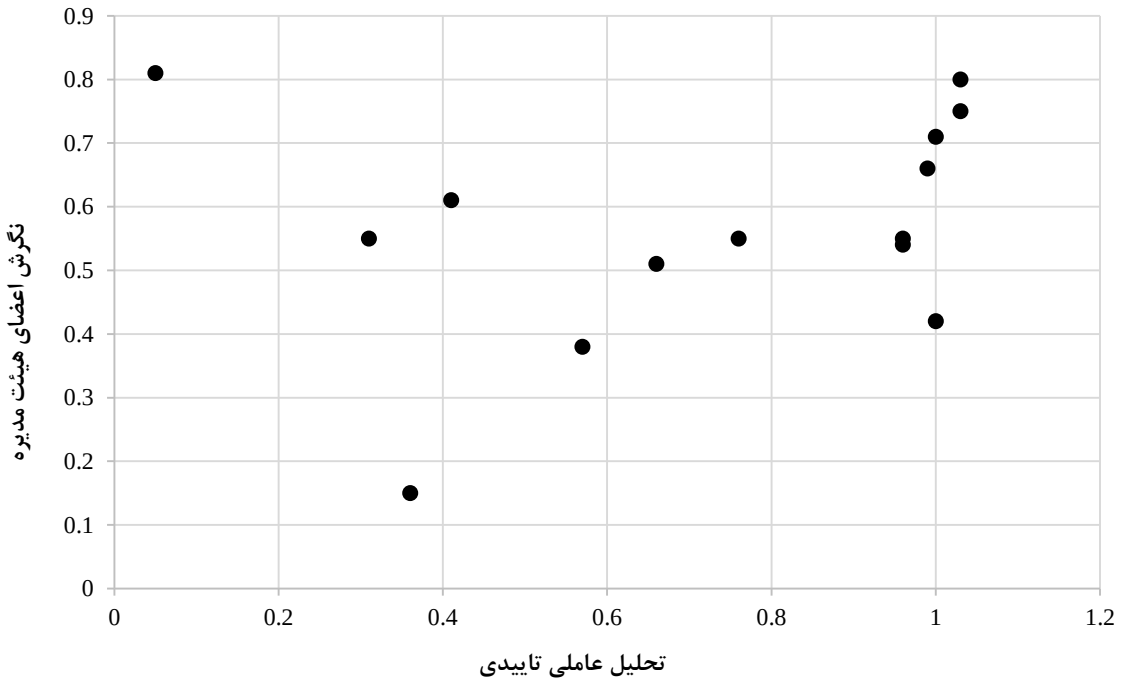
شکل ۵- مدل نهایی (میدانی) (اندازه‌گیری) ارتباط متقابل شاخص‌های ارزیابی عملکرد مالی



شکل ۶- مدل نهایی میدانی ثانویه (ساختاری) شناسایی تأثیر شاخص‌های مالی بر ارزیابی عملکرد مالی

۱۱- هم سنجی مدل

شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور هرساله در راستای ارزیابی عملکرد مالی شرکت‌های زیرمجموعه، تدوین راهبردهای بودجه‌ریزی عملیاتی، تدوین راهبردهای مالی و غیره اقدام به شناسایی وزن نسبی شاخص‌ها با رویکرد درجه و اهمیت هر شاخص از طریق نظرات مدیرعامل و اعضای هیئت مدیره (مجموعاً ۵ نفر) می‌کند. سپس، در راستای مقایسه وزن شاخص‌های مالی محاسبه‌شده با شیوه تحلیل عاملی تأییدی (جدول ۷) با وزن نسبی شاخص‌های ارزش‌گذاری شده توسط مدیرعامل و اعضای هیئت مدیره (جدول ۹) برای بررسی ارتباط بین آن‌ها از آزمون آماری و ضریب همبستگی اسپیرمن (رتبه‌ای) در بستر بسته نرم‌افزاری Minitab17.1 استفاده شد که نتایج آن هم‌سوی شکل ۷ است. بر پایه محاسبات انجام‌شده، ضریب همبستگی اسپیرمن میان دو شیوه، ۱۹/۹ درصد در سطح آزمون آماری معنی‌داری ۹۹ درصد است. این پدیده به‌روشنی گواه است که میان دو شیوه، ارتباط بسیار ضعیفی وجود دارد. اما شیوه نتایج ارزیابی با تحلیل عاملی تأییدی نظر به این‌که بر پایه اصول دانش ریاضی و آماری است، از قابلیت اطمینان بسیاری زیادی برخوردار است.



شکل ۷- نمودار همبستگی میان دو شیوه (تحلیل عاملی تأییدی و نگرش اعضای هیئت مدیره)

جدول ۹: ارزش وزن‌های مالی توسط مدیرعامل و اعضای هیات مدیره

شاخص	وزن (درصد)	شاخص	وزن (درصد)
جاری	۰/۷۵	بدهی جاری به ارزش ویژه	۰/۵۱
آنی	۰/۵۴	نسبت بدهی بلندمدت	۰/۶۶
دارایی‌های جاری	۰/۱۵	نسبت بدهی بلندمدت	۰/۷۱
گردش دارایی‌ها	۰/۵۵	نسبت مالکانه	۰/۵۵
دوره‌ی وصول مطالبات	۰/۸۱	بازدهی فروش	۰/۸۰
دارایی‌های ثابت به ارزش ویژه	۰/۵۵	بازدهی دارایی	۰/۳۸
کل بدهی به ارزش ویژه	۰/۴۲	بازدهی حقوق مالکانه	۰/۶۱

۱۲- بحث، تحلیل و پیشنهادها

درگذشته به دانشجویان حسابداری می‌آموختند، "حسابداری فن شناسایی، ثبت، طبقه‌بندی و گزارشگری فعالیت‌های مالی" است. امروزه نظر به تغییرات شتابان شرایط محیطی متنوع، دانش حسابداری حیطه فعالیت را مرزهای سنتی فراتر گذشته و به‌عنوان بخشی از سامانه اطلاعاتی مدیریت در مسیر فرآیندهای عملیاتی مدیریت مبدل شده است. متأسفانه برخی واحدهای نهادی، حجم انبوهی از اطلاعات را در بستر سامانه‌های مالی تولید می‌کنند، اما این اطلاعات از منظر مشخصه‌های ماهیت اطلاعات به‌موقع نبوده و نقش اثربخشی در فرآیند مدیریت ندارد. اطلاعات، در راستای استفاده مطلوب و اثربخش مدیریت، باید دارای ویژگی‌هایی باشند که برای ذی‌نفعان در راستای فعالیت‌های گوناگون انعطاف‌پذیر و مفید هستند. خصیصه‌های بنیادین مرتبط با محتوای اطلاعات، مربوط‌بودن و قابل‌اتکا بودن است و مدل‌های کمی و علمی در این زمینه بسیار کارآمدند. مطابق آن‌چه در این پژوهش انجام شد، موارد زیر متصور است:

- مطابق نتایج مدل اولیه که پس از محاسبات (جدول ۶) که منتج به شکل ۵ شد، این نتیجه حاصل می‌شود که بین بیش‌تر شاخص‌های ارزیابی مالی با یکدیگر همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح اطمینان قابل قبولی وجود دارد. لذا یکی از راهبردهای بلندمدت مدیریت ارشد در تدوین برنامه‌ها و سیاست‌های آتی توجه به میزان این ارتباط و سطح معنی‌داری آن‌ها است.

- ضرایب رگرسیونی مدل ثانویه (جدول ۷) نشان از درجه و اهمیت هر یک از گروه شاخص‌های ارزیابی عملکرد مالی دارد. لذا بیش‌ترین توجه مدیریت باید بر شاخص‌های فعالیت متمرکز شود، هرچند به‌دلیل بار عاملی ضعیف شاخص دوره، وصول مطالبات از این گروه شاخص در مدل حذف شد. در این خصوص توجه به شاخص دارایی‌های ثابت به ارزش ویژه بسیار حائز اهمیت است (بار عاملی). اهمیت این شاخص، به‌دلیل این است که بیش از ۹۲ درصد مجموع دارایی‌های صنعت آب و فاضلاب دارایی‌های ثابت است که این یکی از مشخصه‌های منحصر به‌فرد صنعت آب و فاضلاب در سطح بین‌المللی است. لذا مجموعه شرکت‌های آب و فاضلاب، باید فعالیت‌های زیر را برای ارتقای رتبه و پررنگ کردن اثربخشی این شاخص انجام بدهند:

- اطلاعات جدول ۷ که درواقع ماحصل نهایی پژوهش است، بار عاملی هریک از مغیرهای قابل‌اندازه‌گیری (شاخص‌ها) را نشان می‌دهد و مبنای مناسبی برای تدوین برنامه‌های راهبردی و کنترل مدیریت است که درواقع، نشان از نقش راهبردی اطلاعات قابل‌اطمینان در تصمیم‌گیری مدیریت است (این جدول، درواقع هسته بنیادین پژوهش برای مدیریت ارشد است).

- آفرینش ارزش و ثروت از وظایف بنیادین مدیریت است. نیل به این هدف‌ها، مستلزم تصمیم‌گیری‌های پرخطر در زمینه‌های گزینش انگاره‌های کسب و کار، تنظیم راهبردها، ایجاد تعادل بین سودآوری‌های کوتاه‌مدت و فواید بلندمدت، دل کندن از فرآورده‌ها و فرآیندهای کهنه و پذیرش نوآوری است. منابع مورد استفاده برای این‌گونه تصمیم‌گیری‌ها، اطلاعات قابل‌اطمینان است و مدل‌های کمی قادر به تولید این اطلاعات هستند. با رویکرد مدل‌های کمی متنوع مورداستفاده در این پژوهش، حجم بسیار گسترده‌ای از داده‌ها، به حجم اندکی از اطلاعات مفید و اثربخش در راستای فرآیند مدیریت ارشد تقلیل یافت.

- سیاست‌های مدیریتی شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور برپایه بهبود شاخص‌های ارزیابی عملکرد خواهد بود. لذا شرکت‌های آب و فاضلاب زیرمجموعه شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور باید فعالیت‌های زیر را برای ارتقای رتبه و پررنگ کردن اثربخشی این شاخص‌ها انجام دهند:

- واگذاری پروژه‌ها به پیمانکاران دارای صلاحیت و رتبه بالا از معاون نظارت و راهبردی ریاست جمهوری؛
- تکمیل دارایی‌های در جریان ساخت (به‌تقریب بهای این دارایی‌ها در صنعت ۲۱ درصد دارایی‌های ثابت است)؛
- مهندسی مجدد در سامانه‌های کنترل و مدیریت پروژه‌های

عمرانی به‌عنوان فرهنگ‌سازمانی؛

- بهره‌گیری از شیوه‌های تأمین مالی پروژه‌ها، نظیر مشارکت‌های بخش خصوصی و دولتی؛
- برنامه‌ریزی زمان‌بندی اجرای پروژه‌ها با توجه به محدودیت‌های منابع مالی از طریق مدل‌های بهینه یابی؛
- انجام مطالعات امکان‌سنجی اقتصادی، مالی، اجتماعی، محیط‌زیستی، سیاسی و فرهنگی قبل از اجرای پروژه‌ها؛
- نظر به این‌که بخش اعظمی از منابع سرمایه‌گذاری از محل اعتبارات دولتی تأمین می‌شود. لذا ایجاد تعامل با سایر دستگاه‌های اجرایی دولتی نظیر سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور الزامی است.

- بهره‌گیری از مدل‌های متنوع کمی در ارزیابی عملکرد مالی و سایر موارد مشابه و تبدیل حجم گسترده‌ای از داده‌های اولیه به اطلاعات مربوط و قابل‌اتکا با ضریب اطمینان زیاد، مستلزم دانش نظری و علمی فراوان و آشنایی با نرم‌افزارهای متنوع است. اما نتایج حاصله در راستای فرآیند مدیریت، هزینه‌های تدوین را توجیه می‌کند (منفعت – هزینه در اقتصاد مهندسی). لذا توصیه می‌شود، واحدهای نهادی از مدل‌های متنوع کمی در فرآیندهای عملیاتی به‌شکل نظام‌مند استفاده کنند.

۱۳- پی‌نوشت‌ها

1- Relativity
2- Benchmarking
3- Multiple Attribute Decision Making (MADM)
4- Technique for Order Preferneces by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)
5- Analytic Hierarchy Process (AHP)
6- Liquidty Ratio
7- Activity ratio
8- Capitalization Ratio
9- Profitability Ratio
10- Structural Equation Modeling (SEM)
11- Confirmatory Factor Analysis (CFA)
12- Maximum Likelihood
13- Least Squares
14- Organization, Business Processes (Obp)
15- Biased Result
16- Missing Data
17- Outliers Data
18- Anderson - Darling
19- Shapiro-Wilk
20- Cramer-Von Mises
21- Johnson Transformation
22- Running the Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) Test
23- Bartlett's Test
24- Analysis Moment Structures (AMOS)
۲۵- در وضعیت استاندارد شده، محاسبه ضرایب رگرسیونی و سایر محاسبات، پس از یکسان‌سازی واحد اندازه‌گیری متغیرهای قابل اندازه‌گیری با شیوه‌ی نرمالیزه، انجام می‌شود.
26- Model Re-Specification

۷- مراجع

ابارشی، ا.، و حسینی، ی.، (۱۳۹۱)، *مدل‌سازی معادلات ساختاری*، انتشارات جامعه شناسان، تهران.

پاینده نجف‌آبادی، ت.، و امیدی نجف‌آبادی، م.، (۱۳۹۴)، *تحلیل ساختاری تأییدی- معادله یابی معادلات ساختاری*، انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

خشایی، م.، و داودآبادی، م.، (۱۳۸۵)، "طراحی و استقرار نظام یکپارچه کنترل مدیریت در صنعت آب و فاضلاب"، *ششمین جشنواره شهید رجایی*، وزارت نیرو، تهران.

داودآبادی، م.، شالپوش، ش.، و نورالهزاده، ر.، (۱۳۹۹)، *شاخص‌های بنیادین ارزیابی عملکرد مالی صنعت آب و فاضلاب - تئوری تا عمل*، جلد اول، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.

داودآبادی، م.، شالپوش، ش.، و نورالهزاده، ر.، (۱۳۹۹)، *شاخص‌های بنیادین ارزیابی عملکرد مالی صنعت آب و فاضلاب - تئوری تا عمل*، جلد دوم، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.

داودآبادی، م.، و قناد، م.، (۱۳۹۲)، *راهنمای جامع مدیریت مالی و اقتصاد صنعت آب و فاضلاب (به‌همراه تحلیل مؤلفه‌های مالی و اقتصادی – از تئوری تا عمل)*، انشارات موسسه فرهنگی هنری پویه مهر اشراق.

داودآبادی، م.، و راه‌پیما، ع.م.، (۱۴۰۰)، "ارزیابی عملکرد شاخص‌های مالی صنعت آب و فاضلاب شهری با تأکید براندازه شرکت، رویکرد مدل تحلیل پوششی داده‌ها"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۶(۲)، ۵۰-۵۷، https://doi:10.22112/jwwse.2021.259618.1229.

ربیعی، ب.، و محیط، ا.، (۱۳۹۲)، *تجزیه و تحلیل طرح‌های آزمایشی در پژوهش‌های کشاورزی (با تأکید بر نرم‌افزار SAS)*، انتشارات دانشگاه گیلان.

فرید، ا.، (۱۳۹۸)، *مدل‌سازی معادلات ساختاری در داده‌های پرسشنامه‌ای با نرم‌افزار AMOS22*، انتشارات مهرگان قلم، تهران.

کلامی، ع.ح.، مهرانی، ه.، سعیدی، پ.، و عباسی، ا.، (۱۴۰۱)، "شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر بازاریابی اجتماعی در حوزه صنعت آب و فاضلاب کشور"، *آب و توسعه پایدار*،

۹(۱)، ۵۳-۶۰، https://doi:10.22067/jwsd.v9i1.2111.1094.

گلی آیسک، م.، و دهدار، ف.، (۱۳۹۶)، "ارزیابی عملکرد مالی صنعت آب و فاضلاب شهری براساس مدل BSC"، *آب و فاضلاب*، ۲۸(۱)، ۳۱-۴۱، https://doi: 10.22093/wwj.2017.39472.

شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، پایگاه الکترونیکی اطلاع‌رسانی (http://www.nww.ir)، زمان مشاهده: ۱۳۹۹.

شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور (۱۳۹۸)، "سالنامه آماری شاخص‌های ارزیابی عملکرد مالی صنعت آب و فاضلاب سال ۱۳۹۷"، معاونت برنامه‌ریزی و امور اقتصادی، تهران.

نظری‌پور، م.، (۱۴۰۰)، "حسابداران و افزایش بهره‌وری آب: تحلیل عاملی اکتشافی و تأییدی"، *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۷(۳)، ۲۱۵-۲۳۰، https://doi:20.1001.1.17352347.1400.17.3.12.7.

نمازی، م.، و مصلی‌نژاد، آ.، (۱۴۰۰)، "شاخص‌های حسابداری مدیریت آب: رهیافت فراترکیب و فن ارزیابی متوازن"، *تحقیقات حسابداری و حسابرسی*، ۱۳(۴۹)، ۵-۳۰، https://doi:10.22034/iaar.2021.131565.

González-García, H., Francke, H., Huenges., E., and Sass, I., (2023). "Financial performance analysis of the geothermal power station of Los Humeros, Mexico", *Geothermics*, 112(2023), 102745, https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102745.

Mollaalizadeh Zavardehiaa, S., Shiarbahadori, M. and Mahmoodirad, A. (2021). "A comprehensive structural equation modeling for financial performance evaluation of petrochemical companies", *Petroleum Business Review*, 5(2), 37-58, https://doi.org/10.22050/pbr.2021.273756.1167.

Tehrani, R., Mehragan, M.R., and Golkani, M.R. (2012), "A model for evaluating financial performance of companies by data envelopment analysis: A case study of 36 corporations affiliated with a private organization", *International Business Research*, 5(8), 8. https://doi.org/10.5539/ibr.v5n8p8.

Wang, H., Bhattacharjee, S., Kausar, N., Mohammadzadeh, A., Pamucar, D., and Al Din Ide, N., (2023), "Financial performance assessment by a Type-2 Fuzzy Logic approach", *Mathematical Problems in Engineering*, 2023(1), 5926169, https://doi.org/10.1155/2023/5926162.

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

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 10, No. 1, PP. 19-29, Spring 2025
DOI: 10.22112/jwwse.2023.404414.1368

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال دهم، شماره ۱، صفحات ۱۹-۲۹، بهار ۱۴۰۴

Research Paper

Locating the Average Pressure Zone Point in Water Distribution Networks through Hydraulic Analysis

Reza Moasheri[1] and Mohammadreza Jalili Ghazizadeh[2*]

1- Ph.D., Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2- Associate Professor Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
*Corresponding Author, Email: m_jalili@sbu.ac.ir

Received: 28/06/2023
Revised: 04/09/2023
Accepted: 26/09/2023

Abstract

Monitoring Water Distribution Networks (WDNs) often involves pressure metering, but determining the optimal placement of pressure sensors and accurately calculating the average pressure remains a challenge. To address this, it is crucial to measure pressure at the Average Zone Point (AZP) in the field. However, conventional methods for AZP determination can introduce significant errors. This paper introduces a novel method for AZP determination in WDNs. The approach transforms the existing WDN into a graph and assigns edge weights based on pipe energy loss. By employing Dijkstra's algorithm and a new cost function, the optimal AZP location is identified. This method was applied to two reference networks, Hanoi and modified Poulakis, yielding promising results. Pressure measurements obtained through this method more accurately represent the network's average pressure, with an absolute error of less than 0.5% for the studied networks. Moreover, this approach significantly reduces errors compared to conventional methods, achieving an error reduction of over 93%. This innovative method holds great potential for adoption by water and wastewater companies.

Keywords: Water Distribution Networks, Average Pressure, Average Zone Point, Dijkstra Algorithm, Graph Theory.

مقاله پژوهشی

مکان‌یابی نقطه میانگین ناحیه فشاری در شبکه‌های توزیع آب بر اساس تحلیل هیدرولیکی

رضا معاشری[۱] و محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده[۲*]

۱- دانش‌آموخته دکترای تخصصی، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۲- دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
*نویسنده مسئول، ایمیل: m_jalili@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۷
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۶/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۴
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

یکی از اقدامات موجود در زمینه پایش شبکه‌های توزیع آب، فشارسنجی است. اما تعیین اولویت مکانی حسگرهای فشار و روش کاربردی تعیین مقدار فشار متوسط، همواره موردسوال است. برای دستیابی به این هدف، باید در نقطه میانگین ناحیه (AZP)، فشارسنجی میدانی انجام شود. به‌کارگیری روش‌های متعارف برای استخراج چنین نقطه‌ای، می‌تواند خطای زیادی ایجاد کند. در این مقاله، روشی برای تعیین نقطه میانگین ناحیه در شبکه‌های توزیع آب پیشنهاد شده است. در این روش، شبکه موجود به یک گراف تبدیل شده و تخصیص وزن به یال‌های آن، براساس مقدار افت انرژی لوله‌ها، صورت می‌گیرد. سپس با استفاده از الگوریتم دایکسترا و با تعریف تابع هزینه‌ای که در این مطالعه برای نخستین بار مطرح شده است، مکان‌یابی بهینه AZP انجام می‌شود. روش پیشنهادی بر روی دو شبکه مرجع (هانوی و پولاکیس اصلاح‌شده)، پیاده‌سازی شد. نتایج نشان داد که فشار نقاط انتخابی با این فرآیند، می‌تواند نماینده بهتری برای فشار متوسط باشد؛ به‌صورتی که قدرمطلق خطای فشار متوسط برآوردشده در شبکه‌های موردمطالعه، کمتر از ۰/۵ درصد بود. استفاده از چنین رویکردی سبب شد که خطای ناشی از به‌کارگیری روش متعارف در خصوص برآورد پارامتر مذکور، بالغ بر ۹۳ درصد کاهش یابد. روش پیشنهادی می‌تواند مورد استفاده شرکت‌های آب و فاضلاب قرار گیرد.

کلمات کلیدی: شبکه‌های توزیع آب، فشار متوسط، نقطه میانگین ناحیه، الگوریتم دایکسترا، تئوری گراف.

۱- مقدمه

شبکه‌های توزیع آب، به‌عنوان یکی از عناصر مهم زیرساخت‌های عمرانی هر کشوری تلقی می‌شوند که وظیفه مهم تأمین نیازهای آبی مشترکین را به‌عهده دارند (Yang and Wang, 2023). درواقع هدف اصلی یک شبکه توزیع آب، تحویل آب به جمعیت تحت پوشش خود، با کیفیت، کمیت و فشار قابل‌قبول است (Ferreira et al., 2023). این شبکه‌ها علاوه‌بر تأثیر در سلامت بهداشت، در ساختارهای اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی جوامع نیز اثرگذار هستند (صالحی و همکاران، ۱۳۹۷) و به‌همین دلیل، باید ازلحاظ ایمنی و عملکرد بهینه، مورد پایش و کنترل قرارگیرند (Peng et al., 2022). پایش هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب به‌دلیل اثرگذاری در کمیت آب تحویلی به مصرف‌کنندگان، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است؛ از سوی دیگر، وضعیت هیدرولیکی شبکه‌های مذکور تأثیر مستقیمی بر کیفیت آب عبوری از خطوط لوله دارند. در این راستا، جانمایی محل حسگرهای فشار از اهمیت به‌سزایی برخوردار بوده و به‌همین دلیل توجه پژوهشگران مختلفی را به‌خود جلب کرده است. به‌همین دلیل، مطالعات متعددی در این زمینه، طی سال‌های اخیر انجام شده است.

Cao et al. (2019) مکان‌یابی حسگرها را به‌منظور نشان‌دادن الگوهای فشاری مختلف در مناطق همگن یک شبکه توزیع آب انجام دادند. Simone et al. (2016) مکان‌یابی حسگرهای فشار را براساس تجزیه و تحلیل توپولوژیکی شبکه پیشنهاد دادند. در روش مذکور، یک شبکه توزیع آب به چندین پهنه مجزا تقسیم می‌شود و یک حسگر فشار در مرکز هر پهنه قرار می‌گیرد. Klapcsik et al. (2018) با استفاده از تئوری گراف، یک شبکه توزیع آب را به چندین زیر بخش تقسیم نموده و در ادامه برای هر زیر بخش، یک یا چندین حسگر مکان‌یابی کردند. Meier and Barkdoll (2000) آرایش حسگرها را به مسئله بهینه‌سازی تبدیل کرده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA[1]) جانمایی بهینه آن‌ها را پیدا کردند. Ferreira et al. (2023) مکان‌یابی حسگرهای فشار در یک شبکه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II[2]) و با تنظیم مناسب پارامترهای آن، انجام دادند.

در برخی پژوهش‌ها، جانمایی حسگرهای فشاری با هدف (اهداف) خاصی نظیر افزایش کارایی روش‌های مبتنی بر مدل در موضوع نشت‌یابی یا تعیین محل حوادث صورت گرفته است. به‌عنوان‌مثال، Ferreira et al. (2021, 2022) یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه را برای تعیین تعداد و محل بهینه حسگرهای فشاری با درنظرگیری کالیبراسیون مدل هیدرولیکی و شناسایی حوادث لوله‌ها توسعه دادند. همان‌طور که پیش‌تر مطرح شد، تاکنون پژوهش‌های مختلفی در این زمینه انجام شده است. اما موضوع مهمی که کمتر به آن توجه شده، پارامتر فشار متوسط شبکه است؛ پارامتری که در محاسبات تعادل آبی شبکه‌های توزیع آب، برآورد شاخص‌های عملکردی و کالیبراسیون مدل‌های هیدرولیکی موردنیاز است. هم‌چنین از آن‌جایی که لوله‌ها، یکی از اجزای اساسی شبکه‌های توزیع آب محسوب می‌شوند، طراحی یک برنامه مناسب برای بازسازی و نوسازی آن‌ها از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. پارامتر فشار متوسط شبکه در نتایج انجام این فرآیند برای چنین دارایی‌های ارزشمندی، تأثیر مهمی دارد (صالحی و همکاران، ۱۳۹۷؛ Salehi et al., 2022).

در پهنه‌های مدیریت‌شده فشاری (PMZ[3]) یا نواحی مجزای اندازه‌گیری‌شده (DMAs[4])، فشار معمولاً در نقطه بحرانی (دارای حداقل فشار ممکن) و هم‌چنین در نقطه ورودی، اندازه‌گیری می‌شود. ولی موضوع قابل‌توجه، ضرورت تعیین یک نقطه میانگین ناحیه (AZP[5]) برای هر پهنه/ناحیه است. این نقطه برای اندازه‌گیری فشار متوسط شبانه ناحیه (AZNP[6]) نیز مناسب است. نقطه میانگین ناحیه (AZP) یک موقعیت فیزیکی (معمولاً یک شیر آتش‌نشانی) است که فشار در این نقطه می‌تواند نماینده فشار متوسط پهنه در زمان‌های مختلف (ساعتی، روزانه و فصلی) باشد (Lambert, 2013). به‌عبارت‌دیگر، نقطه میانگین ناحیه (AZP)، نقطه‌ای است که فشار یک ناحیه مجزا یا پهنه مدیریت‌شده فشاری در آن اندازه‌گیری شده و به‌عنوان میانگین تمام فشارهای آن ناحیه درنظر گرفته می‌شود (M36, 2016). لازم‌به ذکر است که مشاوران و بهره‌برداران شرکت‌های آب و فاضلاب معمولاً از یک روش سنتی (متعارف) برای تخمین نقطه میانگین ناحیه (AZP) استفاده می‌کنند؛ ولی نتایج حاکی از آن است، فشار نقطه‌ای که با چنین روشی مکان‌یابی شده است، می‌تواند خطای بسیار زیادی نسبت به فشار متوسط واقعی شبکه موردبررسی داشته باشد. به‌همین دلیل در این مقاله، یک فرآیند مبتنی بر تحلیل هیدرولیکی و با استفاده از تئوری گراف، برای تعیین نقطه میانگین ناحیه (AZP) در شبکه‌های توزیع آب پیشنهاد شده است.

۲- مواد و روش انجام کار

در این قسمت ابتدا روش سنتی تعیین نقطه میانگین ناحیه (AZP) شرح داده شده و سپس روش پیشنهادی برای تعیین چنین نقطه‌ای در یک شبکه توزیع آب توضیح داده می‌شود.

۲-۱- روش سنتی تعیین نقطه‌ی میانگین ناحیه (AZP)

روش سنتی برای تعیین نقطه AZP در هر پهنه فشاری از یک شبکه توزیع آب، از گام‌های زیر تشکیل می‌شود (Lambert, 2013):

گام اول: محاسبه تراز ارتفاعی متوسط وزنی (WAGL[7]) برای یک پارامتر مناسب زیربنایی (معمولاً تعداد انشعابات مشترکین، طول خطوط اصلی یا تعداد شیرهای آتش‌نشانی). تراز ارتفاعی متوسط وزنی (WAGL) ترازی است که ارتفاع آن برابر ارتفاع نقطه میانگین ناحیه (AZP) است. روش‌های محاسبه تراز ارتفاعی متوسط وزنی بر مبنای وزن دهی به یک پارامتر مناسب زیربنایی شبکه بوده و شامل روش‌های مبتنی بر تعداد انشعابات (یا تعداد کنتورها)، تعداد شیرهای آتش‌نشانی و یا طول خطوط اصلی است. از طرفی با استفاده از سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی(GIS[8]) یا سامانه‌ی موقعیت‌یاب جهانی (GPS[9]) می‌توان تراز ارتفاعی هر انشعاب (در کنتور مشترکین) و/یا شیرهای آتش‌نشانی را تعیین نمود. داده‌های به‌دست‌آمده، سپس برای تعیین تراز ارتفاعی متوسط وزنی برای نوع انتخاب‌شده از پارامترهای زیربنایی ناحیه استفاده می‌شود. این روش چون نیازمند ارتفاع‌دهی و انجام عملیات مکان‌یابی و GPS است، نیازمند صرف زمان و هزینه بوده و ممکن است همیشه در دسترس نباشد. درعین‌حال درصورت وجود داده‌های کافی بهترین و دقیق‌ترین روش برای تعیین تراز ارتفاعی متوسط وزنی است (Lambert, 2013). از سوی دیگر، با توجه به این‌که در شبکه‌های کنونی عمدتاً اطلاعات مکانی مربوط به کنتورهای مشترکین و رقوم ارتفاعی آن‌ها در دسترس است، تراز ارتفاعی متوسط وزنی (WAGL) هر پهنه فشاری را می‌توان به‌صورت میانگین وزنی تراز ارتفاعی اشتراک‌های آن پهنه به‌دست آورد. بدین منظور از رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$WAGL_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} z_{i,j}.P_{i,j}}{\sum_{j=1}^{n} P_{i,j}} \qquad (۱)$$

که $WAGL_i$: تراز ارتفاعی متوسط وزنی پهنه فشاری i ام، $z_{i,j}$: تراز ارتفاعی اشتراک j ام پهنه فشاری i ام و $P_{i,j}$: تعداد جمعیت تحت پوشش اشتراک j ام پهنه فشاری i ام هستند.

گام دوم: انتخاب یک شیر آتش‌نشانی مناسب در نزدیکی مرکز پهنه دارای تراز ارتفاعی به‌دست‌آمده از گام اول

گام سوم: به دست آوردن فشار در AZP با اندازه‌گیری مستقیم یا ارزیابی غیرمستقیم

گام چهارم: ثبت محاسبات و روش‌های استفاده‌شده.

۲-۲- روش پیشنهادی برای تعیین نقطه میانگین ناحیه (AZP)

طبق تعریف، نقطه میانگین ناحیه (AZP)، نقطه‌ای است که فشار آن نقطه برابر فشار متوسط شبکه است. چنان‌چه نقطه‌ای یافته شود که بزرگی مجموع اختلاف فشار آن نقطه تا نقاط دیگر شبکه کمینه باشد، این نقطه همان نقطه میانگین ناحیه خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر، نقطه i، برابر نقطه میانگین ناحیه است؛ اگر رابطه (۲) به‌ازای آن کمینه شود.

$$Cost_i = |\sum_{j=1}^{N}((Z_i - Z_j) + \Delta E_{i-j})| \qquad (۲)$$

که $Cost_i$: مقدار تابع هزینه (متر) به‌ازای درنظرگیری گره i ام به‌عنوان AZP، N: تعداد کل گره‌های شبکه و Z_i و Z_j: به‌ترتیب رقوم ارتفاعی (متر) گره i ام و گره j ام هستند. لازم به ذکر است که در این رابطه، از ترم‌های سرعت به‌دلیل ناچیز بودن آن‌ها صرف‌نظر شده است.

ترم ΔE_{i-j} (متر) در رابطه (۲) برابر مجموع افت‌های اصطکاکی ($h_{f,i-j}$) و افت‌های موضعی ($h_{m,i-j}$) مسیر گره i تا گره j بوده و به‌صورت رابطه (۳) قابل‌بیان است (Trifunovic, 2006).

$$\begin{aligned}\Delta E_{i-j} = h_{f,i-j} + h_{m,i-j} \\ = R_f Q^{n_f}|_{"i" \, to \, "j} \\ + R_m Q^{n_m}|_{"i" \, to \, "j}\end{aligned} \qquad (۳)$$

که R_f: بیانگر مقاومت لوله با قطر D و طول L، در حد فاصل گره i تا گره j است. پارامتر R_m را می‌توان به‌عنوان مقاومت در سطح مقطع لوله ذکرشده، جایی که در آن انسداد اتفاق افتاده است، تعریف نمود. Q: دبی عبوری از این لوله بوده و توان‌های n_f و n_m نیز بستگی به نوع معادله افت به‌کار برده‌شده دارند.

رویکرد استفاده‌شده برای محاسبه مقدار تابع هزینه (رابطه (۲)) در روش پیشنهادی به شرح زیر است (شکل ۱):

گام اول: در ابتدا باید مدل هیدرولیکی شبکه موجود با استفاده از داده‌های جدید موردنیاز، ساخته شود. درصورت وجود مدل هیدرولیکی از شبکه مورد مطالعه، فرآیند کالیبراسیون باید به‌منظور تطبیق هرچه بیشتر مدل با واقعیت آن، پیاده‌سازی شود؛

گام دوم: تبدیل مدل هیدرولیکی شبکه آب موجود به گرافی وزن‌دار، متشکل از مجموعه‌ای از یال‌ها (لوله‌ها) و رأس‌ها (گره‌ها)؛

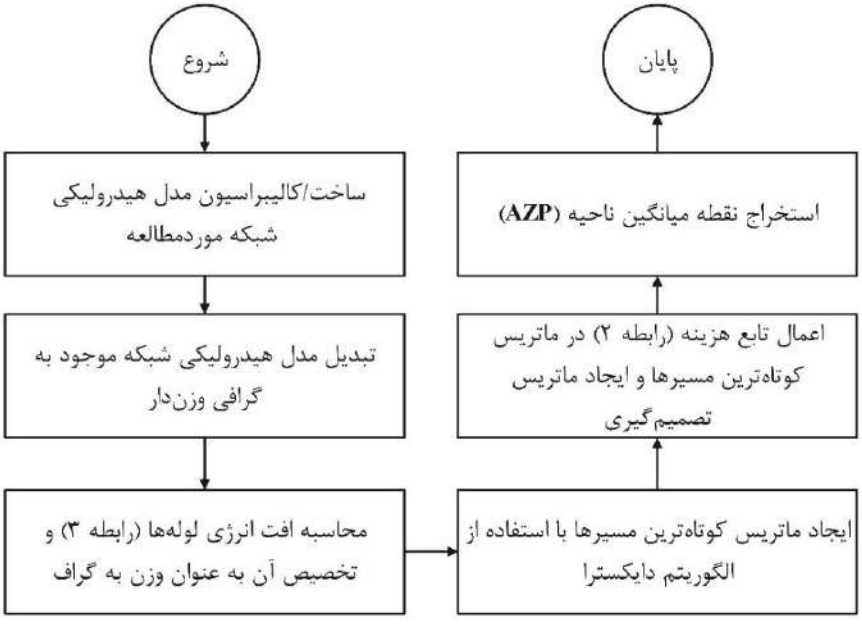
گام سوم: محاسبه رابطه (۳) برای هر یال موجود و تخصیص آن

به‌عنوان وزن به گراف حاصل‌شده؛

گام چهارم: محاسبه ماتریس کوتاه‌ترین مسیرها در گراف تهیه‌شده: بدین منظور ماتریسی به ابعاد N*N (که در آن N برابر تعداد کل گره‌های شبکه یا تعداد کل رئوس گراف موجود است) حاصل خواهد شد. در ادامه، کوتاه‌ترین مسیر از رأس اول تا رأس اول (که طول آن برابر صفر است)، از رأس اول تا رأس دوم، از رأس اول تا رأس سوم و به‌همین صورت از رأس اول تا رأس N ام، استخراج شده، مجموع جبری وزن یال‌های هر مسیر محاسبه و مقادیر آن‌ها به عنوان طول آن مسیر، در ستون اول ماتریس تشکیل‌شده قرار می‌گیرد. سپس این فرآیند برای رأس دوم تا هر یک از رئوس شبکه، انجام و نتایج آن در ستون دوم ماتریس مذکور قرار می‌گیرد. درنهایت به‌صورت مشابه، کوتاه‌ترین مسیر از رأس Nام تا رأس اول، از رأس N ام تا رأس دوم، از رأس N ام تا رأس سوم و در نهایت از رأس N ام تا رأس N ام (که طول آن برابر صفر است)، یافته‌شده و مقادیر متناظر با وزن یال‌های آن مسیرها بعد از برآورد، در ستون آخر همین ماتریس قرار می‌گیرد. ماتریس مذکور، "ماتریس کوتاه‌ترین مسیرها" نامیده می‌شود. برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین هر دو رأس این گراف از الگوریتم دایکسترا[10] استفاده می‌شود که جزئیات آن در قسمت‌های دیگر آورده شده است.

گام پنجم: مقدار تابع هزینه (رابطه (۲)) برای هر یک از ستون‌های "ماتریس کوتاه‌ترین مسیرها" محاسبه می‌شود. نتایج محاسبات در ماتریسی تحت‌عنوان "ماتریس تصمیم‌گیری" ذخیره می‌شود. این ماتریس به‌صورت 1*N خواهد بود که در آن N برابر تعداد کل گره‌های شبکه است.

گام ششم: گره متناظر با شماره‌ای از "ماتریس تصمیم‌گیری" که کمترین مقدار تابع هزینه (رابطه (۲)) را دارد، به‌عنوان نقطه میانگین ناحیه انتخاب شده و فشار متناظر با آن به‌عنوان فشار متوسط شبکه درنظر گرفته می‌شود.



شکل ۱- روندنمای روش پیشنهادی برای تخمین نقطه میانگین ناحیه (AZP) در شبکه‌های توزیع آب

۲-۲-۱- الگوریتم دایکسترا

گراف‌ها، ساختارهای گسسته‌ای متشکل از رئوس (رأس‌ها) و یال‌هایی هستند که این رئوس را به‌هم متصل می‌کنند. انواع مختلفی از گراف‌ها، بسته به این‌که آیا یال‌ها جهت‌دار هستند یا خیر، آیا چندین یال می‌توانند یک جفت از رئوس را به هم وصل کنند یا خیر، حلقه در گراف مجاز است یا خیر و غیره، وجود دارند. تقریباً مشکلات موجود در هر رشته‌ای قابل‌تصوری را می‌توان با استفاده از مدل‌های گراف حل نمود. یک گراف به‌صورت $G = (V, E)$ تعریف می‌شود که در آن V یک مجموعه غیر تهی از رئوس (یا گره‌ها) و E یک مجموعه از یال‌ها است. هر یال، یک یا دو رأس مربوط به خود دارد که نقاط پایانی آن یال تعریف می‌شود (Rosen, 2011).

۲-۲-۱-۱- تئوری الگوریتم دایکسترا

مسئله یافتن کوتاه‌ترین مسیر، در یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین رئوس یک گراف استفاده می‌شود. محاسبات کوتاه‌ترین مسیر را

می‌توان به شکل‌های مختلفی دسته‌بندی نمود؛ از قبیل: مسئله کوتاه‌ترین مسیر تک چشمه[11]، مسئله کوتاه‌ترین مسیر تک جفت[12]، مسئله کوتاه‌ترین مسیر تک مقصد[13]، مسئله کوتاه‌ترین مسیر همه جفت‌ها[14] و غیره. به‌صورت گسترده، الگوریتم دایکسترا در یافتن کوتاه‌ترین مسیر تک چشمه استفاده‌شده و کاربرد زیادی در حوزه‌های متعددی از قبیل مسیریابی دارد؛ به‌عنوان‌مثال می‌تواند کوتاه‌ترین فاصله بین دو مکان دلخواه را پیدا کند (Parekh et al., 2022).

به‌صورت کلی، الگوریتم‌های مختلفی برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین دو رأس در یک گره وزن‌دار وجود دارد. اما می‌توان اذعان کرد که در میان تمام الگوریتم‌هایی که برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین رئوس یک گراف پیشنهاد شده‌اند، الگوریتم دایکسترا، احتمالاً کارآمدترین آن‌هاست. این الگوریتم می‌تواند عملیات پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر از یک شهر دلخواه (که به‌عنوان گره آغازین یا گره شروع نامیده می‌شود) به دیگر شهرهای یک شبکه را به‌صورت مؤثری انجام دهد (Maw et al., 2019). این الگوریتم توسط یک ریاضیدان هلندی به نام Edsger W. Dijkstra در سال ۱۹۵۹ میلادی معرفی شد (Rosen, 2011). الگوریتم دایکسترا می‌تواند بهینه‌ترین مسیرها را پیدا کند؛ به‌عبارت‌دیگر، صحت انتخاب کوتاه‌ترین مسیر در یک گراف، توسط این الگوریتم برابر ۱۰۰ درصد است (Zhou and Gao, 2019). به‌همین دلیل الگوریتم مذکور در پژوهش‌های مختلفی در سال‌های اخیر مورداستفاده قرار گرفته و نتایج رضایت‌بخشی حاصل شده است (Bahrami and Siadatmousavi, 2023؛ Peng et al., 2023؛ Khakzad, 2023؛ Ubaidillah and Sukri, 2023؛ Bai et al., 2023؛ Salem et al., 2022؛ Al Hakim et al., 2022؛ Kim et al., 2022؛ Ahdan and Setiawansyah, 2021؛ Perkowski and Tatara, 2020).

الگوریتم دایکسترا، به یافتن طول کوتاه‌ترین مسیر از a تا رأس اول، طول کوتاه‌ترین مسیر از a تا رأس دوم و ... ادامه می‌دهد تا طول کوتاه‌ترین مسیر موجود بین a تا z را پیدا کند. درنتیجه این الگوریتم می‌تواند نه‌تنها کوتاه‌ترین مسیر a تا z، بلکه طول کوتاه‌ترین مسیر از a تا تمام رئوس یک گراف را نیز پیدا کند. این الگوریتم مبتنی بر یک سری تکرار است. یک مجموعه متمایز از رئوس با اضافه کردن یک رأس در هر تکرار ساخته می‌شود. یک رویکرد برچسب‌دار در هر تکرار انجام می‌گیرد. در این رویکرد برچسب‌دار، رأس w با طول کوتاه‌ترین مسیر از a تا w برچسب‌گذاری می‌شود که شامل تنها رأس‌هایی است که در مجموعه متمایز وجود دارند. این رأس که دارای حداقل برچسب در میان رئوسی است که در مجموعه متمایز حضور ندارند، به مجموعه متمایز ذکرشده اضافه می‌شود. این جزئیات موجود در الگوریتم دایکسترا است. این الگوریتم با برچسب‌گذاری a با عدد صفر و دیگر رئوس با ∞ آغاز می‌شود. در این خصوص از نشانه‌گذاری $L_0(a) = 0$ و $L_0(v) = \infty$ برای این برچسب‌ها قبل از هرگونه تکراری استفاده می‌شود (به‌صورت استاندارد، زیرنویس 0 بیانگر صفر امین تکرار است). این برچسب‌ها، طول کوتاه‌ترین مسیر از a تا رأس‌های دیگرند که شامل تنها رأس a هستند (به‌دلیل آن‌که هیچ مسیر دیگری از a تا رأس دیگری غیر از a وجود دارد، طول کوتاه‌ترین مسیر از a تا بقیه رئوس در این تکرار، برابر بی‌نهایت درنظر گرفته می‌شود).

الگوریتم دایکسترا، با تشکیل یک مجموعه متمایز از رئوس ادامه می‌دهد. در این خصوص S_k نمایانگر این مجموعه بعد از k تکرار رویکرد برچسب‌گذاری است. در شروع $S_0 = \emptyset$ است. مجموعه S_k از مجموعه S_{k-1} و اضافه کردن یک رأس u که در مجموعه S_{k-1} وجود نداشته و دارای کوچک‌ترین برچسب است، تشکیل می‌شود. هنگامی‌که u به مجموعه S_k اضافه می‌شود، برچسب تمام رئوسی که در مجموعه S_k قرار ندارند، به‌روزرسانی می‌شود؛ به‌دلیل آن‌که $L_k(v)$ (برچسب رأس v در تکرار k ام)، برابر طول کوتاه‌ترین مسیر از رأس a به رأس v بوده که تنها شامل رئوسی است که در مجموعه S_k وجود دارند. توجه شود روشی که در خصوص اضافه کردن رأس u به مجموعه S_k در هر تکرار انتخاب می‌شود، یک انتخاب بهینه در هر مرحله است و سبب می‌شود این یک الگوریتم حریصانه باشد (می‌توان اثبات کرد که این الگوریتم حریصانه، همیشه یک راه‌حل بهینه تولید می‌نماید). درنظر بگیرید که v شامل رأسی است که در مجموعه S_k وجود ندارد. برای به‌روزرسانی برچسب v، باید توجه کرد که $L_k(v)$ برابر طول کوتاه‌ترین مسیر از رأس a تا رأس v است (به‌طوری‌که تنها شامل رئوس موجود در مجموعه S_k است). عمل به‌روزرسانی برچسب‌ها می‌توان به شیوه کارآمد ذیر صورت گیرد: کوتاه‌ترین مسیر از رأس a تا رأس v شامل رئوسی که تنها در مجموعه S_k هستند، یا شامل کوتاه‌ترین مسیر از a تا v شامل المان‌های مجموعه S_{k-1} (که شامل رئوس متمایز غیر از رأس u است) بوده یا این مسیر برابر کوتاه‌ترین مسیر از رأس a تا رأس u در مرحله (k-1) ام به‌علاوه یال $\{u , v\}$ است (رابطه (۴)).

$$L_k(a,v) = \min\{L_{k-1}(a,v), L_{k-1}(a,u) + w(u,v)\}, \quad (۴)$$

که $w(u,v)$: برابر طول یال با نقاط انتهایی u و v است. این رویکرد با افزودن متوالی رئوس به مجموعه متمایز تا زمانی که z به

مجموعه مذکور اضافه شود، ادامه می‌یابد و برچسب آن بیانگر طول کوتاه‌ترین مسیر a تا z است. باید توجه داشت که اگر این رویکرد تا اضافه شدن کلیه رأس‌ها در مجموعه متمایز ادامه پیدا کند، می‌توان طول کوتاه‌ترین مسیر از رأس a تا تمام رئوس آن گراف را پیدا کرد (Rosen, 2011). شبه کد این الگوریتم در شکل ۲ آورده شده است.

procedure *Dijkstra*(*G*: weighted connected simple graph, with
all weights positive)
{*G* has vertices $a = v_0, v_1, \ldots, v_n = z$ and lengths $w(v_i, v_j)$
where $w(v_i, v_j) = \infty$ if $\{v_i, v_j\}$ is not an edge in *G*}
for $i := 1$ **to** n
$L(v_i) := \infty$
$L(a) := 0$
$S := \varnothing$
{the labels are now initialized so that the label of *a* is 0 and all
other labels are ∞, and *S* is the empty set}
while $z \in S$
$u :=$ a vertex not in *S* with $L(u)$ minimal
$S := S \cup \{u\}$
for all vertices *v* not in *S*
if $L(u) + w(u, v) < L(v)$ **then** $L(v) := L(u) + w(u, v)$
{this adds a vertex to *S* with minimal label and updates the
labels of vertices not in *S*}
return $L(z)$ {$L(z)$ = length of a shortest path from *a* to *z*}

شکل ۲- شبه کد الگوریتم دایکسترا (Rosen, 2011)

۲-۲-۱-۲- پیچیدگی محاسباتی و زمانی الگوریتم دایکسترا

در خصوص پیچیدگی محاسباتی الگوریتم دایکسترا می‌توان بیان نمود که این الگوریتم بیشتر از $n-1$ تکرار استفاده نمی‌کند که در آن n: برابر تعداد کل رأس‌های یک گراف است؛ به‌دلیل آن‌که یک رأس به مجموعه متمایز در هر تکرار اضافه می‌شود. حال باید بررسی کرد که در تکرار، چه تعداد عملیات به‌کاربرده می‌شود. برای شناسایی رأسی که در مجموعه S_k با کمترین برچسب وجود ندارد، از $n-1$ فرآیند مقایسه استفاده می‌شود. در ادامه باید فرآیند اضافه کردن و مقایسه را برای به‌روزرسانی برچسب هر رأسی که در مجموعه S_k وجود ندارد، استفاده کرد. به‌صورت کلی بیشتر از $2(n-1)$ عملیات در هر تکرار استفاده نمی‌شود؛ زیرا بیشتر از $n-1$ برچسب برای به‌روزرسانی در هر تکرار، وجود ندارد. درنهایت، الگوریتم دایکسترا از $O(n^2)$ عملیات (مقایسه و اضافه کردن) برای یافتن طول کوتاه‌ترین مسیر بین دو رأس در یک گراف وزن‌دار غیر جهت‌دار ساده با تعداد n رأس استفاده می‌نماید (Rosen, 2011). پیچیدگی زمانی این الگوریتم نیز به‌صورت $O(n^2)$ است (Zhou and Gao, 2019).

۳- نتایج و بحث

در این بخش، روش پیشنهادی بر روی مدل هیدرولیکی دو شبکه آب معروف، پیاده‌سازی شده است.

۳-۱- شبکه هانوی

شبکه آب‌رسانی شهر هانوی (پایتخت کشور ویتنام) توسط Fujiwara and Khang (1990) معرفی شد. این شبکه (شکل ۳) شامل ۳۲ گره، ۳۴ لوله، ۳ حلقه بوده و دارای یک مخزن با رقوم ثابت سطح آب برابر ۱۰۰ متر است. طول و قطر لوله‌ها و هم‌چنین تقاضای مصرف آب گره‌ها به‌ترتیب در بازه ۱۰۰-۳۵۰۰ متر، ۰/۸-۱۰۱۶/۳۰۴ میلی‌متر و ۶۰-۱۳۵۰ مترمکعب در ساعت قرار دارد. ضرایب هیزن ویلیامز تمامی لوله‌ها برابر ۱۳۰ است. تمام گره‌های شبکه نیز در رقوم ارتفاعی صفر متری قرار دارند. فشار متوسط واقعی این شبکه برابر ۴۰/۱۱ متر است. خلاصه نتایج در جدول ۱ آورده شده است.

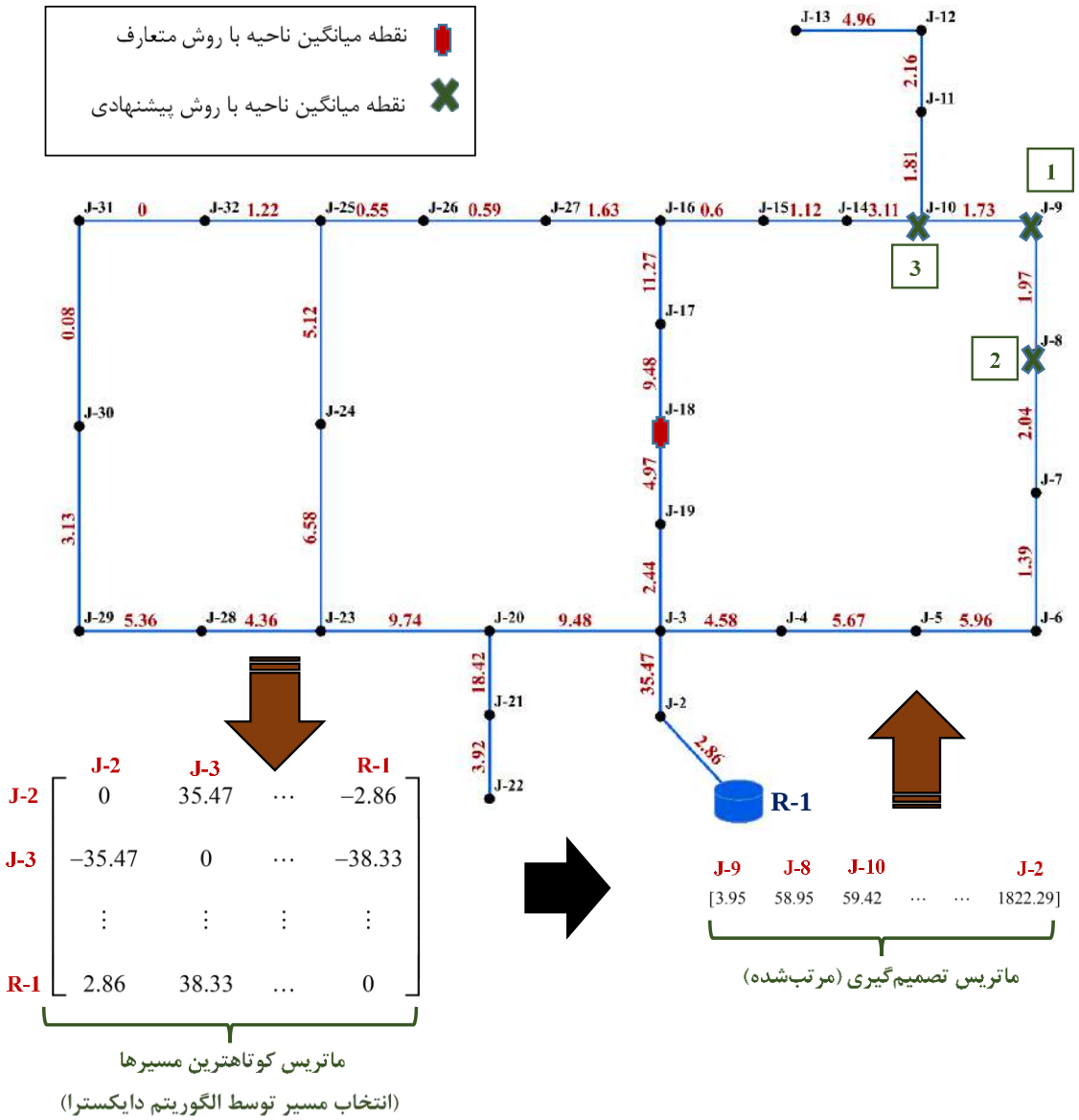
در روش سنتی تعیین نقطه میانگین ناحیه، با توجه به این‌که رقوم ارتفاعی کلیه گره‌های شبکه برابر صفر است، محل این نقطه در وسط شبکه خواهد بود؛ یعنی در J-18 . این گره در شکل ۳ با علامت قرمزرنگ مشخص شده است. فشار این نقطه برابر ۵۴/۱۵ متر است. مشاهده می‌شود که قدر مطلق اختلاف فشار نقطه میانگین ناحیه برآوردشده با این روش نسبت به فشار متوسط واقعی این شبکه، برابر ۳۴/۹۹ درصد است. در خصوص پیاده‌سازی روش پیشنهادی، بزرگی افت انرژی هر لوله به رنگ قرمز در شکل ۳ نمایان است. بخش‌هایی از محاسبات مربوط به ماتریس‌های کوتاه‌ترین مسیرها و تصمیم‌گیری نیز در شکل مذکور آورده شده است. براساس نتایج، مقدار تابع هزینه به‌ازای در نظرگیری J-9 به‌عنوان نقطه میانگین ناحیه، برابر ۳/۹۵ متر است. این نقطه با علامت ضربدر سبزرنگ در شکل ۳ مشخص است؛ فشار این نقطه نیز برابر ۳۹/۹۹ متر بوده که دارای قدر مطلق خطای ۰/۳۱ درصد با فشار متوسط واقعی شبکه است. مشاهده می‌شود که فشار در AZP برآوردی با روش پیشنهادی اختلاف بسیار کمتری با AZP برآوردی با روش متعارف داشته و این برتری روش فوق را نشان می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر، روش پیشنهادی توانسته است که خطای ذکرشده را حدود ۹۹/۱۲

درصد کاهش دهد.

ازجمله مزایای روش پیشنهادی آن است که می‌توان چند نقطه را به‌ترتیب اولویت به‌عنوان کاندیدای نقطه میانگین ناحیه انتخاب نمود که درصورت وجود مشکلات اجرایی در نقطه بهینه، از سایر نقاط کاندید بهره برد. در این راستا، دو نقطه‌ای که بعد از J-9 می‌توانند به‌عنوان کاندید نقطه میانگین ناحیه در این شبکه در نظر گرفته شوند، به‌ترتیب اولویت، شامل گره‌های J-8 و J-10 هستند. مقدار تابع هزینه به‌ازای دو نقطه فوق، به‌ترتیب ۵۸/۹۵ و ۵۹/۴۲ متر است. مشاهده می‌شود که مقدار تابع هزینه به ازای درنظرگیری هرکدام از نقاط مزبور به‌جای J-9 ، افزایش شدیدی می‌یابد. اختلاف فشار این دو نقطه با فشار متوسط واقعی شبکه، به‌ترتیب ۴/۵۸ و ۴/۶۲ درصد است.

جدول ۱- خلاصه نتایج محاسبات تخمین نقاط میانگین ناحیه شبکه‌های موردمطالعه

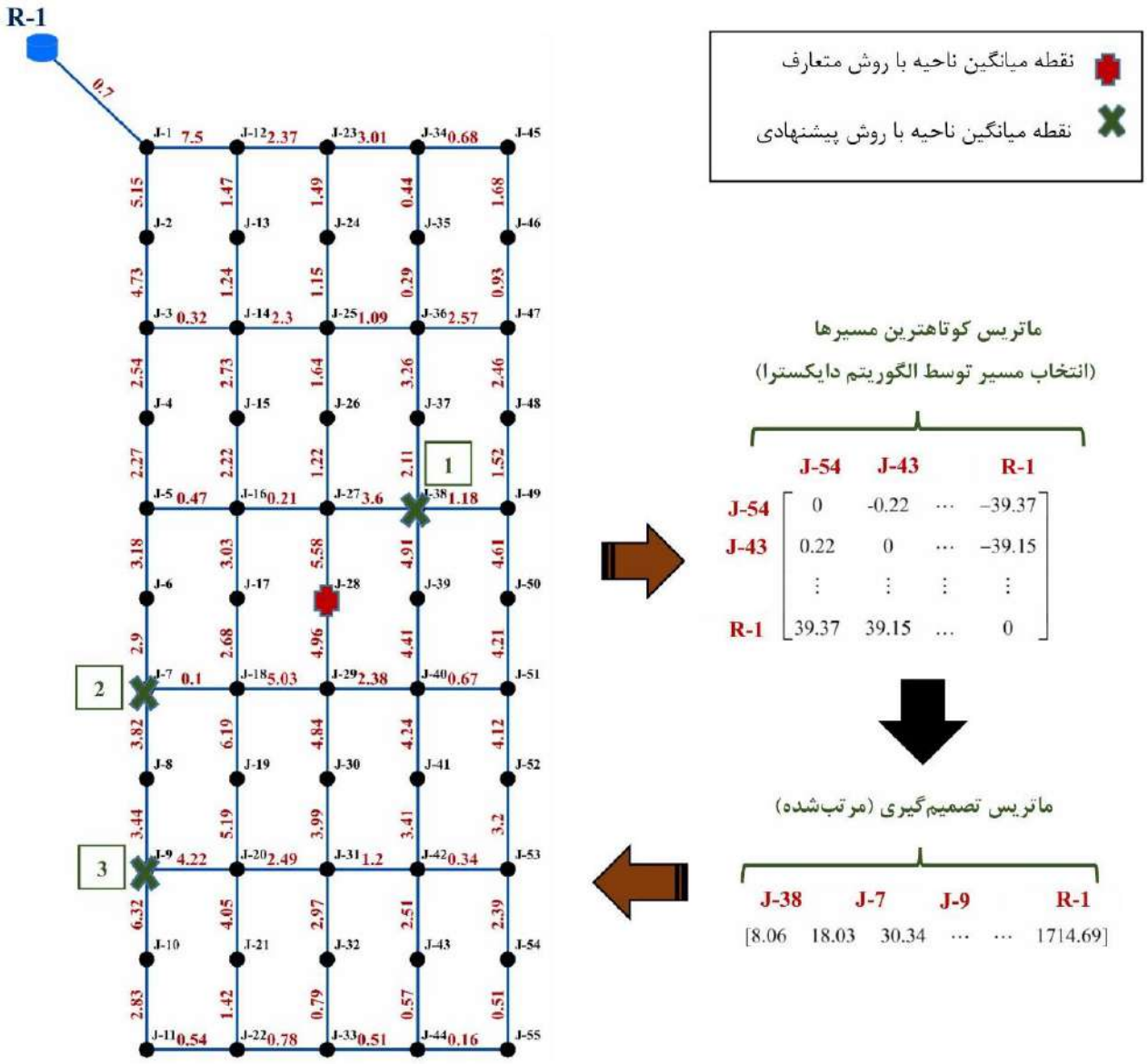
نام شبکه	محل نقطه میانگین ناحیه (AZP)		درصد خطا نسبت به فشار میانگین واقعی (٪)	
	روش متعارف	روش پیشنهادی	روش متعارف	روش پیشنهادی
هانوی	J-18	J-9	۳۴/۹۹	۰/۳۱
پولاکیس اصلاح‌شده	J-28	J-38	۷/۳۴	۰/۴۶



شکل ۳- شبکه هانوی (سه نقطه میانگین ناحیه برآوردشده با روش پیشنهادی، با شماره‌های ۱ تا ۳ به‌ترتیب اولویت در شکل نمایان است و مقادیر قرمزرنگ بیانگر افت انرژی هر لوله یا وزن آن در گراف حاصل است)

۳-۲- شبکه پولاکیس اصلاح‌شده

در این قسمت، روش پیشنهادی روی شبکه پولاکیس (Poulakis et al., 2003) اصلاح‌شده پیاده‌سازی شده است. در این شبکه، طول لوله‌های توزیع برابر ۱۰۰۰ متر، ضریب هیزن-ویلیامز هر لوله برابر ۱۳۰ بوده، قطر لوله‌ها در بازه ۳۰۰-۶۰۰ میلی‌متر بوده و دارای یک مخزن (با ارتفاع سطح آب برابر ۷۰ متر) است. میزان تقاضا در گره‌های این شبکه در بازه ۵-۴۰ لیتر بر ثانیه بوده و رقوم ارتفاعی آن‌ها نیز در بازه ۱۰-۲۰ متری قرار دارد. فرض شده است که توزیع جمعیت مشترکین در قسمت‌های مختلف این شبکه، به‌صورت یکسان است. شماتیک این شبکه در شکل ۴ آورده شده است. فشار متوسط آن نیز برابر ۳۰/۵۶ متر است.



شکل ۴- شبکه پولاکیس اصلاح‌شده (سه نقطه میانگین ناحیه برآوردشده با روش پیشنهادی، با شماره‌های ۱ تا ۳ به ترتیب اولویت در شکل نمایان است و مقادیر قرمزرنگ بیانگر افت انرژی هر لوله یا وزن آن در گراف حاصل است)

خلاصه انجام محاسبات در جدول ۱ آورده شده است. در روش سنتی تعیین نقطه میانگین ناحیه، با توجه به این‌که متوسط رقوم ارتفاعی کلیه گره‌های شبکه برابر ۱۵/۵۴ متر است، محل این نقطه در وسط شبکه و در J-28 با رقوم ارتفاعی برابر ۱۵/۴۹ متر خواهد بود (در شکل ۴ با علامت قرمزرنگ مشخص شده است). فشار این نقطه برابر ۳۲/۸۰ متر است. مشاهده می‌شود که قدر مطلق اختلاف فشار نقطه میانگین ناحیه برآوردی با این روش نسبت به فشار متوسط واقعی این شبکه، برابر ۷/۳۴ درصد است. قسمت‌هایی از محاسبات مربوط به ماتریس‌های کوتاه‌ترین مسیرها و تصمیم‌گیری در شکل ۴ آورده شده است. در نتیجه

محل نقطه میانگین ناحیه تخمین زده شده با روش پیشنهادی با علامت ضربدر سبزرنگ در شکل مذکور نمایان است؛ محل این نقطه در J-38 بوده و مقدار تابع هزینه به ازای آن حدود ۸/۰۶ متر است. فشار نقطه مذکور نیز برابر ۳۰/۷۰ متر بوده که دارای انحراف ۰/۴۶ درصد با فشار متوسط واقعی شبکه است. مشاهده می‌شود که با انتخاب نقطه میانگینی که توسط روش پیشنهادی تخمین زده شده است، خطای برآورد فشار متوسط شبکه حدود ۹۳/۶۷ درصد کاهش می‌یابد. لازم‌به ذکر است که چنان‌چه به‌علت مشکلات اجرایی، امکان فشارسنجی در J-38 فراهم نباشد، می‌توان به‌جای آن، این عملیات را به‌ترتیب اولویت در J-7 و J-9 به‌عنوان جایگزین نقطه مذکور، پیاده‌سازی نمود. لازم‌به ذکر است که در این‌صورت هرچند مقدار تابع هزینه افزایش می‌یابد، ولی خطای برآورد فشار متوسط شبکه به ۱/۰۴ درصد در خصوص نقطه J-7 و به ۱/۷۶ درصد در خصوص نقطه J-9 می‌رسد؛ لذا هم‌چنان برآورد قابل‌قبولی از فشار متوسط شبکه، به‌دست می‌آید.

۳-۳- ارزیابی اثر هیدرولیک شبکه

در روش سنتی تعیین نقطه میانگین ناحیه، متوسط وزنی تراز ارتفاعی گره‌ها/ اشتراک‌های موجود به‌عنوان تراز ارتفاعی AZP و فشار چنین نقطه‌ای در وسط شبکه، برابر فشار متوسط آن درنظر گرفته می‌شود. درصورتی‌که این رویکرد لزوماً صحیح نیست؛ زیرا ممکن است، افت انرژی چنین نقطه‌ای تا نقاط دیگر شبکه آن‌قدر زیاد باشد که فشار اندازه‌گیری‌شده چنین نقطه‌ای با متوسط فشار نقاط دیگر، تفاوت زیادی داشته باشد. به‌عبارت‌دیگر، هیدرولیک شبکه به‌صورت قانونمند در چنین تصمیم‌گیری‌ای لحاظ نمی‌شود. انتظار می‌رود هرچقدر مقدار افت انرژی لوله‌های یک شبکه بیشتر باشد، صحت روش سنتی کاهش یابد. براساس نتایج، خطای برآورد فشار متوسط شبکه توسط نقطه میانگین ناحیه‌ای که به‌روش سنتی مکان‌یابی شده، در شبکه مورد مطالعه اول (هانوی) و دوم (پولاکیس اصلاح‌شده) به‌ترتیب ۳۴/۹۹ و ۷/۳۴ درصد بوده است. در هر دو شبکه مذکور، مجموع بزرگی افت انرژی لوله‌ها بر طول کل شبکه تقسیم شده و به‌عنوان متوسط مقدار افت خط انرژی (متر/متر) درنظر گرفته شد. این مقدار در شبکه هانوی برابر ۰/۰۰۴۴ و در شبکه پولاکیس اصلاح‌شده برابر ۰/۰۰۲۶ متر/متر است. به‌همین دلیل است که خطای تخمین فشار متوسط توسط روش سنتی در شبکه اول به‌مراتب بیشتر از خطای مذکور در شبکه دوم است. هرچند مقادیر فوق با پیاده‌سازی روش پیشنهادی به کمتر از ۰/۵ درصد رسیده است.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی برای تعیین نقطه میانگین ناحیه (AZP) در شبکه‌های توزیع آب پیشنهاد شد. این روش، مبتنی بر تحلیل هیدرولیکی شبکه بوده و از الگوریتم‌های موجود در نظریه گراف استفاده می‌کند. روش پیشنهادی در شبکه‌های هانوی (شبکه موردمطالعه اول) و پولاکیس اصلاح‌شده (شبکه موردمطالعه دوم) پیاده‌سازی شد. از طرف دیگر، نقطه مذکور توسط روش سنتی (متعارف) نیز مکان‌یابی شده و نتایج آن مورد بررسی و مقایسه قرارگرفت. نتایج نشان می‌دهد که در شبکه‌های اول و دوم مورد مطالعه، قدرمطلق خطای برآورد فشار متوسط واقعی شبکه با روش پیشنهادی، به‌ترتیب حدود ۰/۳۱ و ۰/۴۶ درصد است. فرآیند پیشنهادی سبب شده است که خطای ناشی از به‌کارگیری روش متعارف در تخمین پارامتر مذکور، بیشتر از ۹۳ درصد کاهش یابد.

لازم‌به ذکر است که هرچند در این مقاله، روشی دقیق‌تر (نسبت به روش سنتی موجود) برای یافتن نقطه میانگین ناحیه در شبکه‌های توزیع آب ارائه شده است، ولی باید درنظر گرفت که استفاده از این روش پیچیدگی‌های محاسباتی خاص خود را دارد. درحالی‌که روش سنتی یک روش کاربردی است که برای استفاده آسان توسط بهره‌برداران ارائه شده است. از سوی دیگر، با گسترش استفاده از شبکه‌های هوشمند در صنعت آب‌رسانی، توسعه و استفاده از روش‌های جدید و دقیق‌تر، فراگیر خواهد شد. هم‌چنین نتایج این مقاله نشان داد که صحت روش سنتی چقدر می‌تواند کمتر از یک روش محاسباتی دقیق برای پروژه‌های موردمطالعه باشد.

۵- پی‌نوشت‌ها

1 Genetic Algorithm
2- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
3- Pressure Managed Zone
4- District Metered Areas
5- Average Zone Point
6- Average Zone Night Pressure
7- Weighted Average Ground Level
8- Geographic Information's Systems
9- Global Positioning Systems
10- Dijkstra
11- Single source shortest path problem
12- Single pair shortest path problem
13- Single destination shortest path problem
14- All-pairs shortest path problem

۵- مراجع

صالحی، س.، تابش، م.، و جلیلی قاضی‌زاده، م.ر.، (۱۳۹۷)، "توسعه یک مدل اولویت‌بندی برای بازسازی لوله‌های شبکه‌های توزیع آب با حداقل اطلاعات ساختاری"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۲۹(۶)، ۴۰-۵۵، https://doi.org/10.22093/wwj.2017.91467.2447.

American Water Works Association (AWWA), (2016), *Water audits and loss control programs (M36)*, American Water Works Association, USA.

Ahdan, S., and Setiawansyah, S., (2021), "Android-based geolocation technology on a Blood Donation System (BDS) using the Dijkstra algorithm", *International Journal of Applied Information Technology (IJAIT)*, 5(1), 1-15, https://doi.org/10.25124/ijait.v5i01.3317.

Al Hakim, R.R., Purwono, P., Arief, Y. Z., Pangestu, A., Satria, M.H., and Ariyanto, E., (2022), "Implementation of Dijkstra algorithm with react native to determine Covid-19 distribution", *Sistemasi: Jurnal Sistem Informasi*, 11(1), 160-170, https://doi.org/10.32520/stmsi.v11i1.1667.

Bahrami, N., and Siadatmousavi, S.M., (2023), "Ship voyage optimisation considering environmental forces using the iterative Dijkstra's algorithm", *Ships and Offshore Structures*, 19(8), 1-8, https://doi.org/10.1080/17445302.2023.2231200.

Bai, X., Wang, L., Hu, Y., Li, P., and Zu, Y., (2023), "Optimal path planning method for IMU system-level calibration based on improved Dijkstra's algorithm", In: *IEEE Access*, (Vol. 11, pp. 11364-11376), https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3240518.

Cao, H., Hopfgarten, S., Ostfeld, A., Salomons, E., and Li, P., (2019), "Simultaneous sensor placement and pressure reducing valve localization for pressure control of water distribution systems", *Water*, 11(7), 1352, https://doi.org/10.3390/w11071352.

Ferreira, B., Antunes, A., Carriço, N., and Covas, D., (2022), "Multi-objective optimization of pressure sensor location for burst detection and network calibration", *Computers & Chemical Engineering*, 162, 107826, https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107826.

Ferreira, B., Antunes, A., Carriço, N., and Covas, D., (2023), "NSGA-II parameterization for the optimal pressure sensor location in water distribution networks", *Urban Water Journal*, 20(6), 738-750, https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2209553.

Ferreira, B., Carriço, N., and Covas, D., (2021), "Optimal Number of Pressure Sensors for Real-Time Monitoring of Distribution Networks by Using the Hypervolume Indicator", *Water*, 13(16), 2235,.https://doi.org/10.3390/w13162235.

Fujiwara, O., and Khang, D.B., (1990), "A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks", *Water Resources Research*, 26(4), 539-549, https://doi.org/10.1029/WR026i004p00539.

Khakzad, N., (2023), "A methodology based on Dijkstra's algorithm and mathematical programming for optimal evacuation in process plants in the event of major tank fires", *Reliability Engineering & System Safety*, 236, 109291, https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109291.

Kim, D., Kim, D., Woo, D., and Lee, Y., (2022), "Development of an image analysis code for hydrided Zircaloy using Dijkstra's algorithm and sensitivity analysis of radial hydride continuous path", *Journal of Nuclear Materials*, 564, 153647, https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.153647.

Klapcsik, K., Varga, R., and Hős, C., (2018), "Optimal pressure measurement layout design in water distribution network systems", *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 62(1), 51-64, https://doi.org/10.3311/PPme.11409.

Lambert, A., (2013), "Guidelines relating to the assessment and calculation of average pressure in water distribution systems and zones", ILMSS Ltd/Wide Bay Water Corporation, https://www.leakssuitelibrary.com.

Maw, S.S., Lin, K.S., and Naing, L.L., (2019), "Dijkstra's algorithm for effective travelling to the most famous destinations in Myanmar", *International Journal of Mathematics Trends and Technology (IJMTT)*, 65(8), 4-12.

Meier, R.W., and Barkdoll, B.D., (2000), "Sampling design for network model calibration using Genetic Algorithms", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126(4), 245-250, https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2000)126:4(245).

Parekh, S., Jha, A., Dalvi, A., and Siddavatam, I., (2022), "An exhaustive approach orchestrating negative edges for Dijkstra's Algorithm", 7th International conference for Convergence in Technology (I2CT), 1-5.

Peng, F., Deng, X., Jiang, M., Dinardo, S., and Shen, Y., (2023), "A New Method to Combine Coastal Sea Surface height estimates from multiple retrackers by using the Dijkstra algorithm", *Remote Sensing*, 15(9), 2329, https://doi.org/10.3390/rs15092329.

Peng, S., Cheng, J., Wu, X., Fang, X., and Wu, Q., (2022), "Pressure sensor placement in water supply network based on Graph Neural Network Clustering method", *Water*, 14(2), 150, https://doi.org/10.3390/w14020150.

Perkowski, Z., and Tatara, K., (2020), "The use of Dijkstra's algorithm in assessing the correctness of imaging brittle damage in concrete beams by means of ultrasonic transmission tomography", *Materials*, 13(3), 551, https://doi.org/10.3390/ma13030551.

Poulakis, Z., Valougeorgis, D., and Papadimitriou, C., (2003), "Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 18(4), 315-327, https://doi.org/10.1016/S0266-8920(03)00045-6.

Rosen, K.H., (2011), *Discrete mathematics and its applications*, McGraw Hill, India.

Salehi, S., Robles-Velasco, A., Seyedzadeh, A., Ghazali, A., and Davoudiseresht, M., (2022), "A hybrid knowledge-based method for pipe renewal planning in water distribution systems with limited data: Application to Iran", *Utilities Policy*, 78, 101407, https://doi.org/10.1016/j.jup.2022.101407.

Salem, I.E., Mijwil, M.M., Abdulqader, A.W., and Ismaeel, M.M., (2022), "Flight-schedule using Dijkstra's algorithm with comparison of routes findings", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(2), 1675, http://doi.org/10.11591/ijece.v12i2.pp1675-1682.

Simone, A., Giustolisi, O., and Laucelli, D.B., (2016), "A proposal of optimal sampling design using a modularity strategy", *Water Resources Research*, 52(8), 6171-6185,. https://doi.org/10.1002/2016WR018944.

Trifunovic, N., (2006), *Introduction to urban water distribution*, Unesco-IHE lecture note series (1st Ed.), CRC Press.

Ubaidillah, A., and Sukri, H., (2023), "Application of Odometry and Dijkstra algorithm as navigation and shortest path determination system of warehouse mobile robot", *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 4(3), 413-423.

Yang, G., and Wang, H., (2023), "Optimal pressure sensor deployment for leak identification in water distribution networks", *Sensors*, 23(12), 5691, https://doi.org/10.3390/s23125691.

Zhou, M., and Gao, N., (2019), "Research on optimal path based on Dijkstra algorithms", *3rd International Conference on Mechatronics Engineering and Information Technology. Dalian, China.*

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

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال دهم، شماره ۱، صفحات ۳۰-۴۰، بهار ۱۴۰۴

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 10, No. 1, PP. 30-40, Spring 2025
DOI: 10.22112/jwwse.2025.459259.1402

مقاله پژوهشی

ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌های فاضلاب شهری در برابر تخلیه‌های صنعتی با استفاده از روش RAMCAP مطالعه موردی: شهر تهران

عقیل قربانی شاه‌نجفی[1*]، سیدحسین هاشمی[2] و سیدناصر باشی ازغدی[3]

۱- کارشناس ارشد علوم و مهندسی محیط‌زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۲- دانشیار فناوری‌های محیط‌زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، موسسه آموزش عالی خاوران، مشهد، ایران.
*نویسنده مسئول، ایمیل: aghilghorbani71@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۸
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

از آن‌جا که در بسیاری از مناطق به‌دلایل مختلف واحدهای صنعتی در داخل و حومه شهرها قراردارند، فاضلاب تولیدی آن‌ها ممکن است به سیستم فاضلاب شهری تخلیه شود. در این پژوهش آسیب‌پذیری شبکه‌های فاضلاب شهری در مقابل تخلیه فاضلاب‌های صنعتی که می توانند دبی و بار آلودگی زیادی به شبکه فاضلاب وارد کنند و موجب خسارت به تأسیسات فاضلاب (شبکه‌های جمع‌آوری) شوند، شناسایی و تعیین‌شده است. بدین‌منظور شبکه فاضلاب منطقه ۲۱ تهران که دربرگیرنده تعداد زیادی واحدهای صنعتی است، به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب و اطلاعات مربوطه گردآوری شد. سپس دارایی‌ها و تهدیدات ویژه مربوط به شبکه فاضلاب شناسایی و پس از آن شدت آسیب ناشی از هر تهدید احتمالی بر دارایی‌های مشخص شد. در آخر عدد آسیب‌پذیری لوله‌ها به‌عنوان دارایی‌های شبکه فاضلاب با استفاده از روش RAMCAP، محاسبه شد. نتایج نشان داد که مهم‌ترین مخاطرات ناشی از تخلیه فاضلاب‌های صنعتی به شبکه فاضلاب شهری، ورود آلاینده‌های شیمیایی و تغییر شدید کیفیت فاضلاب ناشی از تخلیه های صنعتی است که می‌توانند موجب خسارت به تأسیسات فاضلاب شهری و اختلال در عملکرد آن‌ها شوند. در کل، از مجموع ۷۵ لوله به‌عنوان دارایی مهم در شبکه، ۶ لوله دارای ریسک بالا، ۱۰ لوله دارای ریسک متوسط و بقیه ۵۹ لوله دارای ریسک کم هستند.

کلمات کلیدی: شبکه فاضلاب، فاضلاب صنعتی، بار آلودگی، ریسک، دارایی‌های شبکه، RAMCAP

Research Paper

Vulnerability Assessment of Urban Sewer Networks Against Industrial Discharges Using RAMCAP Method, Case Study: Tehran City

Aghil Ghorbani Shahnajafi[1*], Seyed Hossein Hashemi[2] and Seyed Naser Bashi Azghadi[3]

1- M.Sc., Environmental Science and Engineering, Faculty of Environment Science, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran.
2- Associate Professor of Environmental Technologies, Faculty of Environment Science, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran.
3- Assistant Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Khavaran Institute of Higher Education, Mashhad, Iran.
*Corresponding Author, Email: aghilghorbani71@gmail.com

Received: 18/07/2024
Revised: 14/10/2024
Accepted: 10/11/2024
© IWWA

Abstract

Since in many regions and due to different reasons, there are industrial plants inside urban or suburban areas, and their produced wastewater may discharge to urban sewer network. In this study, vulnerability of urban sewer networks against industrial discharges which can enter high flow and pollution loads to sewers and cause damage to wastewater facilities (pipes) was identified and determined. For this purpose, the sewage network of District 21 of Tehran, which includes many industrial units, was selected as a case study, and related information was collected. Then the assets and specific threats related to the network were identified. After that, the severity of assets damages which were caused by any probable threat was determined. Finally, the vulnerability index of pipes as the assets of the sewage network was ranked and calculated using the RAMCAP method based on their diameter in the range of low, medium, and high risk. The results show that the most important threats caused by industrial discharges to the urban sewer network are release of chemical pollutants and dramatically changes of industrial discharges quality which can create physical damage of urban wastewater facilities and their dysfunction. Out of a total of 75 pipes in the network, 6 pipes have high risk, 10 pipes have medium risk, and the remaining 59 pipes have low risk.

Keywords: Sewer network, Industrial wastewater, Pollution load, Risk, Network assets, RAMCAMP.

۱- مقدمه

امروزه یکی از مسائل عمده محیط‌زیست کشور که از فعالیت‌های انسان ناشی می‌شود، فاضلاب صنایع مختلف است. تخلیه فاضلاب‌های صنعتی خام و تصفیه نشده به محیط‌زیست یکی از مشکلات جدی است که در حال‌حاضر منابع آب و خاک کشور را تهدید می‌کند. تفاوت در کمیت و کیفیت فاضلاب صنایع، نوع عملیات صنعتی و تنوع زیاد مواد شیمیایی مصرفی در واحدهای صنعتی، ازجمله مسائلی هستند که مدیریت فاضلاب‌های صنعتی را به‌مراتب تخصصی‌تر و پیچیده‌تر از فاضلاب‌های شهری می‌سازد (Wang et al., 2004).

شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری ازجمله زیرساخت‌های اصلی شهرها هستند. این شبکه‌ها از محل ورود تا خروج فاضلاب، در معرض تهدیدهای طبیعی و انسانی قرار دارند که در این میان، تهدیدهای انسانی می‌تواند به‌صورت حملات انفجاری مستقیم یا ورود آلودگی به شبکه فاضلاب باشد (ASME, 2006). بیشتر کشورهای پیشرفته فاضلاب‌های صنعتی خود را به روش‌های مختلف مدیریت می‌کنند. یکی از این روش‌ها، اتصال فاضلاب صنایع به شبکه فاضلاب شهری است. در این روش، مقدار بالای بار آلودگی فاضلاب صنایع، ممکن است موجب خسارت به سیستم تصفیه‌خانه و نیز تأسیسات شبکه انتقال فاضلاب شهری شود. تخلیه غیرمجاز فاضلاب صنعتی به تأسیسات فاضلاب شهری می‌تواند موجب تخریب تأسیسات شبکه جمع‌آوری و تصفیه‌خانه فاضلاب و هم‌چنین انتشار آلاینده‌های شیمیایی و بیولوژیکی شود که ممکن است پیامدهایی از قبیل آلودگی، تخریب محیط‌زیست، بیماری و مرگ انسان‌ها را به‌دلیل نزدیکی به محیط زندگی و هم چنین توقف خدمات فاضلاب به دنبال داشته باشد. بنابراین تحلیل جامع ریسک و آسیب‌پذیری ناشی از این نوع تخلیه‌ها با درنظر گرفتن پیچیدگی‌های این سامانه ها و اجزای آن‌ها ضروری است (عسکریان و همکاران، ۱۳۹۴).

ارزیابی ریسک عبارت از روش منطقی برای تعیین اندازه کمّی و کیفی خطرات و بررسی پیامدهای بالقوه ناشی از حوادث احتمالی بر روی افراد، مواد، تجهیزات و محیط است. در حقیقت از این‌طریق میزان کارآمدی روش‌های کنترلی موجود مشخص‌شده و داده‌های باارزشی برای تصمیم‌گیری درزمینه کاهش ریسک، خطرات، بهسازی سیستم‌های کنترلی و برنامه‌ریزی برای واکنش به آن‌ها فراهم می‌شود. هر نوع حادثه‌ای که بروز آن محتمل بوده و منجر به خسارات جانی یا مالی و آسیب به زیرساخت‌های حیاتی یک کشور شود، تهدید یا بحران نامیده می‌شود. تهدید، یک رخداد با احتمال وقوع پایین و پیامدهای منفی بالا است که ممکن است احتمال رخداد آن قابل‌محاسبه نباشد. ریسک، احتمال وقوع یک پدیده نامطلوب است. ریسک متشکل از سه پارامتر احتمال وقوع بحران، شدت وقوع حادثه و آسیب‌پذیری سیستم است (Torres et al., 2009). امروزه تکنیک‌های مختلفی مانند مدل IFHRA-WSS، مدل RAMCAP[1]، رویکرد FEMA، تحلیل ریسک فازی، تحلیل سلسله مراتبی با دو رویکرد فازی و درخت خطا همراه با مدل سازی شیءگرا، تلفیق رویکردهای عملکردی و آمایشی، تجمع درخت خطا و شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای ارزیابی و تحلیل ریسک در زیرساخت‌های تأمین و توزیع آب شهری شبکه‌های فاضلاب به‌صورت مجزا یا یکپارچه به‌کار گرفته‌شده است (Sadiq., 2020; Xudong., 2022; Li., 2009; Saskia., 2022; Nurollahi et al., 2015; Roozbahani., 2015; Tchorzewska., 2019).

دستورالعمل موسوم به مدل RAMCAP که به اختصار از مدیریت و ارزیابی ریسک برای محافظت از سرمایه‌های حیاتی اخذ شده است، متدولوژی توصیه‌شده برای بخش آب و فاضلاب در ایالات‌متحده است. RAMCAP فرآیندی برای ارزیابی پیامدهای، آسیب‌پذیری‌ها و خطرپذیری‌های ناشی از حوادث و حملات تروریستی برای اولین بار در آمریکا استفاده شده است. به‌علاوه، این روش، راه‌کارهای را برای ارزیابی اثرات و پیامدهای حوادث طبیعی در بخش آب و فاضلاب ارائه می‌کند. این دستورالعمل دو هدف عمده را دنبال می‌نماید: یکی تعیین یک چارچوب و قالب عمومی و فراگیر برای آگاهی از خطرات و تهدیدهایی که سامانه‌های آب و فاضلاب با آن‌ها مواجه هستند و دیگری این‌که راهنمایی به‌منظور تدوین چگونگی دستیابی به روش‌های ارزیابی خطرات متوجه سامانه‌های آب و فاضلاب با به‌کارگیری این قالب ارائه‌شده است (Brashear et al., 2010). در روش RAMCAP ریسک مساوی است با تهدید در پیامد و آسیب‌پذیری که از اعضای اصلی مدل هستند. برای ارزش‌گذاری به هریک از سه پارامتر ایجادکننده ریسک، شاخص‌های تعریف‌شده است که شخص تصمیم‌گیرنده با توجه به آن شاخص‌ها، ارزش نهایی آن پارامتر را تعیین می‌کند. تاکنون پژوهش‌ها و مطالعات متعددی برای بررسی آسیب‌پذیری، ارزیابی و تحلیل ریسک بخش‌های مختلف شبکه فاضلاب و شبکه‌های آب‌رسانی صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره‌شده است.

روزبهانی و همکاران (۱۳۹۴) مدل IFHRA-WSS با رویکرد فازی را برای تحلیل ریسک سامانه‌های آب شهری شامل بخش

تأمین، تصفیه و توزیع به‌صورت یکپارچه ارائه و کارایی آن بر روی سیستم آب شرب شهر ارومیه در ایران را بررسی کردند. Asgarian et al. (2023) مدل FSAW[3] را برای تحلیل ریسک شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب، برای مدیریت عملکرد شبکه در شرایط بحران مانند بروز خطرات طبیعی و انسان‌ساز ارائه کردند. در این مطالعه که در منطقه تحت پوشش تصفیه‌خانه شهرک غرب تهران اجرا شد، بحران‌های ورود آلاینده شیمیایی و تغییرات شدید در کیفیت فاضلاب به‌عنوان پرمخاطره‌ترین بحران شناخته شد. سرانجام رویکرد مقابله و کاهش خطر ریسک به‌عنوان رویکرد پیشنهادی ارائه شد.

Salman et al. (2012) خطرپذیری (ریسک) لوله‌ها در شبکه‌های فاضلاب را ارزیابی کردند. آن‌ها براساس اولویت‌بندی شبکه‌های فاضلاب با توجه به نظرات کارشناسان، مقادیر شکست یا خرابی برای هر لوله را به‌صورت نسبی تعیین کردند. سپس برای تعیین پیامد شکست از سیستم امتیازدهی وزنی استفاده شد که در آن عملکرد هر لوله با توجه به مجموعه‌ای از فاکتورها ارزیابی و مجموع وزنی محاسبه شد. Anbari et al. (2018) یک مدل ارزیابی ریسک جدید برای اولویت‌بندی بازرسی لوله‌های فاضلاب با استفاده از شبکه‌های Bayesian (BNs) به‌عنوان یک روش احتمالی برای محاسبه احتمال شکست و روش میانگین وزنی برای محاسبه پیامدهای مقادیر شکست ارائه کردند. در این مطالعه با درنظر گرفتن عدم قطعیت، ادغام احتمال و پیامدهای مقادیر شکست با استفاده از یک سیستم استنتاج فازی (FIS) مقدار ریسک لوله‌ها فاضلاب محاسبه شد.

Asghari et al. (2023) با ارائه روش تلفیقی تجزیه و تحلیل و مدیریت ریسک برای حفاظت از دارایی‌های حیاتی (RAMCAP) و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) کل زیرساخت آبی شهر تهران شامل سدها، تصفیه‌خانه‌ها، مخازن ذخیره، چاه‌ها، تلمبه‌خانه‌ها و شبکه توزیع را ازلحاظ آسیب‌پذیری بررسی کردند. نتایج نشان داد ارزیابی آسیب‌پذیری دارایی‌ها بر مبنای معیارها و اهداف مشخص‌شده قابلیت کشف و شناسایی دارند که درنتیجه سدهای امیرکبیر و طالقان و دیگر اجزای سامانه آب‌رسانی بیشترین آسیب‌پذیری و مخازن ذخیره آسیب‌پذیری کمتری را دارا بوده است.

امینی و حاجی‌کندی (۱۴۰۰) به ارزیابی و رتبه‌بندی آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب اجراشده در بخشی از منطقه ۵ شهرداری تهران با استفاده از تلفیق مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و تکنیک GIS[6] پرداخته است. در این مطالعه براساس سه عامل هدف (گرفتگی آدم‌رو، گرفتگی لوله و گرفتگی انشعاب‌ها) و با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی، مقایسه زوجی میان عامل‌های مربوطه انجام و وزن نسبی هر یک از معیارها محاسبه شد. سپس بیشترین آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب برای هر کدوم از اهداف مشخص شد. Ghoreishi et al. (2023) ارزیابی ریسک شکست در شبکه فاضلاب را با توسعه شبکه‌های بیزین و تصمیم‌گیری چند معیاره مکانی براساس ترکیب احتمال شکست و عواقب شکست در منطقه ۴ آب و فاضلاب تهران انجام دادند. شبکه بیزین براساس ویژگی‌هایی چون رسوبات، نشت لوله‌ها، خوردگی، سایش لوله‌ها و تغییر شکل لوله‌ها تشکیل شد. در این مطالعه، از تحلیل‌های مکانی در GIS و روش تصمیم‌گیری چند معیاره DEA[7] استفاده شد. نتایج نشان داد که چنین رویکردی قابلیت اعتماد بالایی داشته و با دقت مناسبی می‌توان ریسک شکست را برآورد نمود.

با آن‌چه بیان شد حفظ و نگهداری شبکه‌های آب و فاضلاب و تصفیه‌خانه ضروری است و به‌عنوان مسئله عمده‌ای در حفظ جان انسان‌ها به‌شمار می‌آید. لذا مطابق مطالعات صورت‌گرفته تا هنوز از مدل RAMCAP برای ارزیابی شبکه‌های آب‌رسانی استفاده‌شده است. در این پژوهش از این مدل برای ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب استفاده‌شده است. شایان ذکر است از آن‌جا که رویکرد موردمطالعه جامع‌تر نبوده است از سایر روش‌ها مانند FMEA[4]، AHP[5]، درخت خطا و تحلیل ریسک فازی استفاده‌نشده است، به‌گونه‌ای که در روش‌های دیگر به‌صورت هم‌زمان آثار تهدیدات مغرضانه، انسان‌ساز، هم مخاطرات طبیعی و عملکردی- فنی با هم ارزیابی‌شده باشد. درصورتی‌که مزیت روش RAMCAP نسبت به سایر روش‌های ارزیابی ریسک این بوده که این روش مختص برای ارزیابی آسیب‌پذیری و ریسک بخش آب و فاضلاب بوده است. هم‌چنین معیارها و الگوهای استفاده‌شده در دیگر روش‌ها یا به‌صورت عمومی بوده و یا مختص یک بخش خاصی غیر از سامانه‌های آب و فاضلاب بوده است. ازجمله نوآوری صورت‌گرفته در این تحقیق، علاوه‌بر درنظر گرفتن کلیه اجزای شبکه فاضلاب به‌صورت یکپارچه، به‌کارگیری شاخص‌های موثر و تأثیرگذار در ارزیابی تهدیدات و ارزیابی آسیب‌پذیری بوده است.

از آن‌جا که تهران پایتخت و بزرگ‌ترین شهر ایران است و صنایع زیادی در آن مشغول فعالیت هستند، مشکلات محیط‌زیستی زیادی ازجمله فاضلاب صنایع در این شهر وجود دارد. فاضلاب صنایع در منطقه غرب تهران، از پرمخاطره‌ترین مشکلات محیط‌زیستی این شهر است. یکی از راه‌های مدیریت فاضلاب صنایع این محدوده، اتصال فاضلاب صنایع مختلف به

شبکه فاضلاب شهری پایتخت است. در این شرایط، مقدار بالای دبی و بار آلودگی فاضلاب صنایع، ممکن است موجب خسارت به شبکه جمع‌آوری و انتقال و تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شود. بنابراین، با توجه به اثرات تخلیه‌های صنعتی بر تأسیسات فاضلاب شهری، در این پژوهش فقط شناسایی و بررسی آسیب‌پذیری تأسیسات شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهری به هنگام وقوع تخلیه‌های صنعتی با استفاده از مدل RAMCAP انجام شده است.

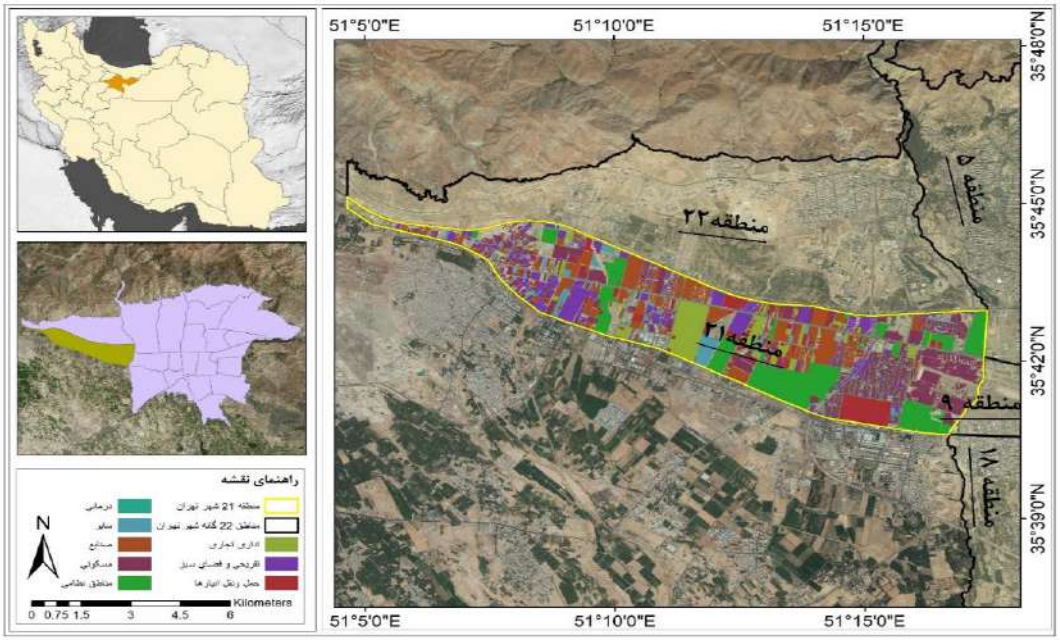
۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه موردمطالعه

محدوده موردمطالعه، منطقه ۲۱ تهران با مساحتی بالغ بر ۵۵۵۰ هکتار، ۷/۸ درصد کل مساحت شهر تهران و مجموعه‌ای از کاربری‌های مسکونی، اداری و تجاری و صنعتی را در برگرفته است، به‌طوری‌که ۴۳۴۰ کارگاه و حدود ۲۰ درصد اشتغال صنعت شهر تهران در این منطقه قرار دارد (شکل ۱).

۲-۲- شناسایی صنایع

در اولین گام پژوهش، صنایع مستقر در منطقه ۲۱ تهران شناسایی و صنایع با تعداد کارکنان بیش از ۱۰ نفر که جزو صنایع متوسط و بزرگ طبقه‌بندی می‌شوند، انتخاب شدند (وزارت صنعت، معدن و تجارت، ۱۳۹۲). در گام بعدی با طراحی پرسشنامه و بازدید میدانی از تک‌تک صنایع اطلاعات موردنیاز درزمینه موقعیت جغرافیایی، مقدار آب مصرفی، ویژگی‌ها و مشخصات فاضلاب تولیدی ۸۰ واحد صنعتی منتخب جمع‌آوری شد (جدول ۱).



شکل ۱- کاربری اراضی در منطقه موردمطالعه

جدول ۱- خلاصه ساختار و اطلاعات پرسشنامه

ویژگی	مشخصات	شرح
شناسه واحد صنعتی	نام صنعت نشانی نوع مواد اولیه مصرفی نوع تولیدات مختصات جغرافیایی صنعت	نوع تولیدات: - ظرفیت سالانه تولید - مقدار سالانه مصرف مواد اولیه
ویژگی‌های آب مصرفی واحد صنعتی	کمیت و کیفیت آب مصرفی	میانگین سالانه آب مصرفی واحد صنعتی منبع تأمین آب حجم مخازن ذخیره آب مصرفی

		میزان آب مصرفی در فرایند تولید ساعات مصرف آب در فرایند تولید میزان مصرف آب بهداشتی کیفیت آب مصرفی
ویژگی‌های فاضلاب تولیدی واحد صنعتی	کمیت و کیفیت فاضلاب تولیدی	میانگین سالانه فاضلاب تولیدی حداکثر دبی فاضلاب تولیدی حداقل دبی فاضلاب تولیدی ساعات حداقل و حداکثر دبی فاضلاب مقدار فاضلاب تولیدی به ازای واحد مواد اولیه مصرفی مقدار فاضلاب تولیدی به ازای واحد تولید محصول
ویژگی‌های جریان‌های فاضلاب تولیدی واحد صنعتی	انواع جریان فاضلاب: - فاضلاب حاصل از شستشوی سالن - فاضلاب حاصل از تولید محصول - فاضلاب حاصل از شستشوی ظروف و تجهیزات - فاضلاب بهداشتی - فاضلاب حاصل از شکل دادن و سرد کردن قطعات تولید	ویژگی‌های جریان فاضلاب: - دبی فاضلاب - ساعات تولید فاضلاب در شبانه‌روز - ساعات اوج تولید فاضلاب - ویژگی ظاهری فاضلاب (رنگ، بو و غیره)
تأسیسات فاضلاب صنعتی	وجود یا عدم وجود تأسیسات پیش‌تصفیه یا تصفیه فاضلاب	تأسیسات تصفیه یا پیش‌تصفیه نحوه دفع فاضلاب فاصله کارخانه تا نزدیک‌ترین خط شبکه فاضلاب‌روی شهری

۲-۳- ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه با روش RAMCAP

یکی از روش‌های ارزیابی ریسک شبکه‌های آب و فاضلاب مدل RAMCAP است (ASEM., 2006). همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده‌شده است، این روش هفت گام اساسی به‌شرح زیر دارد.

گام اول: ارزیابی و شناسایی ارزش دارایی‌ها: لوله‌ها به‌عنوان دارایی شبکه انتخاب شدند. لوله‌های انتخاب‌شده، مواردی هستند که به نقاط یا آدم‌روهایی که تخلیه صنعتی وارد شبکه می‌شود، متصل شده‌اند. در این پژوهش از میان حدود ۲۶۳۶ لوله شبکه فاضلاب در منطقه، فاضلاب صنایع به ۷۵ لوله تخلیه می‌شود که در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. سپس سطح اهمیت ریسک لوله‌ها براساس قطر در بازه ۲۵۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر به سه دسته کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شده است. هم‌چنین فاصله صنایع تا نقطه تخلیه به شبکه، برای همه صنایع بین ۱۰ تا ۸۰۰ متر درنظر گرفته شده است.

جدول ۲- دارایی‌های شبکه جمع‌آوری فاضلاب

ردیف	آدم‌رویی که فاضلاب صنعتی وارد می‌شود	لوله‌ی دارای آلودگی	قطر لوله (mm)	ردیف	آدم‌رویی که فاضلاب صنعتی وارد می‌شود	لوله‌ی دارای آلودگی	قطر لوله (mm)
۱	C101	P4C101	۲۵۰	۳۸	C305	P4C305	۲۵۰
۲	C108	P4C108	۳۰۰	۳۹	C317	P4C317	۲۵۰
۳	C111	P4C111	۳۰۰	۴۰	C318	P4C318	۲۵۰
۴	C116	P4C116	۲۵۰	۴۱	C331	P4C331	۳۰۰
۵	C120	P4C120	۳۰۰	۴۲	C359	P4C359	۴۰۰
۶	C222	P4C122	۴۰۰	۴۳	C360	P4C360	۴۰۰
۷	C132	P4C132	۲۵۰	۴۴	C364	P4C364	۴۰۰
۸	C143	P4C143	۲۵۰	۴۵	C366	P4C366	۴۰۰
۹	C147	P4C147	۲۵۰	۴۶	C414	P4C414	۴۰۰

ردیف	آدم‌رویی که فاضلاب صنعتی وارد می‌شود	لوله‌ی دارای آلودگی	قطر لوله (mm)	ردیف	آدم‌رویی که فاضلاب صنعتی وارد می‌شود	لوله‌ی دارای آلودگی	قطر لوله (mm)
۱۰	C149	P4C149	۲۵۰	۴۷	C419	P4C419	۲۵۰
۱۱	C151	P4C151	۲۵۰	۴۸	C437	P4C437	۵۰۰
۱۲	C152	P4C152	۲۵۰	۴۹	C438	P4C438	۵۰۰
۱۳	C158	P4C158	۲۵۰	۵۰	C458	P4C458	۲۵۰
۱۴	C161	P4C161	۲۵۰	۵۱	C461	P4C461	۲۵۰
۱۵	C174	P4C174	۳۰۰	۵۲	C466	P4C466	۲۵۰
۱۶	C180	P4C180	۴۰۰	۵۳	C474	P4C474	۲۵۰
۱۷	C182	P4C182	۴۰۰	۵۴	C479	P4C479	۲۵۰
۱۸	C189	P4C189	۲۵۰	۵۵	C485	P4C485	۲۵۰
۱۹	C192	P4C192	۲۵۰	۵۶	C486	P4C486	۲۵۰
۲۰	C198	P4C198	۳۰۰	۵۷	C487	P4C487	۲۵۰
۲۱	C204	P4C204	۳۰۰	۵۸	C648	P4C648	۶۰۰
۲۲	C216	P4C216	۲۵۰	۵۹	A1414	P4A1414	۶۰۰
۲۳	C219	P4C219	۲۵۰	۶۰	A1415	P4A1415	۶۰۰
۲۴	C237	P4C237	۲۵۰	۶۱	AM504	AM504	۷۰۰
۲۵	C232	P4C232	۴۰۰	۶۲	B242	P4B242	۴۰۰
۲۶	C241	P4C241	۴۰۰	۶۳	B429	P4B429	۲۵۰
۲۷	C243	P4C243	۴۰۰	۶۴	B564	P4B564	۵۰۰
۲۸	C250	P4C250	۲۵۰	۶۵	B589	P4B586	۳۰۰
۲۹	C253	P4C253	۲۵۰	۶۶	B595	P4B595	۳۰۰
۳۰	C253	P4C253	۲۵۰	۶۷	B598	P4B598	۳۰۰
۳۱	C256	P4C256	۲۵۰	۶۸	H101	P4H101	۲۵۰
۳۲	C270	P4C270	۲۵۰	۶۹	H130	P4H130	۱۲۰۰
۳۳	C286	P4C286	۴۰۰	۷۱	H131	P4H131	۱۲۰۰
۳۴	C290	P4C290	۲۵۰	۷۲	H133	P4H133	۱۲۰۰
۳۵	C301	P4C301	۵۰۰	۷۳	H134	P4H134	۱۲۰۰
۳۶	C302	P4C302	۷۰۰	۷۴	H137	P4H137	۱۲۰۰
۳۷	C303	P4C303	۷۰۰	۷۵	H274	P4H274	۱۲۰۰

گام دوم: شناسایی تهدیدها: نوع تهدیدها و ریسک‌های شبکه یا دارایی تعیین می‌شوند. در این پژوهش آلودگی شیمیایی ناشی از تخلیه فاضلاب صنعتی به‌عنوان یک تهدید انسان‌ساز برای تک‌تک دارایی‌ها مدنظر است.

گام سوم: تحلیل نتیجه: مقدار آسیب‌پذیری مالی و جانی ناشی از آلودگی شیمیایی به‌عنوان یک تهدید، تعیین می‌شود. در شبکه‌های فاضلاب بیش‌تر آسیب‌ها از نوع مالی و اغلب شامل خسارت ناشی از آلودگی‌های شیمیایی بر تأسیسات و خوردگی لوله‌های فاضلاب هستند. در این پژوهش مقدار هزینه آسیب ثابتی برای هر لوله در نظر گرفته شده است.

گام چهارم: ارزیابی آسیب‌پذیری: پتانسیل آسیب‌پذیری دارایی‌های بحرانی در برابر تهدیدهای شناسایی شده محاسبه می‌شود.

گام پنجم: ارزیابی تهدید: ارزیابی تهدید، احتمال یک حمله را محاسبه می‌کند.

گام ششم: ارزیابی ریسک: میزان ریسک ناشی از هر تهدید برای هر دارایی با معادله (۱) محاسبه و سپس مقادیر سطح ریسک برای هر دارایی مشخص می‌شود.

$$R = C \times V \times T \qquad (۱)$$

که R: ریسک[۸] یا خطرپذیری، C: پیامد[۹] یا نتیجه، V: آسیب‌پذیری[۱۰] و T: تهدید محتمل[۱۱] هستند.

گام هفتم: مدیریت ریسک: پس از آن‌که مقادیر دارای ریسک با پتانسیل بالا برای هر یک از لوله‌ها یا دارایی‌ها مشخص شد، لازم

است گزینه‌هایی برای کاهش ریسک به اجرا گذاشته شود. یکی از روش‌های بسیار کاربردی برای کاهش ریسک، ایجاد شبکه‌های پایش در شبکه است.

از آن‌جا که در این مقاله هدف ارزیابی دارایی‌ها، شناسایی تهدیدها و تعیین مقدار آسیب‌پذیری است، بنابراین گام‌های اول تا سوم انجام شده‌اند.

شکل ۲- فرایند ارزیابی ریسک با روش RAMCAP (ASEM, 2006)

۳- بحث و نتایج

۳-۱- صنایع موجود در منطقه

صنایع شناسایی‌شده از طریق کار میدانی و پرسشنامه، براساس طرح آمارگیری از کارگاه‌های صنعتی کشور، در ۱۰ دسته طبقه‌بندی شدند (جدول ۳).

جدول ۳- صنایع واقع در محدوده مطالعات

نوع صنعت	تعداد	درصد
غذایی و دارویی	۲۶	۳۲/۵
الکترونیک	۱۲	۱۵
ماشین‌سازی تجهیزات	۱۲	۱۵
پلاستیک و شیمیایی	۱۰	۱۲/۵
نساجی	۵	۶/۲۵
کاغذسازی	۴	۵
کانی فلزی	۴	۵
آرایشی و بهداشتی	۴	۵
کانی غیرفلزی	۲	۲/۵
چوب و سلولز	۱	۱/۲۵

۳-۲- شبیه‌سازی شبکه‌ی فاضلاب و موقعیت صنایع

محدوده مطالعات مطابق اطلاعات دریافتی از شبکه فاضلاب و استقرار و پراکنش صنایع موجود، منطقه به چهار زیرحوضه (A، B، C و H) شامل ۲۶۳۶ لوله و ۲۶۳۰ منهول تقسیم شد. پس از شبیه‌سازی شبکه، موقعیت جغرافیایی صنایع بر روی شبکه پیاده‌سازی شد (شکل ۳). بیش‌ترین تراکم صنایع به‌ترتیب در زیرحوضه‌های C، H، A و B است. سپس فاضلاب هر واحد صنعتی به نزدیکترین انشعاب شبکه فاضلاب متصل شد.

۳-۳- بار آلودگی و دبی فاضلاب صنایع

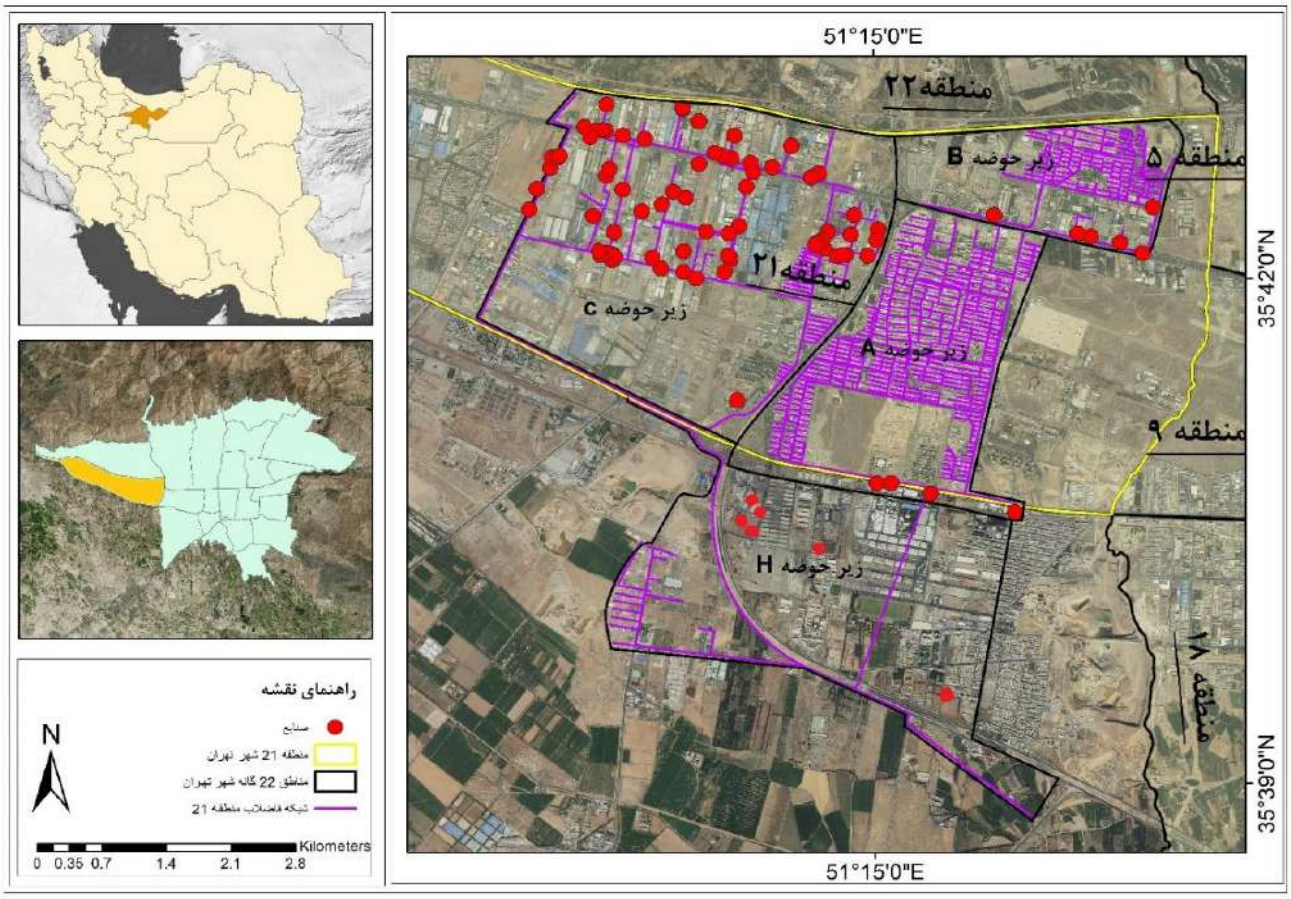
در این پژوهش دو ویژگی بار آلودگی و دبی برای فاضلاب هر صنعت درنظر گرفته شد. برآورد دبی فاضلاب صنایع با استفاده از داده‌های پرسشنامه و سرانه COD به‌عنوان یک شاخص کلیدی کیفیت فاضلاب از طریق پروفایل‌های صنعتی یا مقالات مشابه برای هر صنعت به‌دست آمد. جدول ۴ خلاصه این مقادیر را نشان می‌دهد.

۳-۴- ارزیابی آسیب‌پذیری

پس از تعیین موقعیت صنایع روی شبکه فاضلاب شهری و اتصال فاضلاب صنایع به آن، ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب براساس دارایی‌های شبکه و با هدف شناسایی نقاط با پتانسیل ریسک با استفاده از روش RAMCAP انجام شد. در این فرآیند لوله‌هایی انتخاب شداند که نقاط یا منهول‌های پذیرنده فاضلاب صنعتی به آن‌ها متصل هستند. لوله‌ها براساس قطر در محدوده

ریسک کم، متوسط، زیاد مطابق جدول ۵ رتبه‌بندی شدند. چرا که مطابق شکل ۳، با افزایش قطر لوله، میزان فاضلاب صنعتی دریافتی و در نتیجه احتمال آلودگی افزایش می‌یابد. مرتبط کردن ریسک آلودگی صنایع که دراین مطالعه خوردگی لوله‌ها است، تنها با درنظر گرفتن قطر لوله‌ها و با فرض ثابت بودن جنس لوله، سن آن، بازه‌های پایش و بهسازی آن بررسی شده است.

از مجموع ۸۰ منهول یا آدم‌رو که تخلیه صنعتی به آن‌ها انجام می‌شود، ۷۵ لوله به‌عنوان دارایی مهم و دربرگیرنده نقاط تخلیه در شبکه انتخاب شدند (جدول ۴). براساس نتایج ارزیابی آسیب‌پذیری، ۶ لوله شامل P4H13، P4H131، P4H133، P4CH134، P4H137 و P4H274 در زیرحوضه H اهمیت ریسک بالا دارند. از آن‌جا که فاضلاب سایر زیرحوضه‌ها به زیرحوضه H وارد و از آن‌جا به تصفیه‌خانه غرب منتقل می‌شود، مقادیر ریسک این لوله‌ها بالا است. هم‌چنین ۱۰ لوله P4C301، P4C302، P4C303، P4C437، P4C438، P4C648، P4A1414، P4A1415، AM504و P4B564 که شش تا در زیرحوضه C، سه تا در زیرحوضه A و یکی در زیرحوضه B هستند، ریسک متوسط و سایر لوله‌ها ریسک کم دارند (جدول ۶).



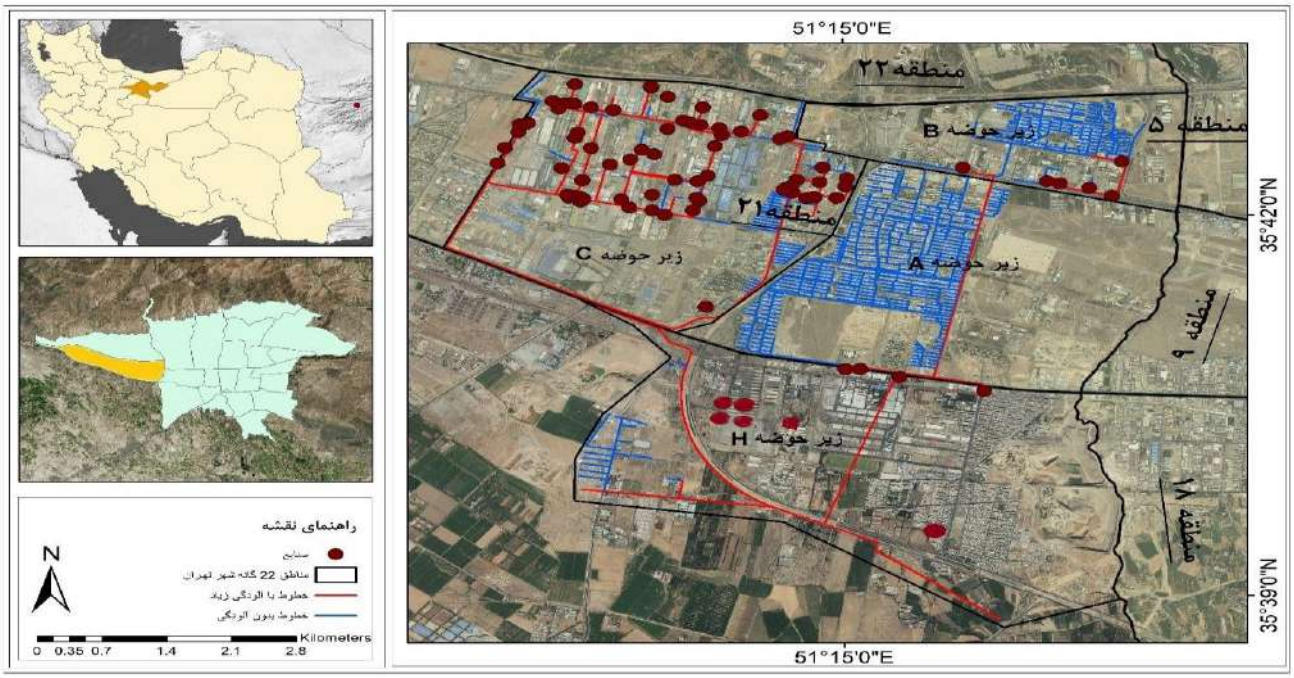
شکل ۳- مدل شبکه و موقعیت صنایع مورد مطالعه در شبکه فاضلاب

جدول ۴- سرانه COD صنایع مورد مطالعه

گروه صنعتی	COD (mg/l)	گروه صنعتی	COD (mg/l)
غذایی و دارویی	۲۲۰۰	کاغذسازی	۸۸۰۰
نساجی	۳۵۰۰	پلاستیک و شیمیایی	۸۵۷۸
چوب و سلولز	۱۲۰۰	کانی فلزی	۹۶۰
ماشین‌سازی و تجهیزات	۵۲۰۰	الکترونیک	۶۵۰
آرایشی و بهداشتی	۲۲۰۰	کانی غیرفلزی	۲۵۰

جدول ۵- محدوده ریسک و قطر لوله‌ها

محدوده ریسک	ریسک کم	ریسک متوسط	ریسک بالا
قطر لوله (mm)	۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰-۵۰۰	۱۵۰۰-۱۰۰۰



شکل ۴- نقاط دارای ریسک شبکه

جدول ۶- ریسک دارایی‌های شبکه فاضلاب در محدوده مطالعات

نوع دارایی	سطح ریسک	نوع دارایی	سطح ریسک	نوع دارایی	سطح ریسک
P4C182	ریسک کم	P4C101	ریسک کم	P4H130	ریسک بالا
P4C189	ریسک کم	P4C108	ریسک کم	P4H131	ریسک بالا
P4C192	ریسک کم	P4C111	ریسک کم	P4H133	ریسک بالا
P4C198	ریسک کم	P4C116	ریسک کم	P4H134	ریسک بالا
P4C204	ریسک کم	P4C120	ریسک کم	P4H137	ریسک بالا
P4C216	ریسک کم	P4C122	ریسک کم	P4H274	ریسک بالا
P4C219	ریسک کم	P4C132	ریسک کم	P4C301	ریسک متوسط
P4C237	ریسک کم	P4C143	ریسک کم	P4C302	ریسک متوسط
P4C232	ریسک کم	P4C147	ریسک کم	P4C303	ریسک متوسط
P4C241	ریسک کم	P4C149	ریسک کم	P4C437	ریسک متوسط
P4C243	ریسک کم	P4C151	ریسک کم	P4C438	ریسک متوسط
P4C250	ریسک کم	P4C152	ریسک کم	P4C648	ریسک متوسط
P4C253	ریسک کم	P4C158	ریسک کم	P4A1414	ریسک متوسط
P4C256	ریسک کم	P4C161	ریسک کم	P4A1415	ریسک متوسط
P4C270	ریسک کم	P4C174	ریسک کم	AM504	ریسک متوسط
P4C286	ریسک کم	P4C180	ریسک کم	P4B564	ریسک متوسط
P4C290	ریسک کم	P4C331	ریسک کم	P4B429	ریسک کم
P4C458	ریسک کم	P4C359	ریسک کم	P4B242	ریسک کم
P4C461	ریسک کم	P4C360	ریسک کم	P4H101	ریسک کم
P4C466	ریسک کم	P4C364	ریسک کم	P4B598	ریسک کم
P4C474	ریسک کم	P4C366	ریسک کم	P4C318	ریسک کم
P4C479	ریسک کم	P4C414	ریسک کم	P4C317	ریسک کم
P4C485	ریسک کم	P4C419	ریسک کم	P4C305	ریسک کم
P4C486	ریسک کم	P4B586	ریسک کم	P4B595	ریسک کم
P4C487	ریسک کم				

۴- نتیجه‌گیری

در طی دهه‌های اخیر با توسعه صنعت و فناوری، موضوع فاضلاب‌های صنعتی به یکی از چالش‌ها و مشکلات عمده محیط‌زیستی تبدیل شده است. در حال‌حاضر یکی از راه‌های مدیریت فاضلاب صنایع، اتصال آن‌ها به شبکه فاضلاب شهری است. از آن‌جا که فاضلاب‌های صنعتی از نظر تنوع، کیفیت و کمیت با فاضلاب‌های خانگی متفاوت هستند، تخلیه آن‌ها به شبکه‌های جمع‌آوری و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری ممکن است به دلیل تخریب تاسیسات، مشکلات بسیاری به‌وجود آورد که موجب اختلال در عملکرد آن‌ها شود. بنابراین ارزیابی آسیب پذیری و ریسک فاضلاب‌روهای شهری در برابر تخلیه فاضلاب‌های صنعتی ضروری است. در این پژوهش با استفاده از مدل RAMCAP آسیب‌پذیری شبکه جمع‌آوری فاضلاب در منطقه ۲۱ شهر تهران به‌عنوان یکی از مناطق مهم صنعتی کشور در شرایط مختلف تخلیه فاضلاب‌های صنعتی تحلیل شده است. بدین منظور در ابتدا با طراحی پرسشنامه و بازدید میدانی اطلاعات موردنیاز در زمینه موقعیت جغرافیایی، ویژگی‌ها و مشخصات فاضلاب تولیدی ۸۰ واحد صنعتی منتخب در ۱۰ گروه عمده گردآوری و طبقه‌بندی شد. از بین حدود ۲۶۳۶ لوله شبکه فاضلاب در منطقه مشخص شد که فاضلاب صنایع به ۷۵ لوله تخلیه می‌شود. سپس سطح اهمیت ریسک لوله‌ها براساس قطر در بازه ۲۵۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر به سه دسته کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شد. هم‌چنین فاصله صنایع تا نقطه تخلیه به شبکه، برای همه صنایع بین ۱۰ تا ۸۰۰ متر درنظر گرفته‌شده است. در این پژوهش دو ویژگی بار آلودگی و دبی برای فاضلاب هر صنعت با استفاده از داده‌های پرسشنامه و سرانه COD[12] به‌عنوان یک شاخص کلیدی کیفیت فاضلاب از طریق پرسشنامه برای هر صنعت به‌دست آمد. در نهایت و پس از ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب مشخص شد که ۶ لوله دارای اهمیت ریسک بالا، ۱۰ لوله ریسک متوسط و بقیه لوله‌ها از ریسک کمی در برابر تخلیه‌های صنعتی برخوردار هستند. علاوه‌بر این، نتایج نشان داد که مهم‌ترین مخاطرات ناشی از تخلیه فاضلاب‌های صنعتی به شبکه فاضلاب شهری، تغییر شدید کیفیت فاضلاب ناشی از تخلیه‌های صنعتی است.

۵- پی‌نوشت‌ها

1- Risk Analysis and Management for Critical Asset Protection
2- Failure Modes and Effects Analysis
3- Simple Additive Weighting
4- Fuzzy Inference System
5- Analytical Hierarchy Process
6- Geographic Information System
7- Data Envelopment Analysis
8- Risk
9- Consequence
10- Vulnerability
11- Threat Likelihood
12- Chemical Oxygen Demand

۶- مراجع

امینی، م.ر.، و حاجی‌کندی، ه.، (۱۴۰۰)، "ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌های فاضلاب با روش تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: شبکه فاضلاب اجرا شده در بخشی از منطقه ۵ شهرداری تهران"، *مجله پژوهش‌های آب ایران*، ۱۵(۲)، ۴۱-۵۳، http://doi.org/10.22112/jwwse.2021.286010.1275

عسکریان، م.، تابش، م.، و روزبهانی، ا.، (۱۳۹۴)، "ارزیابی ریسک عملکرد شبکه جمع‌آوری فاضلاب با استفاده از روش تصمیم‌گیری فازی"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۶، ۷۴-۸۷، http://doi.org/10.22112/wwj-volume-74-87.

روزبهانی، ع.، زهرایی، ب.، و تابش، م.، (۱۳۹۴)، "تحلیل ریسک کمیت و کیفیت آب در سیستم‌های تامین آب شهری با درنظر گرفتن عدم قطعیت‌ها"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۴(۴)، ۲-۱۴.

Anbari, M.J., Tabesh, M., and Roozbahani, A., (2018), "Risk assessment model to prioritize sewer pipes inspection in wastewater collection", *Journal of Environmental Management*, 190, 91-101, http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.052

Asghari, F., Piadehm, F., Behzadian, K., (2023), "Resilience assessment in urban water infrastructure: A critical riview of approaches, strategies and applications", *Sustainability*, 15(14), 11151, https://doi.org/10.3390/ su151411151.

ASME, (2006), *RAMCAP: Risk analysis and management for critical asset protection-version 2.0*, Innovative Technologies Institute, LLC, Washington DC.

Aven, T., (2011), "On some recent definitions and analysis frameworks for risk, vulnerability and resilience", *Journal of Risk Analysis*, 31, 515-522. http://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01528.x.

Brashear, J., Olstein, M., Binning, D., and Stenzler, J., (2010), *Risk analysis and management for critical asset protection for the water and wastewater sector*, 2nd Edition, WEF, USA, http://doi.org/10.1111/risa.12844.

Fan, X., and Yu, X., (2022),"An innovative machine learning based framework for water distribution network leakage detection and localization", *Journal*

Structural Health Monitoring, 21, 1626-1644, http://doi.org/10.1177/14759217211040269.

Federal Emergency Management America (FEMA), (2003), "Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks", *Journal Risk Management Series*, 54, 145-254, http://doi.org/10.1111/h.1258-65421.

Ghoreishi, M., Vahidnia, M.H., and Neshat, A., (2023). "Evaluation of failure risk in the sewerage system using Bayesian network and spatial multi-criteria decision making", *Journal of Application of Geographical Information System and Remote Sensing in Planning*, 14(Spring), 107234, http://doi.org/10.1016/J.PSEP.2023.10.036.

Lee, M., McBean, E., Ghazali, M., Schuster, C., and Huang, J., (2018), "Fuzzy-logic modeling of risk assessment for a small drinking-water supply system", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(6), 547- 552, http://doi.org/10.1177/0037549717738351.

Nurollahi, H., Barzegar, A., Abadian, F.E., Soleimani, A., and Alikhani, A., (2015), "Developing a new model for risk assessment, combining critical infrastructure studies and spatial planning criteria", *Journal of Emergency Management*, 48, (7), 47-56, http://doi.org/10.1180/1040844.20.

Sadiq, R., Rodríguez, M., and Tesfamariam, S., (2020), "Integrating indicators for performance assessment of small water utilities using ordered weighted averaging (OWA) operators", *Journal of Expert Systems with Application*, 37, 4881-4891, http://doi.org/10.3390/math8101729.

Salman, B., and Salem, O., (2012), "Risk assessment of wastewater collection lines using failure models and criticality ratings", *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 3(3), 68-76, http://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000100.

Saskia, F., Liza, B., Wibke, B., and Eric, C., (2022), "A risk-based assessment approach for chemical mixtures from wastewater treatment plant effluents", *Environment International*, 164, 107234. http://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107234.

Tchorzewska, B., (2019), "Fuzzy failure risk analysis in drinking water technical system", *Reliability: Theeory & Applications*, 1(20), 138-148, http://doi.org/10.1515/jok-2019-0032

Torres, J., Brumbelow, K., and Guikema, S., (2009), "Risk classification and uncertainty propagation for virtual water distribution systems", *Journal of Reliability Engineering and System Safety*, 94, 1259-1273, http://doi.org/10.1016/j.ress.2009.01008.

Wang, L.K., and Hung, Y.T., (2004), *Handbook of industrial and hazardous wastes treatment*, 2nd Revision, CRC Press, USA.

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

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 10, No. 1, PP. 41-48, Spring 2025
DOI: 10.22112/jwwse.2024.469397.1410

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال دهم، شماره ۱، صفحات ۴۱-۴۸، بهار ۱۴۰۴

Research Paper

Performance Evaluation of a Microbial Desalination Cell Using Bio-Cathode for the Treatment of Saline Water

Raoof Rabiee[1] and Seyed Morteza Zamir[2*]
1- M.Sc., Biochemical Engineering Department, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2- Associate Professor, Biochemical Engineering Department, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
*Corresponding Author, Email: zamir@modares.ac.ir

Received: 25/07/2024
Revised: 10/11/2024
Accepted: 30/11/2024
© IWWA

Abstract

Microbial Desalination Cells (MDCs) represent a novel and sustainable technology that uses the metabolic activities of microorganisms for electricity generation, wastewater treatment, and seawater desalination. This technology provides a promising solution to the growing global water scarcity issue through an environmentally friendly process. In this study, the performance of a MDC with two types of bio-cathodes, activated sludge and microalgal *Chlorella vulgaris*, was evaluated for the desalination of saline water. The highest desalination efficiency in the MDC with an aerobic sludge cathode was 75%, with a maximum salt removal rate of 0.72 $g.L^{-1}.h^{-1}$. In contrast, the MDC with an algal cathode achieved a desalination efficiency of 61%, with a maximum salt removal rate of 0.41 $g.L^{-1}.h^{-1}$. Furthermore, the maximum power densities of 456 and 841 $mW.m^{-2}$ were obtained for the MDC with *Chlorella vulgaris* and activated sludge, respectively. The presence of a diverse and metabolically active microbial community within the activated sludge could significantly enhance the electron uptake capacity in the cathode chamber due to the higher ability to regenerate the final electron acceptor reaction.

Keywords: Current density, Microbial desalination cell, Bio-cathode, *Chlorella vulgaris*, Desalination

مقاله پژوهشی

ارزیابی عملکرد یک پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد زیستی برای نمک‌زدایی از آب شور

رئوف ربیعه[۱] و سیدمرتضی ضمیر[۲*]
۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی-بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۲- دانشیار گروه مهندسی شیمی-بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
*نویسنده مسئول، ایمیل: zamir@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۴
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

پیل‌های نمک‌زدایی میکروبی یک فناوری جدید و پایدار هستند که از فعالیت‌های متابولیکی ریزاندامگان‌ها برای تولید الکتریسیته، تصفیه فاضلاب و نمک‌زدایی آب دریا استفاده می‌کنند. این فناوری راه‌حلی امیدوارکننده برای رسیدگی به مسئله رو به رشد کمبود آب جهانی از طریق فرآیندی سازگار با محیط‌زیست ارائه می‌دهد. در این مطالعه، عملکرد یک پیل نمک‌زدایی میکروبی با دو کاتد زیستی، شامل لجن هوازی و ریزجلبک *کلرلا ولگاریس* که برای نمک‌زدایی آب شور مورد ارزیابی قرارگرفت. بیشترین بازده نمک‌زدایی در پیل با کاتد لجن هوازی به‌میزان ۷۵٪ و با حداکثر نرخ حذف نمک ۰/۷۲ گرم در لیتر در ساعت به‌دست آمد. در حالی‌که در پیل با کاتد جلبکی، بازده نمک‌زدایی ۶۱٪ و حداکثر نرخ حذف نمک ۰/۴۱ گرم در لیتر در ساعت ثبت شد. علاوه‌بر این، حداکثر چگالی توان برای پیل با ریزجلبک *کلرلا ولگاریس* و لجن هوازی به‌ترتیب برابر با ۴۵۶ و ۸۴۱ میلی وات بر مترمربع بود. حضور جامعه میکروبی متنوع و فعال متابولیکی در لجن هوازی که قابلیت احیای واکنش نهایی دریافت الکترون را دارند در اتاقک کاتد و روی سطح الکترود آن می‌توانند ظرفیت دریافت الکترون را در اتاقک کاتد به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند.

کلمات کلیدی: چگالی جریان، پیل نمک‌زدای میکروبی، کاتد زیستی، *کلرلا ولگاریس*، نمک‌زدایی.

۱- مقدمه

تقاضای جهانی برای دسترسی به آب شیرین هر روز درحال افزایش است. در نقاطی که عرضه از تقاضا پیشی بگیرد، نابرابری‌های اجتماعی و اقتصادی موجود را تشدید می‌کند (Eke et al., 2020). ایران نیز به‌عنوان کشوری که با خشکسالی‌های پیاپی و طولانی دست به گریبان است، از این قاعده مستثنا نیست. به‌نظر می‌رسد نمک زدایی از آب دریا برای تامین بخشی از نیاز به آب شیرین ضروری است و به‌صورت پایدار می‌تواند کمبود آب را در مناطق خشک جبران کند. به‌همین دلیل فناوری‌های نمک‌زدایی از آب دریا بسیار رواج یافته است (Eke et al., 2020; Ahmed et al., 2021). فناوری‌های رایج نمک‌زدایی آب، مقدار زیادی انرژی مصرف می‌کنند که نگران کننده است، زیرا این انرژی از مصرف سوخت‌های فسیلی حاصل شده‌است که خود پیامدهای محیط‌زیستی خاصی را به‌همراه دارد (Ahmed et al., 2021). نمک‌زدایی آب دریا به‌کمک انرژی های تجدیدپذیر نه تنها به‌عنوان یک منبع قابل اعتماد برای تولید آب در مناطقی با منابع آب شیرین محدود قابل استفاده هستند، بلکه ردپای کربن فرآیند نمک‌زدایی را کاهش می‌دهد و آن را دوست‌دار محیط‌زیست می‌کند (Ahmed et al., 2021).

در سال‌های اخیر سامانه‌های الکتروشیمیایی زیستی[1] به‌عنوان یک فناوری مبتنی بر تصفیه فاضلاب، برای تولید پساب تصفیه شده و انرژی سبز بسیار مورد توجه بوده‌اند. پیل نمک‌زدای میکروبی (MDC)[2]، یک نوع سامانه الکتروشیمیایی زیستی است که در آن از مواد آلی به‌عنوان منبع انرژی برای نمک‌زدایی آب استفاده می‌شود. این نوع سامانه نمک‌زدایی، با استفاده از گرادیان پتانسیل الکتریکی که توسط باکتری‌های فعال الکتریکی [3] ایجاد می‌شود، باعث انتقال یون‌های موجود در آب از طریق غشاهای تبادل یونی و در نتیجه نمک‌زدایی از آن می‌شود (Al-Mamun et al., 2018). پیل‌های نمک‌زدای میکروبی به‌طور کلی از سه اتاقک آندی، نمک‌زدای میانی و کاتدی تشکیل شده است. این سه اتاقک با یک غشای تبادل آنیونی[4] و یک غشای تبادل کاتیونی[5] از هم جدا می‌شوند. در اتاقک آند، باکتری‌های فعال الکتریکی با تخریب زیستی ترکیبات آلی، الکترون و پروتون تولید می‌کنند. الکترون‌ها به‌وسیله یک مدار خارجی به الکترود کاتد منتقل می‌شوند و سپس برای احیای گیرنده‌های الکترونی در اتاقک کاتد استفاده می‌شوند. هم‌زمان با انتقال الکترون، یون‌های آنیون و کاتیون در اتاقک نمک‌زدایی با عبور از سطح مقطع غشاهای تبادل آنیونی و کاتیونی، به‌ترتیب به داخل محفظه‌های آند و کاتد مهاجرت می‌کنند تا تعادل بار الکتریکی خالص پیل نمک‌زدای میکروبی را حفظ کنند. این سازوکار، پیل نمک‌زدای میکروبی را قادر می‌سازد تا هم‌زمان با تولید جریان الکتریکی، آب شور را بدون هیچ منبع انرژی خارجی نمک‌زدایی کند (Al-Mamun et al., 2018).

پذیرنده نهایی الکترون در اتاقک کاتدی در پیل‌های نمک‌زدایی میکروبی، نقش کلیدی در عملکرد و کارایی پیل دارد. غلظت و نوع پذیرنده الکترون، عملکرد کاتالیزوری، ساختار الکترود و توانایی کاتالیزوری آن، عملکرد کاتد را تحت‌تاثیر قرار می‌دهند. معمولا کاتدهایی که در پیل نمک‌زدای میکروبی استفاده می‌شوند، موادی مانند فری‌سیانید یا کاتد هوا با کاتالیزورهای پلاتین و غیره هستند (Saeed et al., 2015). با این‌حال، مشکل این کاتدها، استفاده از مواد شیمیایی به‌عنوان کاتولیت و یا کاتالیزور است که برای حفظ یک شرایط عملیاتی پایدار، نیازمند جایگزینی مستمر است. هم‌چنین پلاتین برای کاربرد در مقیاس وسیع بسیار گران است. برای حل این مسائل، می‌توان از یک کاتد زیستی استفاده کرد. الکترود موجود در محفظه کاتدی، از جامعه میکروبی موجود در سطح آن یا در کاتولیت استفاده می‌کند تا واکنش‌های احیای کاتد را کاتالیز کند (Sadeq et al., 2023). در این مورد، ریزاندامگان‌ها به‌عنوان کاتالیزورهای زیستی، در نقش واسطه برای احیای اکسنده‌ها عمل می‌کنند. استفاده از کاتد زیستی به‌عنوان کاتالیزور در پیل نمک‌زدای میکروبی به‌علت خود بازسازی و پایداری به‌طور فزاینده‌ای موردتوجه قرار گرفته‌است (Sadeq et al., 2023). به‌طور مثال، Ebrahimi et al. (2018) با جایگزینی کاتولیت‌های سمی با فاضلاب هوازی به‌عنوان کاتد زیستی، چگالی توان ۳۲/۶ وات بر مترمکعب و درصد نمک‌زدایی ۷۸/۱ ٪ را به‌دست آوردند که به‌میزان قابل‌توجهی نسبت به کاتدهای بافری بیشتر بود. هم‌چنین Zamanpour et al. (2017) عملکرد یک پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد زیستی جلبکی که آند آن با پساب صنایع لبنیات خوراک‌دهی شده است را بررسی کردند. در محفظه کاتد، از ریزجلبک *کلرلا ولگاریس* (*Chlorella vulgaris*) با یک محیط کشت مصنوعی استفاده شد. در این مطالعه سرعت حذف نمک ۰/۳۴۱ گرم بر لیتر بر روز بود که ۱/۵ برابر بیشتر از پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد هوا بود.

ریزجلبک کلرلا ولگاریس و لجن هوازی هرکدام ویژگی‌های خاص خود را دارند که در پیل‌های نمک‌زدای میکروبی نقش مهمی ایفا می‌کنند. کلرلا ولگاریس، یک جلبک سبز تک‌سلولی است که قادر به فتوسنتز است و در کاتد پیل‌های میکروبی

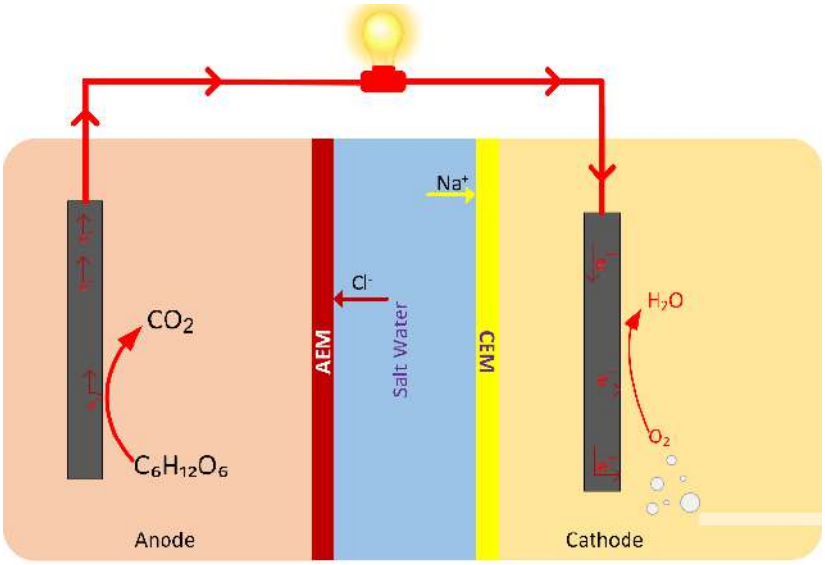
می‌تواند اکسیژن تولید کند. این اکسیژن به فرآیندهای الکتروشیمیایی در کاتد کمک کرده و باعث بهبود تولید ولتاژ و افزایش کارایی در حذف نمک از فاضلاب می‌شود. هم‌چنین، کلرلا ولگاریس توانایی جذب دی‌اکسید کربن و تبدیل آن به ترکیبات مفید را دارد که این ویژگی آن را برای استفاده در فرآیندهای تصفیه و تولید انرژی بسیار مناسب می‌سازد (Kokabian et al., 2015). از سوی دیگر، لجن هوازی که شامل باکتری‌ها و ریزاندامگان‌های متنوع است که می‌توانند مسیرهای متابولیکی مختلفی را در پیش گیرند تا واکنش نهایی احیای اکسیژن را پیش ببرند (Ebrahimi et al., 2018). استفاده از لجن هوازی در این پیل‌ها همچنین به کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهبود تجزیه مواد آلی کمک می‌کند. در مجموع، استفاده از این دو عامل (ریزجلبک‌ها و لجن هوازی) باعث افزایش بازده سیستم نمک‌زدایی می‌شود و از آن برای تصفیه فاضلاب و تولید برق به‌طور همزمان استفاده می‌شود. هدف از این مطالعه بررسی اثر کاتدهای زیستی مختلف با استفاده از لجن هوازی و ریزجلبک *کلرلا ولگاریس* به‌عنوان کاتد زیستی بر عملکرد یک MDC در تصفیه آب شور است.

۲- مواد و روش‌ها

پیل نمک‌زدای میکروبی ساخته شده در این پژوهش دارای سه اتاقک آند، کاتد و نمک‌زدا از جنس پلکسی گلس بود (شکل ۱). سطح مقطع هر سه اتاقک یکسان و برابر با ۸×۸ سانتی مترمربع با ضخامت ۳، ۳ و ۱ سانتی‌متر به‌ترتیب برای اتاقک‌های آند، کاتد و نمک‌زدا بود. اتاقک‌های آند و نمک‌زدا توسط غشای تبادل آنیونی (Mega, Czech Republic) و اتاقک‌های نمک‌زدا و کاتد توسط غشای تبادل کاتیونی (Mega, Czech Republic) از هم جدا شدند. برای آب‌بندی کلیه اتاقک‌ها از واشرهای پلی‌وینیل کلراید استفاده‌شد. در پیل‌های ساخته‌شده در این پژوهش در هر دو اتاقک آند و کاتد از نمد کربنی به‌عنوان الکترود با سطح مقطع ۱۶ سانتی‌متر مربع عاری از کاتالیست (AvCarb® G475A, USA) به‌دلیل داشتن تخلخل بالا برای تشکیل مناسب و موثر بیوفیلم بر روی سطح آن و انتقال خوب الکترون استفاده شد. دو الکترود توسط سیم تیتانیومی برای جمع‌آوری جریان متصل شدند.

در اتاقک آندی از مخلوط حاصل از نمونه لجن هاضم بی‌هوازی و لجن برگشتی از ته‌نشینی ثانویه واحد شماره ۶ تصفیه‌خانه فاضلاب تهران با درصد جامدات خشک برابر با ۹ درصد به‌عنوان مایه تلقیح استفاده شد. محیط کشت در اتاقک آند نیز حاوی ترکیبات زیر بود (در یک لیتر): KH_2PO_4 ۴/۴ گرم، K_2HPO_4 ۴/۳ گرم، NH_4Cl ۱/۵ گرم، $MgSO_4.7H_2O$ ۰/۰۵ گرم، $CaCl_2$ ۰/۱ گرم، KCl ۰/۱ گرم، ۱ میلی‌لیتر ویتامین و یک میلی‌لیتر محلول عناصر کم‌مقدار (Rabiee et al., 2022).

در این تحقیق از الکترولیت‌های متفاوت برای استفاده در اتاقک کاتد استفاده شد. در پیل MDC#1، کاتد جلبکی شامل ریزجلبک کلرلا ولگاریس با غلظت تلقیحی ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بود که در محیط کشت سترون شده با ترکیب غلظتی تعیین‌شده توسط کوکبیان و همکاران (Kokabian et al., 2015) قرار داشت. اتاقک کاتدی MDC#2 حاوی لجن هوازی با محیط کشت مشابه اتاقک آندی بود. در اتاقک نمک‌زدایی از آب شور با میزان ۳۵ گرم بر لیتر NaCl در کلیه آزمایش‌ها استفاده شد.



شکل ۱- شماتیکی از سامانه پیل نمک‌زدای میکروبی مورد استفاده در این پژوهش

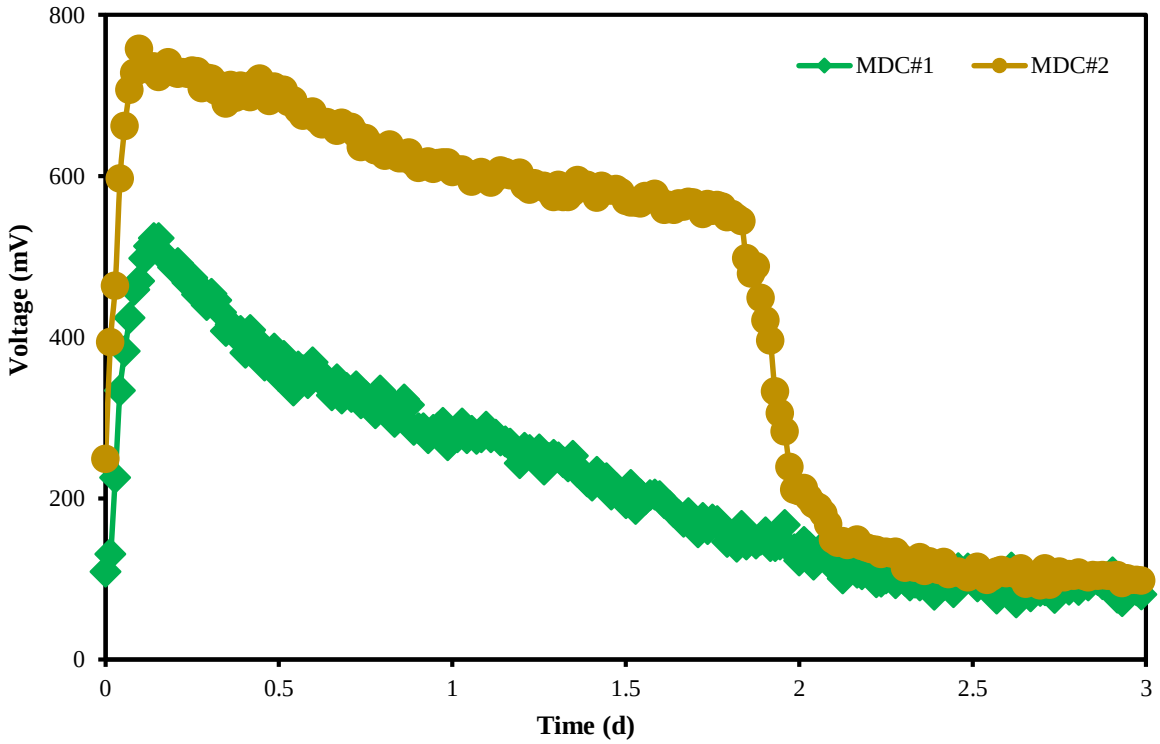
تغییرات هدایت الکتریکی [۶] (EC) محلول آب شور به‌عنوان معیاری از تغییر غلظت نمک هر ۲۴ ساعت در اتاقک میانی نمک‌زدا به‌وسیله دستگاه EC سنج (Testo 252, Germany) اندازه‌گیری شد (Rabiee et al., 2022). تغییرات غلظت مواد آلی برحسب میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی [۷] (COD) از طریق اندازه‌گیری غلظت گلوکز در اتاقک آند با استفاده از کیت رنگ‌سنجی گلوکز اکسیداز (پارس آزمون، ایران) صورت‌گرفت (Rabiee et al., 2022). تغییرات pH هر ۲۴ ساعت در اتاقک‌های کاتد وآند به وسیله دستگاه pH سنج (pH220L, istek, South Korea) اندازه‌گیری شد. کلیه آزمایش‌ها در دمای ۲ ± ۲۷ درجه سلسیوس انجام شدند. بدین‌منظور، همه پیل‌ها داخل یک انکوباتور ساخته‌شده در آزمایشگاه قرار داده شده بودند.

همه پیل‌ها ابتدا در حالت ناپیوسته خوراک‌دهی شده چرخه‌ای، به‌مدت ۳۰ روز برای دستیابی به ولتاژ پایدار راه‌اندازی شد. الکترولیت‌ها در هر پیل به‌طور کامل هر ۷۲ ساعت به‌دلیل تجمع ترکیبات حدواسط تولیدشده و نوسان قابل توجه pH در کاتد و آند تعویض می‌شدند. ولتاژ در یک مقاومت خارجی ثابت (R_e) هر ۲۰ دقیقه توسط یک دیتالاگر ثبت می‌شد. چگالی جریان و توان نرمال شده به‌ازای سطح الکترود آند ($A.m^{-2}$) با استفاده از قانون اهم $I = V/R_e$ و $P = V \times I$ محاسبه شدند. برای هر پیل و پس از رسیدن به یک ولتاژ پایدار، منحنی‌های قطبش [۸] با تغییر مقاومت خارجی از ۵۰۰۰ به ۵ اهم به‌دست آمدند.

۳- نتایج و بحث

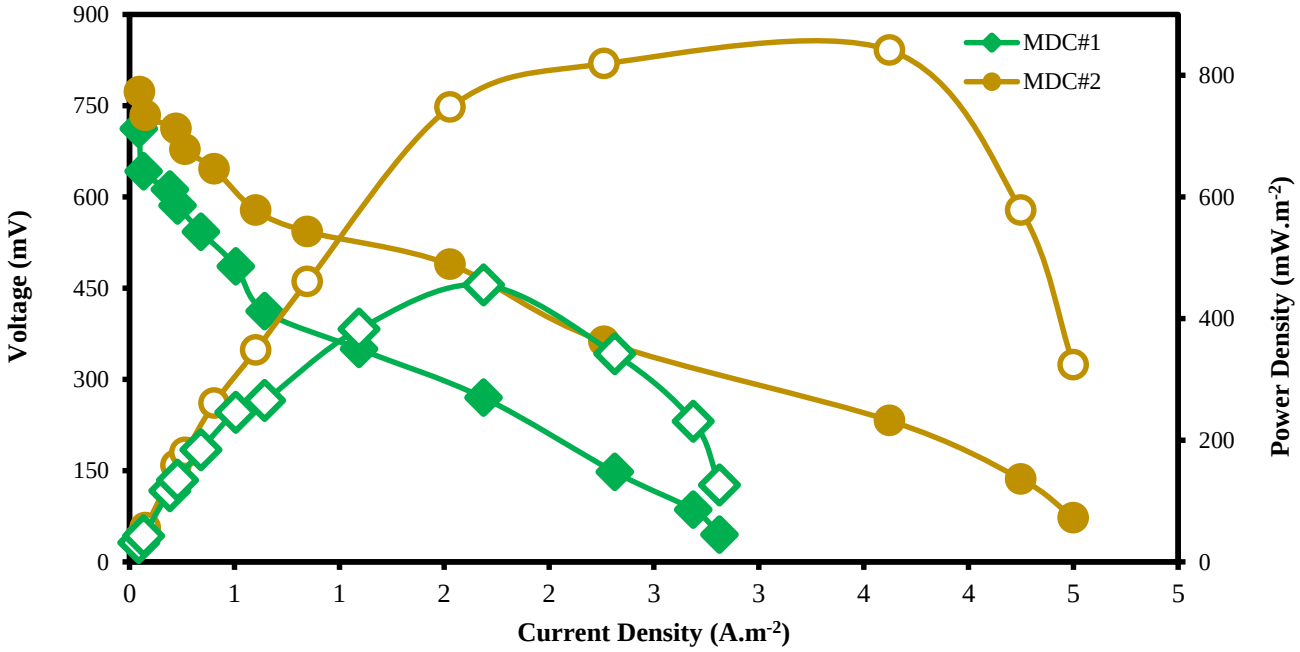
۳-۱- بررسی میزان تولید الکتریسیته در کاتدهای مختلف

برای سنجش جریان و اختلاف پتانسیل الکتریکی تولیدی در هر چرخه، عملکرد پیل‌ها با مقاومت ثابت ۵۰۰ اهم در حالت مدار بسته (CCV) هر ۲۰ دقیقه یک‌بار ارزیابی شد. هر دو پیل در شرایط مدار باز به مدت ۱۲ روز بدون تولید جریان برای سنجش ولتاژ مدار باز (OCV) استفاده شدند. مطابق شکل ۱ در یک چرخه ۷۲ ساعته (۳ روزه) حداکثر OCV برای کاتد جلبکی (MDC#1) و کاتد زیستی (MDC#2) به‌ترتیب برابر با ۷۴۹ و ۸۷۶ میلی‌ولت بود و حداکثر CCV به‌ترتیب ۵۲۳ و ۷۵۸ میلی‌ولت به‌دست آمد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده‌شده است و با توجه به تغییرات ولتاژ خروجی پیل، به‌دلیل تعویض الکترولیت‌ها ولتاژ به‌طور قابل‌توجهی به بیشترین سطح خود در ابتدای چرخه افزایش می‌یافت. سپس در پایان هر چرخه، به‌دلیل کاهش غلظت نمک در اتاقک میانی، ولتاژ به‌طور قابل‌توجهی به پایین‌ترین سطح خود یعنی ۹۳ و ۹۶ میلی‌ولت به‌ترتیب برای MDC#1 و MDC#2 می‌رسید. Kokabian et al. (2015) نتایج مشابهی از عملکرد کاتد زیستی گزارش کرده‌اند، به‌طوری که حداکثر میزان ولتاژ تولیدی در حالت مدار بسته توسط پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد میکروجلبک *کلرلا ولگاریس* برابر با ۱۳۸ میلی‌ولت بود که به‌طور قابل‌توجهی از نتایج این مطالعه کمتر است.



شکل ۲- نمودار ولتاژ خروجی پیل در طول زمان برای پیل با کاتد جلبکی و فاضلاب

کاهش تدریجی جریان تولیدی به مرور زمان، عمدتا به‌دلیل کاهش تدریجی غلظت نمک در اتاقک میانی و به‌تبع آن افزایش مقاومت درونی مربوط می‌شود. علاوه‌بر آن، نوسان pH در اتاقک‌های کاتد و آند و کاهش منبع کربن در اتاقک‌ها باعث کاهش فعالیت باکتری‌ها شده که منجر به کاهش تولید جریان می‌شود (Ebrahimi et al., 2018). منحنی‌های قطبش و چگالی توان در شکل ۳ نشان‌داده شده‌اند. حداکثر چگالی توان برای MDC#1 و MDC#2 به‌ترتیب ۴۵۶ و ۸۴۱ میلی‌وات بر مترمربع بود. حضور جامعه میکروبی متنوع و فعال متابولیکی که قابلیت احیای واکنش نهایی دریافت الکترون را دارند در اتاقک کاتد و روی سطح الکترود آن می‌توانند ظرفیت دریافت الکترون را در اتاقک کاتد به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند، که این میزان توان و ولتاژ بالاتر به‌دست آمده در MDC#2 را توجیه می‌کند (Kokabian et al., 2015).

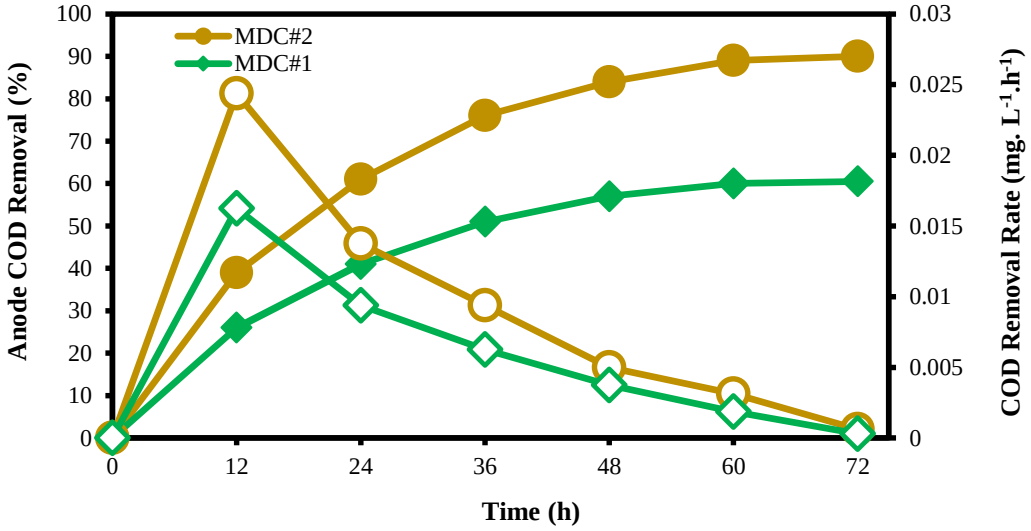


شکل ۳- نمودار چگالی توان (توخالی) و قطبش (توپر) برای پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد جلبکی و فاضلاب

۳-۲- مقایسه و بررسی میزان حذف COD

در شکل ۴، میزان حذف و نرخ حذف بار آلی در طول زمان در یک چرخه ناپیوسته ، نشان داده‌شده است. میانگین حذف بار آلی در MDC#1 و MDC#2 برابر با ۶۰/۹ و ۹۰/۱ درصد بود. بالاتر بودن میزان حذف بار آلی در MDC#2 نسبت به پیل با کاتد جلبکی (MDC#1)، به‌دلیل استفاده از گیرنده‌های الکترون موثر و متنوع مانند اکسیژن و فاضلاب در محفظه کاتدی است که باعث می‌شوند الکترون‌های دریافت‌شده از الکترود کاتد بلافاصله تخلیه شده و نیروی محرکه قابل‌توجهی برای دریافت الکترون‌ها از آند در حالت مدار بسته ایجاد شود (Pandit et al., 2011).

استفاده از گیرنده‌های الکترون موثر مانند اکسیژن و فاضلاب در محفظه کاتدی، حذف COD را در آند تسهیل می‌کند. ریزاندامگان می‌توانند الکترون‌های دریافت شده از الکترود کاتد را بلافاصله تخلیه‌کرده و نیروی محرکه قابل‌توجهی برای دریافت الکترون‌ها از آند در حالت مدار بسته ایجاد کنند (Pandit et al., 2011). بنابراین، این نیروی محرکه باعث فعالیت بیشتر ریزاندامگان‌ها و درنتیجه منجر به افزایش تجزیه زیستی بار آلی در محفظه آند می‌شود (Ebrahimi et al., 2018). میزان نرخ حذف بار آلی در ساعت‌های اولیه چرخه، برای MDC#1 و MDC#2به‌ترتیب برابر با ۰/۰۱۶ و ۰/۰۲۴ گرم برلیتر بر ساعت بود. همان‌طور که در شکل ۴ نشان‌داده شده است، میزان نرخ حذف بار آلی با گذشت زمان کاهش می‌یابد تا این‌که به حداقل مقدار خود یعنی نزدیک به صفر در هر دو پیل می‌رسد. این اتفاق عمدتا به‌دلیل مصرف گلوکز و آزادسازی پروتون توسط ریزاندامگان به‌مرور زمان در هر چرخه، محیط محفظه آند اسیدی شده و باعث کاهش فعالیت ریزاندامگان‌های حاضر در آند شده و بازده حذف بار آلی را کاهش می‌دهد (Zamanpour et al., 2017). بالابودن حذف بار آلی توسط سامانه پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد لجن هوازی در مطالعه دیگری نیز تأیید شده است، به‌طوری‌که در آن مطالعه درصد حذف بار آلی تا ۸۰ درصد گزارش شده است می‌شود (Ebrahimi et al., 2018).

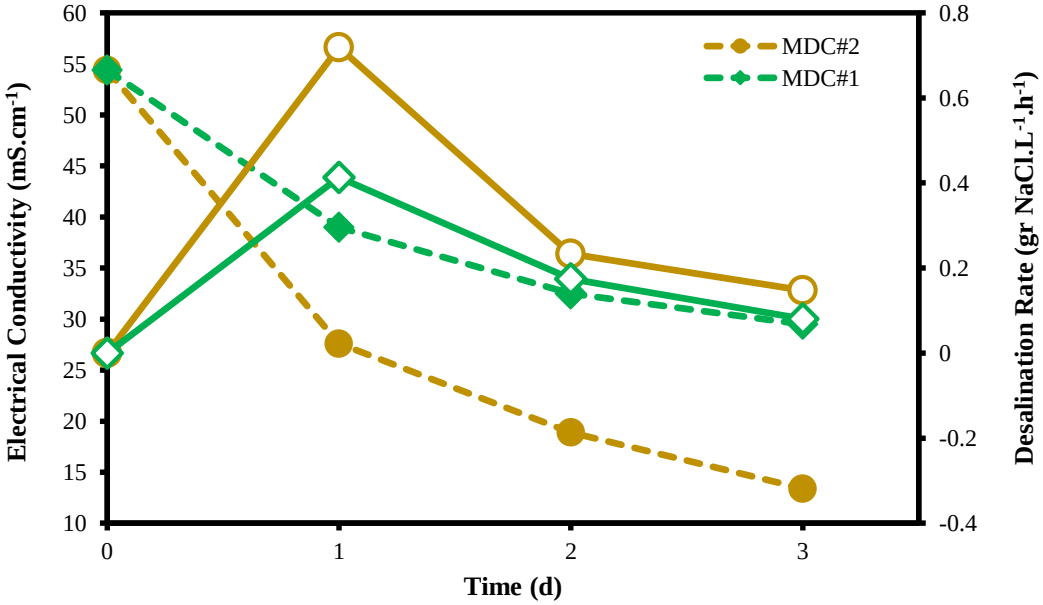


شکل ۴- نمودار تغییرات غلظت نمک (توپر) و نرخ نمک‌زدایی (توخالی) در محفظه میانی برای پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد زیستی

۳-۳- بررسی بازده نمک‌زدایی و تغییرات pH

شکل ۵، تغییرات غلظت محلول آب شور در هر دو پیل با کاتد زیستی میکروجلبک و لجن هوازی را نشان می‌دهد. حداکثر بازده نمک‌زدایی در MDC#1 و MDC#2 برابر با ۶۱ و ۷۵ درصد است. رسانایی الکتریکی آب شور در ابتدای چرخه برابر با ۵۴/۴ میلی زیمنس بر سانتی‌متر بوده است که در یک چرخه ناپیوسته میزان هدایت الکتریکی به طور پیوسته کاهش یافته و در انتهای چرخه به ۲۹/۵ و ۱۳/۴ میلی زیمنس بر سانتی متر رسیده است. حداکثر میزان نرخ نمک‌زدایی در پیل با کاتد لجن هوازی برابر با ۰/۷۲ گرم نمک بر لیتر بر ساعت به‌دست آمد.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در ابتدای چرخه میزان نرخ نمک‌زدایی حداکثر میزان خود است که این امر به‌دلیل فعالیت بیشتر ریزاندمگان فعال الکتریکی در ابتدای چرخه و حذف بیشتر بار آلی و در نتیجه تولید الکترون به‌دلیل تغییر الکترولیت در محفظه آند و افزایش تولید جریان در ابتدای چرخه است. اما به‌مرور زمان نرخ نمک‌زدایی روند کاهشی داشته و در انتهای چرخه به حداقل مقدار خود رسیده است. این امر می‌تواند به‌دلایلی هم‌چون کاهش ولتاژ خروجی و در نتیجه کاهش انتقال یون‌های نمک به‌ازای جریان تولیدی در محفظه آند، نوسان pH در دو محفظه آند و کاتد و سپس تغییر جهت گرادیان انتقال جرم از دو محفظه آند و کاتد به‌سمت محفظه نمک‌زدایی و افزایش مقاومت درونی سامانه ناشی از کاهش غلظت نمک در محفظه میانی نمک‌زدا است (Jafary et al., 2020).



شکل ۵- نمودار تغییرات غلظت نمک (توپر) و نرخ نمک‌زدایی (توخالی) در محفظه میانی برای پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد زیستی.

تغییرات pH در محفظه‌های آند و کاتد برای هر دو پیل با کاتدهای زیستی در جدول ۱ نمایش داده‌شده است. pH اولیه محلول‌های آند و کاتد در هر دو پیل به‌ترتیب برابر با ۷/۵ و ۷/۴ بود. در انتهای یک چرخه ناپیوسته، میزان pH در محفظه آند MDC#1 به ۵/۹ و در محفظه کاتد به ۸/۳ رسید و در MDC#2 در محفظه آند به ۴/۹ و در محفظه کاتد به ۹/۲ رسید. نوسان شدیدتر pH در آند MDC#2 نسبت به MDC#1 به‌دلیل بالاتر بودن حذف بار آلی آن و در نتیجه آزادسازی بیشتر یون‌های پروتون است (Jafary et al., 2020). علاوه‌بر این به‌دلیل استفاده از ریزاندامگان در کاتد و کاتالیزکردن واکنش احیای اکسیژن، یون‌های هیدروکسیل بیشتری به محیط آزاد شده است که باعث افزایش میزان pH در MDC#2 نسبت به MDC#1 شده است (Jafary et al., 2020).

جدول ۱- تغییرات pH در محفظه‌های آند و کاتد در دو پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد جلبکی (MDC#1) و لجن هوازی (MDC#2).

پیل نمک‌زدا	زمان اندازه‌گیری	pH (آند)	pH (کاتد)
MDC#1	ابتدای عملیات	۷/۵	۷/۴
	انتهای عملیات	۵/۹	۸/۳
MDC#2	ابتدای عملیات	۷/۵	۷/۴
	انتهای عملیات	۵/۱	۹/۲

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه عملکرد MDC را با استفاده از دو نوع کاتد شامل لجن هوازی و ریزجلبک کلرلا ولگاریس در شرایط مشابه بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهند که MDCهایی که از لجن هوازی به‌عنوان کاتد زیستی استفاده می‌کنند، چگالی توان و راندمان نمک‌زدایی به‌طور قابل‌توجهی بالاتری را نشان دادند که به‌ترتیب برابر با ۸۴۱ میلی‌وات بر مترمربع و ۷۵ درصد بودند. این یافته‌ها بر توانایی کاتالیزوری کاتدهای زیستی تاکید می‌کند، که نشان‌دهنده پتانسیل امیدوارکننده آن‌ها در افزایش تولید برق و راندمان نمک‌زدایی در MDC است. علاوه‌بر این، نتایج نشان‌داد که ظرفیت حذف بار آلی در پیل با لجن هوازی و ریزجلبک کلرلا ولگاریس به‌ترتیب برابر با ۹۰/۱ و ۶۰/۹ درصد است. دلیل نتایج بهتر کاتد با لجن هوازی استفاده از گیرنده‌های الکترون موثر و متنوع مانند اکسیژن و ریزاندامگان‌های مختلف در محفظه کاتدی است.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت مالی بنیاد ملی علم ایران برای انجام این پژوهش (گرنت شماره ۴۰۳۵۹۲۰) تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۶- پی‌نوشت‌ها

1- Bio-electrochemical Systems
2- Microbial Desalination Cell
3- Electroactive Bacteria
4- Anion Exchange Membrane
5- Cation Exchange Membrane
6- Electrical conductivity (EC)
7- Chemical Oxygen Demand (COD)
8- Polarization curve

۷- مراجع

Ahmed, F.E., Khalil, A., and Hilal, N., (2021), "Emerging desalination technologies: Current status, challenges and future trends", *Desalination*, 517, 115183, https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115183.

Al-Mamun, A., Ahmad, W., Baawain, M.S., Khadem, M., and Dhar, B.R., (2018), "A review of microbial desalination cell technology: Configurations, optimization and applications.", *Journal of Cleaner Production*, 183, 458-480, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.054.

Ebrahimi, A., Najafpour, G.D., and Kebria, D.Y., (2018), "Performance of microbial desalination cell for salt removal and energy generation using different catholyte solutions", *Desalination*, 432, 1-9, https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.01.002.

Eke, J., Yusuf, A., Giwa, A., and Sodiq, A., (2020), "The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity", *Desalination*, 495, 114633, https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114633.

Jafary, T., Al-Mamun, A., Alhimali, H., Baawain, M.S., Rahman, S., Tarpeh, W.A., Dhar, B.R., and Kim, B.H., (2020), "Novel two-chamber tubular microbial desalination cell for bioelectricity production, wastewater treatment and desalination with a focus on self-generated pH control", *Desalination*, 481, 114358, https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114358.

Kokabian, B., and Gude, V.G., (2015), "Sustainable photosynthetic biocathode in microbial desalination cells", *Chemical Engineering Journal*, 262, 958-965, https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.10.048.

Pandit, S., Sengupta, A., Kale, S., and Das, D., (2011), "Performance of electron acceptors in catholyte of a two-chambered microbial fuel cell using anion exchange membrane", *Bioresource Technology*, 102, 2736-2744, https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.038.

Rabiee, R., Zamir, S.M., and Sedighi, M., (2022), "Degradation of phenol in the bio-cathode of a microbial desalination cell with power generation and salt removal", *Bioelectrochemistry*, 148, 108258, https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2022.108258.

Sadeq, A.M., and Ismail, Z.Z., (2023), "Sustainable application of tubular photosynthesis microbial desalination cell for simultaneous desalination of seawater for potable water supply associated with sewage treatment and energy recovery", *Science of The Total Environment*, 875, 162630, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162630.

Saeed, H.M., Husseini, G.A., Yousef, S., Saif, J., Al-Asheh, S., Fara, A.A., Azzam, S., Khawaga, R. and Aidan, A., (2015), "Microbial desalination cell technology: A review and a case study", *Desalination*, 359, 1-13, https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.024.

Zamanpour, M.K., Kariminia, H.R., and Vosoughi, M., (2017), "Electricity generation, desalination and microalgae cultivation in a biocathode-microbial desalination cell", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 843-848, https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.045.

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

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 10, No. 1, PP. 49-60, Spring 2025
DOI: 10.22112/jwwse.2025.472391.1411

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال دهم، شماره ۱، صفحات ۴۹-۶۰، بهار ۱۴۰۴

Research Paper

Chromium Removal from Aqueous Solutions Using Fixed Bed Continuous Reactor with Ammonium Bromide Ligand-Modified Nanozeolite Spherical Granules

Azam Dehnabi[1] and Nima Zolfaghari[2*]
1- M.Sc., Department of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.
2- Associate Professor, Department of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.
*Corresponding Author, Email: ghr_zolfaghari@yahoo.com

Received: 15/08/2024
Revised: 29/10/2024
Accepted: 30/11/2024
© IWWA

Abstract

According to the standards set by the WHO, hexavalent chromium at a high concentration of 50 µg/L poses significant risks to human health. In this study, clinoptilolite was converted into nanozeolite using a ball mill and modified with the surfactant HDTMABr. Spherical granules were produced through a thermal method and shaped in an extruder machine. According to the XRF test, the most composition of nanozeolite is quartz, and according to the XRD test, the dominant species is clinoptilolite. DLS and TEM images show the size of nanozeolite particles between 50 and 400 nm. Thomas and Bohart-Adams models were employed to predict column behavior. It was found that the adsorption capacity increases with decreasing pH, flow rate, and initial concentration, while it decreases with reduced height. The maximum adsorption efficiency was achieved under optimal conditions: a height of 54 cm, a pH of 2, an initial concentration of 5 mg/L, and a flow rate of 1 L/h, resulting in an adsorption capacity of 23.60 mg/g and an efficiency of 98.33%. The modified clinoptilolite nanozeolite demonstrates high efficiency in chromium removal, and due to its availability and low cost, it presents a viable method for chromium removal in industrial and environmental applications.

Keywords: Granular nanozeolite, Hexavalent chromium, Fixed bed continuous reactor, Kinetics models.

مقاله پژوهشی

حذف کروم از محلول‌های آبی در راکتور پیوسته بستر ثابت با گرانول‌های کروی نانوزئولیت اصلاح‌شده با لیگاند آمونیوم بروماید

اعظم ده‌نبی[1] و نیما ذوالفقاری[2*]
۱- کارشناسی ارشد علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.
۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.
*نویسنده مسئول، ایمیل: ghr_zolfaghari@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

کروم شش ظرفیتی مطابق استاندارد سازمان سلامت جهانی در غلظت بیش از ۵۰ µg/L اثرات خطرناکی روی انسان دارد. در این مطالعه کلینوپتیلولیت در آسیاب سیاره‌ای به نانوزئولیت تبدیل و با سورفکتانت هگزا دسیل تری متیل آمونیوم بروماید (HDTMABr) اصلاح شد. با استفاده از روش حرارتی و شکل‌دهی در دستگاه اکسترودر گرانول‌های کروی تولید شد. براساس آزمون فلورسانس اشعه ایکس (XRF) بیشترین ترکیب نانوزئولیت کوارتز و طبق آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) جنس غالب آن کلینوپتیلولیت است. آزمون پراکندگی نور دینامیکی (DLS) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) اندازه ذرات نانوزئولیت را بین ۵۰ تا ۴۰۰ نانومتر نشان می‌دهند. با بررسی شرایط جذب و مدل‌های سینتیکی مشخص شد که ظرفیت جذب با کاهش pH، سرعت جریان و غلظت اولیه، افزایش یافته و با کاهش ارتفاع کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار جذب و درصد حذف در شرایط بهینه ارتفاع ۵۴ cm، pH برابر با ۲، غلظت اولیه ۵ mg/L و سرعت جریان ۱ L/h برابر ۲۳/۶۰ mg/g و ۹۸/۳۳ درصد تعیین شد. با توجه به کارآیی مطلوب، در دسترس بودن و هزینه کم می‌توان از نانوزئولیت تهیه شده به‌عنوان یک روش موثر در حذف کروم در صنعت و محیط‌زیست استفاده کرد.

کلمات کلیدی: نانوزئولیت گرانولی، کروم، راکتور پیوسته بستر ثابت، مدل‌های سینتیکی.

۱- مقدمه

با رشد سریع صنعتی شدن جهان، بسیاری از مشکلات مربوط به محیط‌زیست درحال پیشرفت است که نه تنها برای محیط‌زیست، بلکه برای سلامت انسان خطرات زیادی ایجاد می‌کند (Atabati et al., 2022). امروزه، فلزات سنگین در حال تبدیل شدن به یکی از خطرناک‌ترین آلاینده‌ها در تأمین و تصفیه آب هستند (ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۹۵). آلودگی ناشی از فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین مشکلات محیط‌زیست است که زندگی انسان را در جهان تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (اسماعیلی ساری و همکاران، ۱۳۸۶) و به‌دلیل توانایی تجمع زیستی در بدن و سمیت زیاد آن، آسیب بزرگی به سلامت انسان و زندگی موجودات زنده وارد می‌کند (Zolfaghari, 2018). در این میان، زیست‌بوم‌های آبی بیشتر تحت‌تأثیر قرارگرفته است زیرا آب در صنعت و به‌منظور آشامیدن به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود و فلزات سنگین و ترکیبات آن‌ها به‌راحتی در آب حل می‌شوند و همراه با فاضلاب و زه آب‌های کشاورزی و رواناب در محیط پخش می‌شوند (ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۸۵).

در میان فلزات سنگین، کروم شش ظرفیتی به‌دلیل سمی‌بودن و سرطان‌زایی و هم‌چنین قابلیت اکسیداسیون قوی که باعث آسیب به بافت‌های حیوانی و گیاهی می‌شود، کاملاً شناخته شده است (Zolfaghari, 2023) و به‌عنوان یکی از ۱۲۹ آلاینده اصلی و ۱۴ ماده سمی، توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست معرفی شده است. کروم شش ظرفیتی اثرات خطرناکی روی موجودات زنده دارد و حذف آن از خاک و آب از چند دهه گذشته بسیار موردتوجه قرارگرفته است (Veerakumar et al., 2017). کروم در محیط‌های آبی به دو شکل برجسته اکسیداسیون یعنی یون‌های سه‌ظرفیتی Cr(III) و شش ظرفیتی Cr(VI) وجود دارد ولی به‌طور طبیعی عمدتا کروم در محیط به‌شکل Cr(III) یافت می‌شود. با این‌حال، اکسیداسیون این نوع کروم باعث تولید یون‌های Cr(VI) در طی مراحل مختلف صنعتی می‌شود که می‌تواند سمی باشد و در بسیاری از اجزای فیزیکی و شیمیایی محیط تجمع یابد. Cr(III) نسبت به Cr(VI) سمی نیست و نقش مهمی در متابولیسم چربی و قند داشته و به‌عنوان یک عنصر کمیاب ضروری برای انسان و سایر جانداران تلقی می‌شود. علاوه‌بر این، توصیه می‌شود که انسان حدود ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم در روز، کروم سه ظرفیتی را مصرف کند (Herrero-Latorre et al., 2018).

حذف کروم از فاضلاب صنعتی و محیط‌های آبی یک مسئله علمی و تاریخی بوده است (Wu et al., 2017). این عنصر توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات‌متحده به‌عنوان یکی از آلاینده‌های اولویت‌دار آب معرفی‌شده است. این عنصر به دلیل ویژگی‌های خاصی که دارد در زمینه‌های مختلف به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارتند از: حفاظت چوب، آب‌کاری، صنعت نساجی، صنعت برنزه‌سازی چرم و تولید فولاد ضدزنگ (Farooqi et al., 2021). سازمان بهداشت جهانی محدودیت‌های تخلیه آلاینده‌ها را در ارتباط با بهداشت عمومی موردبررسی قرار می‌دهد، بنابراین بر آلاینده‌ها در منابع آب آشامیدنی تمرکز کرده است. از سال ۱۹۵۸، سازمان بهداشت جهانی، در استانداردهای بین‌المللی آب آشامیدنی، حداکثر غلظت مجاز ۰/۰۵ mg/L را برای کروم شش ظرفیتی براساس مطالعات پزشکی توصیه‌کرده است (WHO, 2003). روش‌هایی از قبیل نمک‌زدایی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر برای تصفیه آب پیشنهاد شده است (Shokri and Sanavi Fard, 2023). هم‌چنین روش‌های مختلفی مانند جذب، فیلتراسیون غشایی (Zolfaghari and Kargar, 2019)، استخراج با حلال، روش الکتروشیمیایی، انعقاد زیست‌پالایی، تبادل یونی و کاهش کاتالیستی (Shokri and Karimi, 2021) برای حذف کروم از محیط آبی استفاده شده است. روش جذب به‌دلیل سادگی، کارآیی اقتصادی و سازگاری با محیط‌زیست به یکی از محبوب‌ترین روش‌ها برای حذف کروم تبدیل شده است. مهم‌ترین گام در فرآیند جذب، انتخاب جاذب است ولی عواملی از قبیل هزینه بالا، استفاده گسترده از برخی جاذب‌ها مانند کربن فعال را محدود کرده است.

امروزه تمرکز زیادی بر استفاده از منابع طبیعی از طریق پردازش ساده برای تولید جاذب کم‌هزینه و دارای کارآیی بالا صورت‌گرفته است (نوری شمسی و همکاران، ۱۳۹۷). یکی از این منابع طبیعی زئولیت‌ها هستند (فرهادیان و همکاران، ۱۳۹۶). زئولیت یک ماده معدنی آلومینوسیلیکات آبدار است که به‌طور طبیعی در طبیعت یافت می‌شود. کلینوپتیلولیت (Clinoptilolite Zeolite) فراوان‌ترین زئولیت طبیعی بوده و در زمره ارزان‌ترین منابع طبیعی زئولیت است. این ماده معدنی از اکسید آلومینیوم و سیلیس چهار آبه متقارن تشکیل شده و یک ساختار سه‌بعدی باز و پایدار با بار منفی تشکیل می‌دهد که توسط چهار رأس اکسیژن به‌هم متصل شده است. چارچوب کلینوپتیلولیت توسط دو کانال موازی با ده حلقه عضو تشکیل شده است (Kennedy and Tezel, 2017).

کاربردهای صنعتی که می‌توان از کلینوپتیلولیت استفاده کرد شامل تصفیه گازهای احتراق در نیروگاه‌ها و ارتقای بیوگاز به

بیومتان است (Koytsoumpa et al. 2018). کلینوپتیلولیت همان‌طور که گفته‌شد برای کاربردهای مختلف از جمله جذب فلزات سنگین، تهیه الکترودهای انتخابی یونی، حذف آب از سوخت‌های پایه هیدروکربن دامپزشکی و داروی انسانی قبلاً مورد مطالعه قرارگرفته است (Pavelić et al. 2018). بنابراین این ویژگی‌ها باعث شده است که زئولیت طبیعی به‌عنوان جاذب کاتیون‌های فلزات سنگین ازجمله کروم شناخته شود. در برخی از تحقیقات حذف کروم با استفاده از جاذب کلینوپتیلولیت به‌عنوان یک روش مقرون به‌صرفه و سالم در محیط‌های آبی بررسی شده است. اما کاربرد گرانول‌های کروی نانوزئولیت کلینوپتیلولیت در یک رآکتور پیوسته برای حذف کروم مورد بررسی قرارنگرفته است و ضرورت دارد که چنین مطالعه‌ای انجام شود. در مطالعه حاضر نانوکلینوپتیلولیت سنتز، برای ارتقای قابلیت جذب کروم اصلاح و شکل گرانولی آن برای حذف آلاینده‌های کروم از آب در رآکتور پیوسته بستر ثابت با جریان بالارو بررسی شده است. در این رآکتور تاثیر غلظت اولیه، ارتفاع ستون رآکتور، شدت جریان، و pH و همچنین مدل‌سازی شرایط حذف آلاینده‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- سنتز نانوزئولیت کلینوپتیلولیت

زئولیت کلینوپتیلولیت از معادن روستای چاه تلخ واقع در جنوب شهرستان سبزوار تهیه شد که به‌صورت شن ریزه و رنگ آن مایل به شیری است. برای سنتز نانو زئولیت از روش بالا به پایین استفاده شد به این‌صورت که زئولیت با اندازه بزرگ به ابعاد کوچک و یکنواخت تبدیل شد که به اصطلاح آن را ابعاد نانومتری می‌گویند. انتظار می‌رود با کاهش اندازه ذرات زئولیت به ابعاد نانو و افزایش حفرات موجود، کارایی آن برای حذف کروم از محلول‌های آبی افزایش یابد. بدین‌منظور از دستگاه آسیاب گلوله‌ای که روشی مکانیکی است استفاده‌شد. در این روش زئولیت‌ها چندین مرتبه، هر بار به‌مدت ۱۲ ساعت تحت شرایط خشک و توسط گلوله‌های کوچک و بزرگ موجود در دستگاه آسیاب گلوله‌ای به نانو ذرات تبدیل شد.

۲-۲- اصلاح نانوزئولیت و تهیه گرانول‌های کروی

برای اصلاح نانوزئولیت از ۱۰ گرم سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم بروماید (HDTMABr) محصول شرکت مرک آلمان با وزن مولکولی ۳۶۴/۴۶ گرم برمول و با فرمول شیمیایی $[C_{19}H_{42}BrN]$ استفاده شد. ۱۰۰ گرم نانو زئولیت با ۱۰ گرم سورفکتانت کاتیونی به همراه ۱۰۰۰ میلی لیتر آب مقطر روی گرم‌کن در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد و سرعت ۱۵۰ rpm به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد. سپس نانوزئولیت اصلاح شده در آون در دمای ۱۰۵ ^{o}C به‌مدت ۲۴ ساعت جداسازی، خشک و نهایتا به‌نام HD-Clinoptilolite نام‌گذاری شد. در مرحله بعد با استفاده از روش حرارتی به گرانول تبدیل شد (شکل ۱). شکل‌دهی پودر نانوزئولیت به‌منظور جلوگیری از خروج نانوزئولیت از ستون جذب به‌همراه آب خروجی و هم‌چنین جلوگیری از پخش این مواد در محیط انجام‌شد. برای شکل‌دهی پودر نانوزئولیت از یک پیونددهنده (Binder) شامل فورفوران و هم‌چنین رزین فنولیک و پلی‌وینیل الکل (PVA) استفاده‌شد (Akhtar et al., 2014). مواد فوق به‌مدت ۲۰ دقیقه با هم در یک ظرف واکنش مخلوط شد. پس از این مدت زمان، ترکیب تولید شده به یک اکسترودر وارد و از طریق یک قالب مخصوص برای ایجاد اشکال رشته‌ای تحت فشار ۲ میکروپاسکال در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. نانوزئولیت اکسترود شده برای حذف هرگونه رطوبت باقی‌مانده در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت خشک شد.

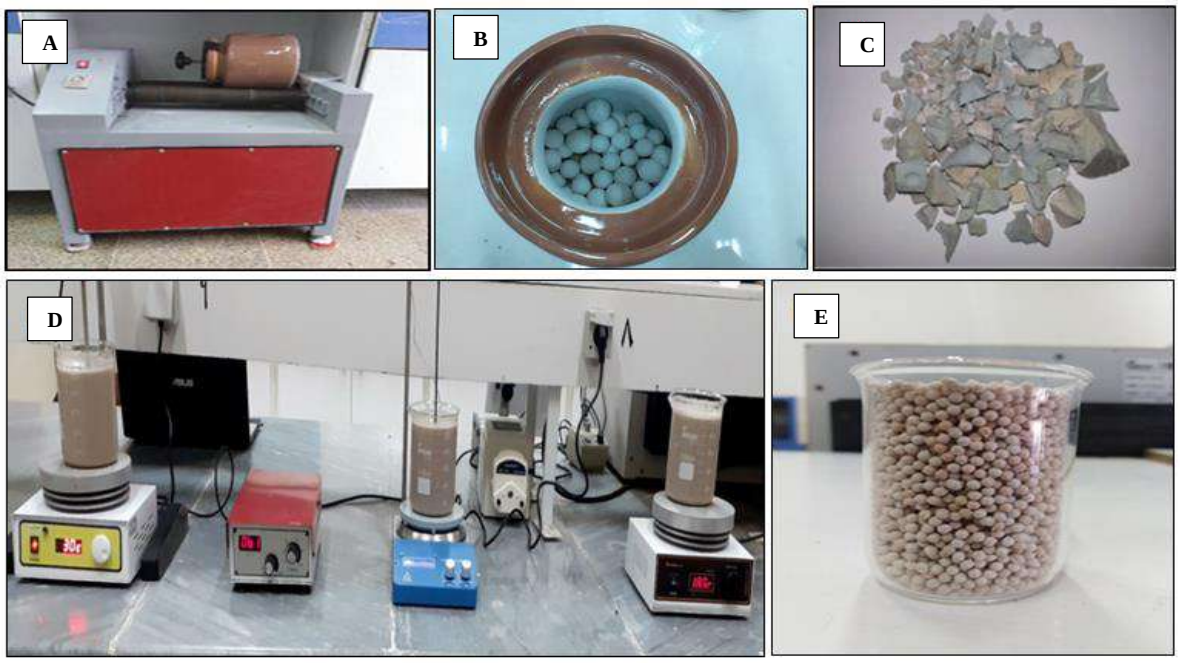
۲-۳- مشخصه‌یابی نانوزئولیت

برای تعیین اندازه ذرات جاذب، اطمینان از تبدیل زئولیت به نانوزئولیت و اصلاح آن توسط سورفکتانت و خصوصیات ظاهری و ساختاری جاذب از روش‌های پراش اشعه ایکس ((X-Ray Diffraction) (XRD) مدل Philips 1830، فلورسانس اشعه ایکس ((X-ray fluorescence) (XRF) مدل LAB CENTER XRF-1800، میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM (Transmission Electron Microscope)) مدل Philips CM-30 300 kV و طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR (Fourier Transform Infrared) مدل DIGILAB FTS 7000 استفاده شد.

۲-۴- آزمایشات حذف کروم

محلول مادر کروم (۵۰۰ mg/L) با حل کردن مقدار ۰/۷ گرم از دی کرومات پتاسیم در ۵۰۰ mL آب مقطر تهیه شد. برای بررسی تأثیر غلظت اولیه کروم، غلظت‌های ۵، ۱۰ و ۲۵ mg/L از طریق رقیق‌سازی محلول مادر تهیه شدند و طی آزمایش pH، ارتفاع ستون، شدت جریان، ثابت درنظر گرفته شد. به‌منظور تنظیم pH از افزودن محلول ۱ مولار هیدروکلریک اسید (HCl) و محلول ۱ مولار سدیم هیدروکسید (NaOH) به حجم مورد

استفاده با استفاده از دستگاه pH متر استفاده شد. برای سنجش تأثیر pH در فرآیند جذب کروم، نمونه‌هایی با pHهای ۲، ۵، ۸ تهیه و طی آزمایش غلظت، ارتفاع ستون و شدت جریان ثابت درنظر گرفته‌شد. برای بررسی تأثیر ارتفاع ستون در فرآیند جذب نمونه‌هایی با ارتفاع ۱۸، ۳۶، ۵۴ cm تهیه شد. ضمن این‌که غلظت، شدت جریان، و pH ثابت درنظر گرفته‌شد. هم‌چنین برای بررسی تأثیر شدت جریان در فرآیند حذف، دبی ۱ و ۲/۵ L/h تنظیم و پارامترهای غلظت، ارتفاع ستون، pH، ثابت درنظر گرفته‌شد. برای سنجش غلظت کروم شش ظرفیتی از دستگاه طیف سنج جذب اتمی Varian 220 استفاده شد. در ادامه به‌منظور تنظیم pH از محلول ۱ مولار هیدروکلریک اسید (HCl)، محلول ۱ مولار سدیم هیدروکسید (NaOH) و دستگاه pH متر مدل Ionometer-MS31 استفاده شد. اندازه‌گیری وزن مواد در انجام آزمایش‌ها با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم و مدل GF300 انجام شد.

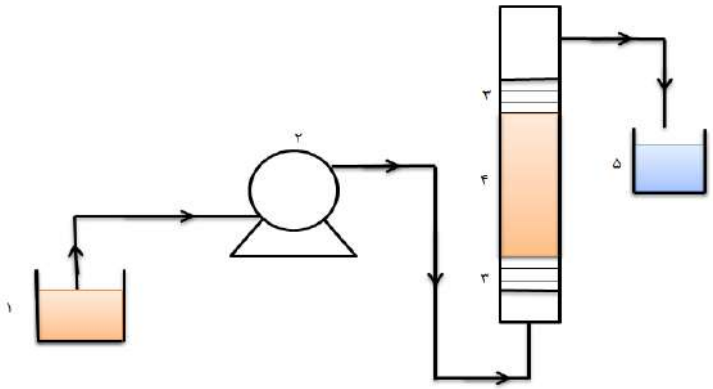


شکل ۱- روش کار تولید نانوزئولیت HD-Clinoptilolite: a) آسیاب گلوله‌ای مکانیکی با قابلیت تولید ذرات به ابعاد نانومتر؛ b) اندازه‌های مختلف گلوله درآسیاب گلوله‌ای برای تبدیل ذرات به ابعاد نانو؛ c) زئولیت کلینوپتیلولیت در طبیعت؛ d) فرآیند اصلاح نانوزئولیت توسط سورفکتانت و e) گرانول نانوزئولیت اصلاح شده

۲-۵- راه‌اندازی راکتور پیوسته بستر ثابت

محلول کروم شش ظرفیتی با استفاده از پمپ پریستالتیک مدل BT100-2J، از ستون شیشه‌ای به قطر ۱/۵سانتی‌متر و ارتفاع ۵۴ سانتی‌متر و حجم ۱۰۰ mL با جریان رو به بالا از ستون با بستر ثابت حاوی جاذب گرانول نانو زئولیت اصلاح‌شده پمپاژ شد. از یک پایه فلزی به‌عنوان نگهدارنده رآکتور استفاده‌شد. پمپ پریستالتیک نوعی پمپ جابجایی مثبت است که برای پمپاژ سیالات مختلفی به‌کار می‌رود. سیال از داخل یک شلنگ یا لوله انعطاف‌پذیر در مسیر دایره‌ای عبور می‌کند. در انتهای سیستم چرخاننده قطعه‌ای «غلتکی شکل» وجود دارد که شلنگ انعطاف‌پذیر را فشرده و باعث جریان پیدا کردن یا پمپ‌شدن سیال می‌شود. برای جلوگیری از خروج گرانول‌های نانوزئولیت اصلاح‌شده از ستون و به‌منظور اطمینان از توزیع یکنواخت محلول، در قسمت ابتدا و انتهای بستر از پشم شیشه و یک صفحه فلزی مشبک استفاده شد (شکل ۲). طی فواصل زمانی مختلف از آب خروجی ستون نمونه‌برداری صورت‌گرفت.

عملکرد جذب در راکتور بستر ثابت، به‌طور معمول از طریق مفهوم منحنی شکست (منحنی S شکل)، نمایش داده می‌شود که تابعی از سرعت انتقال، مشخصات جریان و مقادیر تعادلی است. هم‌چنین زمان ایجاد شکست و شکل منحنی شکست از خصوصیات بسیار مهم برای بررسی کارایی ستون جذب به‌شمار می‌رود. هنگامی‌که غلظت فلز مدنظر در پساب خروجی از ستون به ۱۰ درصد از غلظت اولیه خود برسد، نقطه شکست روی منحنی S شکل ایجاد می‌شود. هم‌چنین نقطه تخلیه بستر زمانی رخ می‌دهد که غلظت پساب خروجی به ۹۰ درصد از غلظت اولیه خود برسد. علاوه‌بر آن منحنی شکست (C_t/C_0) تابعی از زمان یا حجم پساب برای ارتفاع بستر است که حجم پساب (V_{eff} (mL)) را می‌توان از رابطه (۱) به‌دست آورد (Gong et al., 2015)



شکل ۲- نمودار شماتیک راکتور با بسترثابت: ۱- محلول کروم؛ ۲- پمپ پریستالتیک؛ ۳- پشم شیشه؛ ۴- جاذب گرانولی نانوزئولیت اصلاح شده با سورفکتانت و ۵- آب تصفیه شده

$$V_{eff} = Q_{total} \quad (۱)$$

که Q: سرعت جریان (mL/min) و t_{total}: کل زمان جریان سپری شده برای رسیدن به اشباع ۹۰ درصدی جاذب (min) هستند.

فضای زیر منحنی شکست جریان، بیانگر میزان کل یون‌های فلزی جذب شده توسط ستون جاذب (q_{total} (mg)) است که توسط رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Gong et al., 2015).

$$q_{total} = \frac{QA}{1000} = \frac{Q}{1000}\int_{t=0}^{t=t\ total} C_{ad}\, dt \quad (۲)$$

که A: منطقه زیر منحنی شکست، C_{ad}: میزان غلظت جذب شده (mg/L) و t: زمان کل جریان (min) هستند.

مقدار کل یون‌های فلزی وارد شده به ستون (m_{total} (mg)) توسط رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Lim and Aris, 2014). هم‌چنین درصد حذف کامل یون‌های فلزی (R) را می‌توان از رابطه (۴) و حداکثر ظرفیت جذب جاذب (q_{eq}) را با داشتن جرم خشک جاذب در ستون (m) از رابطه (۵) به‌دست آورد (Uddin et al. 2009).

$$m_{total} = C_0 \frac{q_{total}}{1000} \quad (۳)$$

$$Total\ Removal\ \% = \frac{q_{total}}{m_{total}} \times 100 \quad (۴)$$

$$q_{eq} = \frac{q_{total}}{m} \quad (۵)$$

زمان تماس با بستر خالی (EBCT)، مدت زمانی است که برای پرکردن ستون توسط محلول تهیه شده از یون فلزی، نیاز است و از طریق رابطه (۶) تعریف می‌شود (Gong et al., 2015).

$$EBCT\ (min) = bed\ volume\ \ (mL/min)\ (mL)/flow\ rate \quad (۶)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شناسایی نانوزئولیت سنتز شده

آنالیز ساختار زئولیت کلینوپتیلولیت با استفاده ازتکنیک XRF در جدول ۱ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نسبت جرمی SiO_2/Al_2O_3 در این زئولیت برابر ۶/۵۵ و درصد ترکیب‌های فرار نمونه (LOI) ۱۵/۶۲ درصد است و بیشترین ترکیب در ساختار این جاذب، کوارتز با فرمول شیمیایی SiO_2 است (حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۹) که حدود ۶۳ درصد را تشکیل می‌دهد.

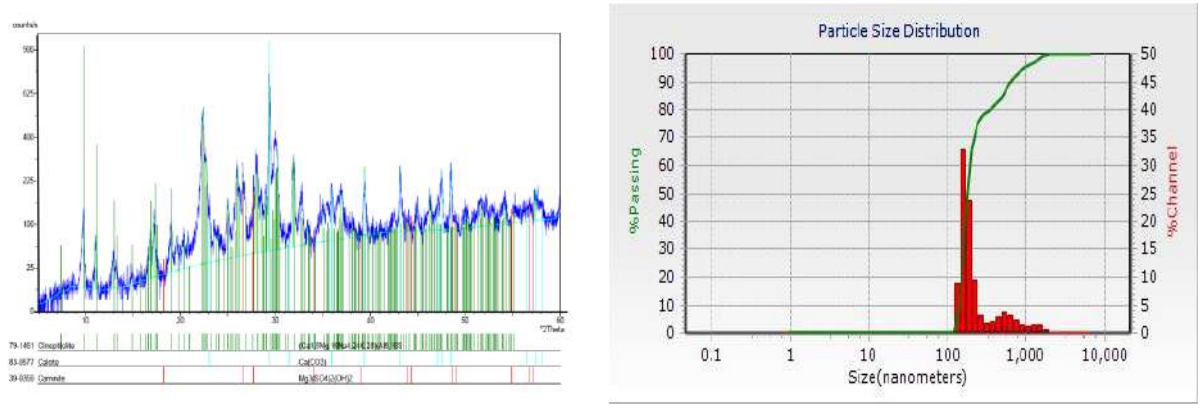
جدول ۱- آنالیز عنصری جاذب زئولیت کلینوپتیلولیت منطقه سبزوار

ترکیب	SiO_2	Al_2O_3	NA_2O	MgO	K_2O	TiO_2	MnO	CaO	P_2O_5	Fe_2O_3	SO_3	LOI
درصد	۶۲/۶۸	۹/۵۷	۲/۴۳	۰/۷۷	۱/۷۶	۰/۱۷	۰/۰۹	۵/۵۱	۰/۰۳	۱/۰۴	۰/۰۰	۱۵/۶۲

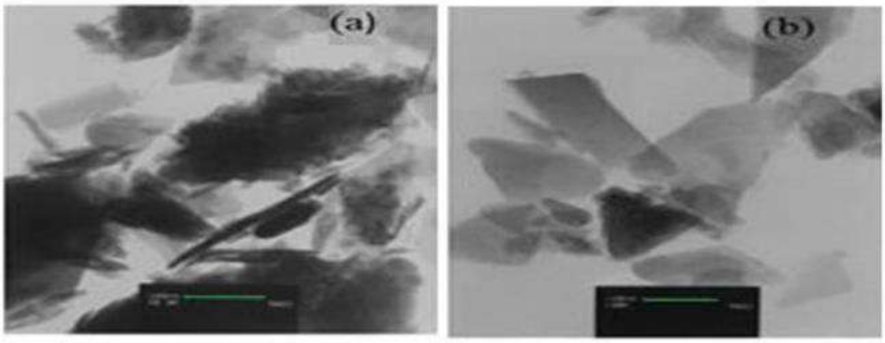
وجود اکسیدهای فلزی باعث می‌شود وقتی زئولیت درآب قرار بگیرد، گروه‌های عاملی در سطوح زئولیت تشکیل شود. این گروه‌های عاملی، نقش مهمی در جذب آلاینده‌ها از حجم مایع دارند. با اصلاح زئولیت، گروه‌های عاملی سطح آن تغییر می‌یابد و باعث افزایش ظرفیت جذب آن می‌شود. برای بررسی خصوصیات معدنی زئولیت از طیف پراش اشعه ایکس (XRD) استفاده شد.

تست XRD انجام گرفته روی زئولیت سبزوار که در شکل ۳ نشان داده شده است تایید می‌کند که نانوزئولیت مورد مطالعه کلینوپتیلولیت است و قوی‌ترین پیک آن دارای مقدار 2θ برابر ۲۹/۵ درجه است. روش پراکندگی نور دینامیکی (DLS) روشی فیزیکی است که اغلب برای اندازه گیری و توزیع اندازه ذرات استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود براساس نتایج DLS اکثر ذرات در محدوده ۱۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر هستند.

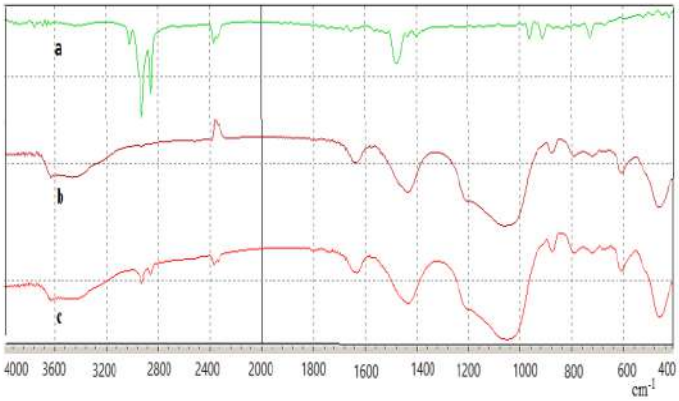
در بیشتر مطالعات انجام شده روی خواص مواد نانو ساختاری برای تعیین اندازه و شکل آن‌ها از میکروسکوپ الکترونی عبوری استفاده می‌شود. این روش اندازه و شکل ذرات را بادقت حدود چند دهم نانومتر نشان می‌دهد. طبق تصویر TEM به‌دست آمده (شکل ۴)، اندازه ذرات نانو زئولیت در محدوده ۵۰-۴۰۰ نانومتر قراردارد. برای بررسی ساختار و نوع گروه‌های عاملی که بیشتر از آلومینوسیلیکات تشکیل شده است، از طیف FTIR در دامنه عدد موج cm^{-1} ۴۰۰۰-۴۰۰ توسط دستگاه طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ استفاده شد.



شکل ۳- نتایج الگوی طیف پراش پرتو ایکس (XRD) زئولیت (سمت چپ) و توزیع اندازه ذرات با روش DLS (سمت راست)



شکل ۴- نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) نانوزئولیت HD-Clinoptilolite: a) با مقیاس۲۰۰ نانومتر و b) با مقیاس۱۰۰ نانومتر



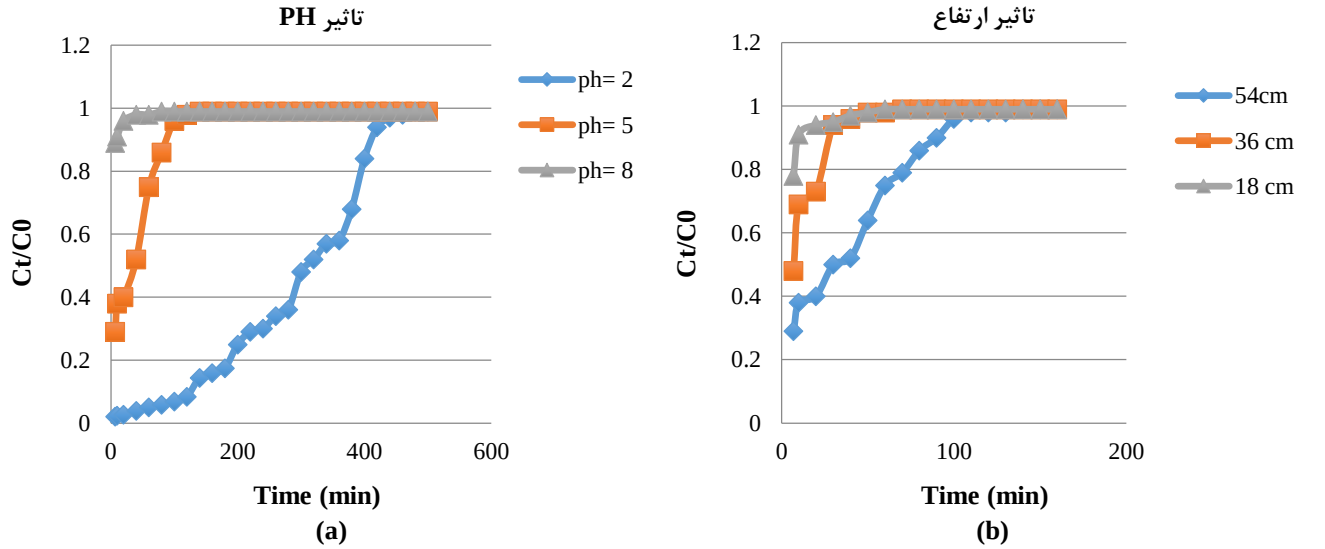
شکل ۵- نتایج آنالیز طیف (FTIR): a) سورفکتانت؛ b) نانوکلینوپتیلولیت و c) نانوکلینوپتیلولیت اصلاح شده توسط سورفکتانت

نانوکلینوپتیلولیت دارای دو پیک اصلی است: الف) پیک Si-O-Si و Si-O-Al در دامنه ۴۰۰ cm^{-1}-۱۲۰۰ cm^{-1} که محدوده ۱۰۷۰ مربوط به ارتعاشات کششی Si-O-Si و Si-O-Al است و ب) پیک H_2O موجود در زئولیت در دامنه ۱۵۰۰ cm^{-1}-۳۷۰۰ cm^{-1} که محدوده ۳۳۲۰ cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی پیوند هیدروژن آب است. نتایج حاصل از آنالیز FTIR که در شکل ۵ نشان داده شده است. بیانگر عامل‌دار شدن نانوزئولیت در محدوده ۲۸۰۰ cm^{-1}-۳۰۰۰ cm^{-1} و ارتعاشات مربوط به زنجیره هیدروکربن است.

۳-۲- تاثیر شرایط مختلف بر حذف کروم

برای بررسی اثر pH بر حذف کروم توسط نانوکلینوپتیلولیت گرانولی، pHهای ۲، ۵، و ۸ در ارتفاع ۵۴ cm ، غلظت اولیه ۵ mg/L و سرعت جریان ۱ L/h مورد آزمایش قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۶ نمایش داده شده است جذب در محدوده pH از ۲ تا ۸ کاهش می‌یابد. شکل غالب فلز کروم در pHهای اسیدی، یون $Cr_2O_7^{2-}$ است که با تشکیل این یون از غلظت اولیه کروم کاسته شده و درصد حذف آن نیز افزایش پیدا می‌کند (Alemu et al., 2018). در این مطالعه pH نقطه صفر (pH_{zpc}) برابر ۴/۷ تعیین شد. نقطه بار صفر نقطه‌ای است که بارهای سطحی روی سطح ماده مورد نظر صفر است یعنی قبل از این نقطه بار سطحی روی ترکیب مورد نظر مثبت و بعد از آن منفی است. لذا سطح نانوزئولیت HD-Clinoptilolite در pH برابر ۴/۷ بدون بار، در pH بالاتر از۴/۷ دارای بار سطحی منفی و در pH پایین تر از ۴/۷ دارای بار سطحی مثبت است. در واقع می‌توان چنین بیان کرد که در pH بالاتر از pH نقطه صفر یک دافعه الکترواستاتیکی بین بار سطحی منفی نانوزئولیت HD-Clinoptilolite و یون‌های دوظرفیتی کروم با بار منفی وجود دارد. به‌علاوه در pH پایین‌تر از pH نقطه صفر، سطح نانوزئولیت HD-Clinoptilolite مثبت است و یک جاذبه الکترواستاتیک قوی بین گروه‌های سطحی و یون‌های دوظرفیتی کروم با بار منفی وجود دارد (Mohammadifar et al., 2015). با توجه به نتایج به‌دست آمده از جدول ۲، با افزایش PH از ۲ به ۸، حداکثر میزان جذب کروم شش ظرفیتی صورت‌گرفته توسط جاذب، از ۲۳/۶۰ mg/g به ۰/۰۶ mg/g کاهش می‌یابد که با نتایج پژوهش انجام شده توسط حسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت دارد. در راکتورهای بستر ثابت بعضی اوقات پدیده کانالیزه‌شدن مواد در حین عبور از درون راکتور باعث کاهش زمان اقامت لازم برای انجام واکنش می‌شود که این یکی از دلایل کم شدن کارآیی می‌تواند باشد.

منحنی شکست برای بررسی اثر ارتفاع بر جذب کروم توسط نانوزئولیت کلینوپتیلولیت (۱۸ و ۳۶ و ۵۴ cm) با سرعت جریان ۱ L/h، غلظت اولیه ۵ mg/L و pH برابر با ۵، درشکل ۶ ارائه شده است. نتایج نشان دادند که با افزایش ارتفاع جاذب از ۱۸ به ۵۴ cm زمان تخلیه ستون از ۳۵ به ۱۴۴۰ دقیقه و حجم پساب از ۱۶۶/۶ به ۱۴۹۹ mL افزایش یافته است که این امر به‌دلیل افزایش زمان تماس بین کروم شش ظرفیتی و جاذب و افزایش تعداد مکان‌های فعال جذب روی جاذب است. طبق جدول ۲، حداکثر میزان جذب صورت گرفته توسط جاذب زئولیت کلینوپتیلولیت در ارتفاع ۵۴ cm برابر با ۲۳/۶۰ mg/g به‌دست آمد.

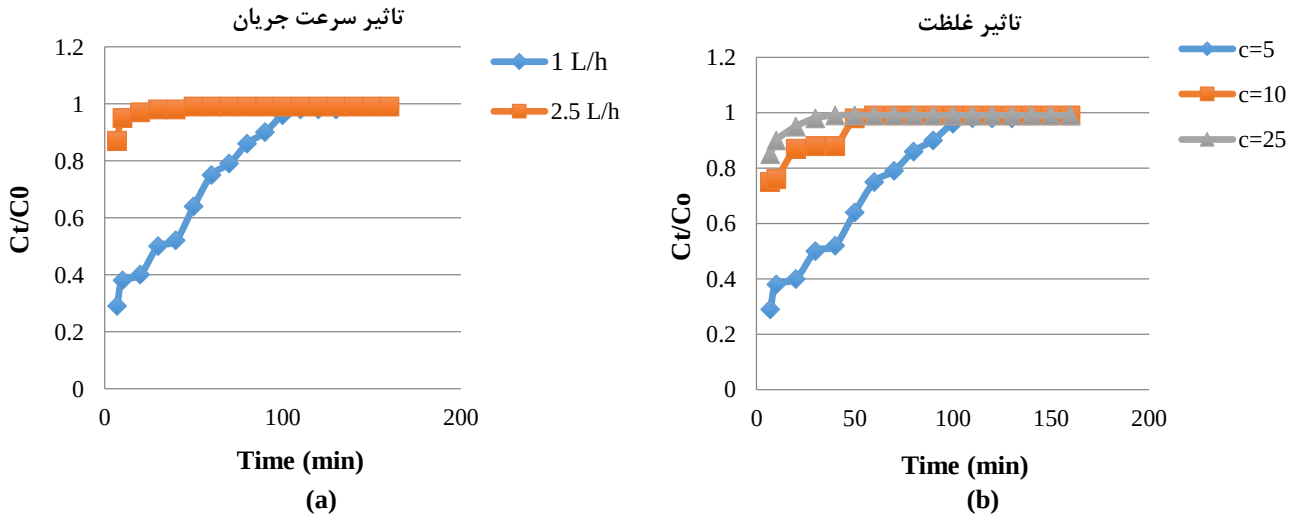


شکل ۶- بررسی شرایط مختلف بر حذف کروم: a) تاثیر pH و b) تاثیر ارتفاع بر میزان جذب کروم توسط جاذب گرانولی نانو زئولیت کلینوپتیلولیت اصلاح شده در راکتور پیوسته

اثر غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی بر روند جذب در غلظت‌های مختلف ۵، ۱۰ و ۲۵ mg/L و در شرایط آزمایشگاهی ارتفاع ۵۴ cm، سرعت جریان ۱ L/h و pH برابر ۵ مورد بررسی قرارگرفت. منحنی شکست مربوط به غلظت‌های اولیه متفاوت، در شکل ۷ نشان داده‌شده است. با افزایش غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی از ۵ به ۲۵ mg/L، بازده جذب کاهش می‌یابد که در جدول ۲ نمایش داده‌شده است. این کاهش بازده جذب با افزایش غلظت اولیه برای آن است که غلظت ورودی زیاد برای فرآیند انتقال نیاز به نیروی محرک بیشتری دارد تا بر مقاومت انتقال جرم غلبه کند. در نتیجه، اشباع سریع‌تر جاذب، کاهش زمان شکست و طول منطقه جذب را به‌دنبال خواهد داشت. در حقیقت میزان تاثیر غلظت اولیه، بستگی به رابطه بین غلظت کروم شش ظرفیتی و مکان‌های فعال موجود روی سطح جاذب را خواهد داشت. مطالعاتی مانند Golie and Upadhyayula (2016) روند عکسی را گزارش کرده‌اند. براساس نتایج آن‌ها در غلظت‌های بالاتر جذب بیشتری رخ می‌دهد به‌این دلیل که در غلظت‌های بیشتر دسترسی مولکول‌های فلزی برای مکان‌های جذبی بیشتر است و این باعث افزایش ظرفیت جذب در غلظت‌های بالا شده و در نتیجه زمان شکست کوتاه‌تر می‌شود. He et al. (2020) مطالعاتی را روی تصفیه بسیار کارآمد آب‌های زیرزمینی آلوده به کروم و نیترات با استفاده از زئولیت اصلاح شده با دو فلز Fe/Pb انجام دادند. نتایج نشان داد که هم‌زیستی کروم و نیترات در آب‌های زیرزمینی به‌طور قابل‌توجهی در حذف آن‌ها تأثیرگذار است. نیترات می‌تواند با تحریک تشکیل اکسید آهن متصل به سطح به جای آهن یونی، که ممکن است باعث کاهش کروم شود، حذف کروم را افزایش دهد.

سرعت جریان یکی از پارامترهای موثر بر میزان حذف یون‌های فلزی از محلول‌های آبی، به‌شمار می‌رود. برای این منظور تاثیر سرعت جریان‌های مختلف ۱ و ۲/۵ L/h در ارتفاع، غلظت اولیه و pH ثابت مورد بررسی قرارگرفت. منحنی شکست مربوط به سرعت جریان‌های مختلف، در شکل ۷ ارائه شده است. نتایج نشان‌داد که با افزایش سرعت جریان به‌سبب عدم ماندگاری کافی محلول حاوی یون‌های کروم شش ظرفیتی درستون بستر ثابت و انتشار آن در منافذ جذب، شیب منحنی شکست افزایش یافته و در مقابل زمان تشکیل نقطه شکست کاهش می‌یابد.

براساس جدول ۲، با افزایش سرعت جریان از ۱ به ۲/۵ L/h، درصد حذف کروم کاهش می‌یابد. دبی جریان پایین‌تر برای حذف یون‌های فلزی کروم و سرب در حالت ستونی موثرتر است (جدول ۲). در مطالعه‌ای که توسط حسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۹) انجام شد حذف فتوکاتالیستی کروم شش ظرفیتی از محلول آبی با استفاده از نانوذرات اکسید روی تثبیت شده روی زئولیت بررسی شد. نتایج این مطالعه حاکی از حذف ۹۲ درصدی کروم توسط جاذب مذکور بود. برای مطالعه حاضر حجم پساب (v_{eff}) برحسب میلی‌لیتر، یون‌های فلزی جذب‌شده توسط ستون جاذب (q_{total}) برحسب میلی‌گرم، حداکثر جذب یون نیترات توسط جاذب (q_{eq}) برحسب میلی‌گرم بر گرم، مقدار کل یون‌های وارد شده به ستون (m_{total}) برحسب میلی‌گرم، درصد حذف کامل کروم R و زمان تماس با بستر خالی EBCT برحسب دقیقه در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۷- بررسی شرایط مختلف بر حذف کروم: a) تاثیر سرعت جریان و b) تاثیر غلظت بر میزان جذب کروم توسط جاذب گرانولی نانو زئولیت کلینوپتیلولیت اصلاح شده در راکتور پیوسته

جدول ۲- پارامترهای موثر در جذب کروم شش ظرفیتی توسط جاذب زئولیت کلینوپتیلولیت اصلاح شده در ستون پیوسته

EBCT (min)	q_{eq} (mg/g)	R (%)	q_{total} (mg)	m_{total} (mg)	V_{eff} (mL)	t_{total} (min)	pH	Q (L/h)	C_0 (mg/L)	H (cm)
۵/۷۲	۰/۴۱	۲۱/۵۸	۰/۶۲	۲/۹۱	۱۶۶/۶	۳۵	۵	۱	۵	۱۸
۵/۷۲	۱/۲۸	۵۱/۳۹	۴/۴۹	۸/۷۵	۴۹۹/۸	۱۰۵	۵	۱	۵	۳۶
۵/۷۲	۳/۷۰	۷۰/۶۰	۱۸/۵۳	۲۶/۲۵	۱۴۹۹	۳۱۵	۵	۱	۵	۵۴
۵/۷۲	۱/۱۲	۲۴/۱۱	۵/۶۲	۲۳/۳۳	۶۶۶/۴	۱۴۰	۵	۱	۱۰	۵۴
۵/۷۲	۰/۴۱	۱۴/۴۰	۲/۰۹	۱۴/۵۸	۱۶۶/۶	۳۵	۵	۱	۲۵	۵۴
۲/۲۸	۰/۱۸	۱۲/۹۶	۰/۹۴	۷/ ۲۹	۴۱۶/۶	۳۵	۵	۲/۵	۵	۵۴
۵/۷۲	۲۳/۶۰	۹۸/۳۳	۱۱۸	۱۲۰	۶۹۹۷	۱۴۴۰	۲	۱	۵	۵۴
۵/۷۲	۰/۰۶	۱۰/۴۰	۰/۳۰	۲/۹۱	۱۶۶/۶	۳۵	۸	۱	۵	۵۴

۳-۳- مدل‌های سینتیکی ستون جاذب

چندین مدل ریاضی برای توصیف و تجزیه تحلیل داده‌های خروجی از ستون جاذب با بستر ثابت پیوسته به‌منظور کاربرد در صنعت و در مقیاس آزمایشگاهی ارائه شده است. در این پژوهش از مدل‌های بوهارت-آدامز (Bohart and Adams, 1920) و توماس (Tomas, 1944) برای پیش‌بینی رفتار ستون حاوی جاذب نانوزئولیت کلینوپتیلولیت استفاده شده است. در مدل بوهارت-آدامز براساس تئوری واکنش‌های سطح یک معادله اساسی ایجاد و رابطه بین غلظت تعادلی سیال/غلظت اولیه سیال (C_t/C_0) و کل زمان جریان (t) برای تجزیه تحلیل سیستم جریان توصیف شده است. این مدل متداول‌ترین مدل بستر ثابت است که شکل خطی معادله آن، به صورت رابطه (۷) است.

$$ln\ \frac{Ct}{C\,0} = K_{AB}C_0 t - \left(\frac{K_{AB}\,N_0\,Z}{U}\right) \qquad (۷)$$

که K_{AB}: ثابت میزان جذب مدل بوهارت-آدامز (L/mg.min)، t: زمان انجام فرآیند (min)، N_0: ظرفیت جذب (mg/L) و Z: ارتفاع بستر ستون (cm) هستند. هم‌چنین U: سرعت سطحی (cm/min) است که از تقسیم دبی جریان برسطح مقطع بستر به‌دست می‌آید. مقدار K_{AB} و N_0 را می‌توان از نمودار خطی ($ln(C_t/C_0)$) در مقابل t محاسبه کرد.

مدل توماس یک روش نظری پرکاربرد برای توصیف عملکرد ستون پیوسته است. این مدل از معادله بقای جرم در یک سیستم جریانی به‌دست آمده است که چگونگی تبعیت نرخ جذب از مدل‌های سینتیک درجه دوم برگشت پذیر را بیان می‌کند. رابطه (۸) شکل خطی معادله توماس است.

$$ln\frac{C_t}{C_0} = \frac{K_{Th}q_{max}M}{F} - K_{Th}C_0 t \qquad (۸)$$

که K_{Th}: ثابت مدل توماس (mL/mg.min)، q_{max}: ظرفیت جذب (mg/g)، m: مقدار جاذب در ستون (g)، F: دبی حجمی (mL/min) و t: کل زمان جریان (min) است. مقدار K_{Th} و q_{max} از شیب و عرض از مبدا نمودار خطی ($ln\ [(C_0/C_t)-1]$) در مقابل t محاسبه می‌شود.

در مطالعه حاضر پارامترهای ثابت بوهارت-آدامز (K_{AB} (L/mg.min)) و حداکثر ظرفیت جذب (N_0 (mg/L)) از طریق قراردادن داده‌ها در نمودار خطی ($ln\ C_t/C_0$) در مقابل زمان به‌دست آمد که در جدول ۳ نمایش داده شده است. طبق نتایج با افزایش ارتفاع بستر جاذب، ثابت بوهارت آدامز از ۳/۸ به ۰/۶۶ کاهش یافته و حداکثر ظرفیت جذب کروم شش ظرفیتی افزایش می‌یابد. افزایش غلظت ورودی یون کروم از ۵ به ۲۵ نیز منجربه افزایش K_{AB} و کاهش N_O می‌شود. علاوه‌بر آن با افزایش سرعت جریان و pH به‌ترتیب ثابت بوهارت آدامز از ۰/۶۶ به ۴/۸ و از ۰/۱۴ به ۱۰/۶ افزایش می‌یابد و حداکثر ظرفیت جذب نیز کاهش پیدا می‌کند. با توجه به نتایج به‌دست آمده از این مدل، می‌توان به این استنباط رسید که مدل بوهارت-آدامز قادر به توصیف صحیح و مناسب داده‌های راکتور پیوسته ثابت در این پژوهش است.

فرض مدل توماس برای محاسبه ظرفیت جاذب و پیش بینی منحنی شکست، براساس ایزوترم لانگمویر و سینتیک شبه مرتبه دوم است. پارامترهای به‌دست آمده از مدل توماس برای جذب کروم شش ظرفیتی از طریق شیب و عرض از مبدا نمودار خطی ($In\ C_t/C_0$) در مقابل زمان برحسب دقیقه در جدول ۴ نمایش داده شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده از این جدول، می‌توان گفت با افزایش ارتفاع از ۱۸ به ۵۴ حداکثر میزان جذب (q_{max} (mg/g)) و ثابت توماس (K_{TH} (mL/mg.min)) به‌ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. در مقابل با افزایش سرعت جریان به‌سبب کاهش مقاومت انتقال جرمی، ثابت توماس از ۰/۰۰۱ به ۰/۲۲ افزایش

یافته و حداکثر ظرفیت جذب نیز کاهش پیدا می‌کند. هم‌چنین با افزایش pH و غلظت اولیه K_{TH} و q_{max} افزایش و کاهش می‌یابد. این امر بدان معنا است که میزان pH و غلظت اولیه کمتر، سبب افزایش حداکثر میزان جذب کروم شش ظرفیتی در ستون بستر ثابت حاوی جاذب زئولیت کلینوپتیلولیت فعال می‌شود. براساس نتایج به‌دست آمده، مدل توماس از توانایی بالایی برای توصیف داده‌های حاصل از ستون بستر ثابت برخوردار است.

در مطالعه‌ای که توسط Nakhaei et al. (2023) در خصوص کارایی زئولیت طبیعی در حذف فلزات سنگین سرب، کادمیوم و کبالت با استفاده از ستون جذب بستر ثابت انجام شد مقادیر حاصل از مدل توماس برای پارامتر K_{th}: ثابت سرعت توماس برای سرب، کادمیوم و کبالت به‌ترتیب ۰/۰۰۱۳، ۰/۰۰۲۰، و ۰/۰۰۱۸ mL/min/mg و q_e: ظرفیت جذب تعادلی یا حداکثر ظرفیت جذب برای سرب، کادمیوم و کبالت به‌ترتیب تعیین ۱۸/۳۱، ۱۳/۳۷، و ۱۰/۹۵ mg/g تعیین شد. برخی از مطالعات مدل‌های مختلف دیگری را نیز مورد بررسی قرار دادند. به‌عنوان مثال مطالعه Golie and Upadhyayula (2016) نشان داد که مدل‌های توماس و یون-نسلون برازش بهتری از داده‌های ستون جذب ارائه می‌کنند. Rivera et al. (2021) تحقیقاتی را روی حذف آنیون‌های کرومات با استفاده از زئولیت‌ها اصلاح شده سورفکتانت انجام دادند که در این تحقیق از زئولیت اصلاح شده نوع Linde A برای جذب یون‌های کرومات از محلول‌های آبی و همچنین کپسول‌سازی آن از طریق یک فرآیند انجماد استفاده شد. شیمی سطح زئولیت‌ها با استفاده از سورفاکتانت کاتیونی HDTMA، برای ارتقای قابلیت جذب آنیون‌ها اصلاح شد. نتایج نشان داد که کلینوپتیلولیت اصلاح شده با سورفاکتانت قادر به جذب ۹/۸۳ میلی‌گرم بر گرم کروم است و زئولیت کلینوپتیلولیت حذف کروم بیشتری را در مقادیر pH پایین نشان می‌دهد.

جدول ۳- پارامترهای مدل بوهارت-آدامز برای جذب کروم توسط نانو زئولیت کلینوپتیلولیت اصلاح شده در راکتور پیوسته

R^2	N_0 (mg/L)	K_{AB} 10^{-6} (L/mg.min)	pH	Q (L/h)	C_0 (mg/L)	H (cm)
۰/۹۶۴۳	۴۱۱۸	۳/۸	۵	۱	۵	۱۸
۰/۹۷۶۳	۴۴۰۰	۲/۶	۵	۱	۵	۳۶
۰/۹۴۲۳	۲۵۱۴۸۵	۰/۶۶	۵	۱	۵	۵۴
۰/۹۶۴۹	۷۱۱۷۰	۱/۰۲	۵	۱	۱۰	۵۴
۰/۹۱۱۹	۵۰۸۴	۲/۸	۵	۱	۲۵	۵۴
۰/۹۶۸۵	۷۸۴۹	۴/۸	۵	۲/۵	۵	۵۴
۰/۹۶۴۳	۱۰۳۷۵۰۰	۰/۱۴	۲	۱	۵	۵۴
۰/۹۹۶۵	۱۴۰۹	۱۰/۶	۸	۱	۵	۵۴

جدول ۴- پارامترهای مدل توماس برای جذب کروم توسط نانو زئولیت کلینوپتیلولیت اصلاح شده در راکتور پیوسته

R^2	q_{max} (mg/L)	K_{TH} 10^{-4} (mL/mg.min)	pH	Q (L/h)	C_0 (mg/L)	H (cm)
۰/۹۲۳۱	۲۴۰۴۶	۰/۰۷	۵	۱	۵	۱۸
۰/۹۸۰۲	۲۵۳۲۵	۰/۰۳	۵	۱	۵	۳۶
۰/۹۱۵۳	۳۶۱۳۰۱	۰/۰۱	۵	۱	۵	۵۴
۰/۹۵۱۴	۲۳۳۹۱۵	۰/۰۲	۵	۱	۱۰	۵۴
۰/۹۹۳۲	۹۰۲۹۷	۰/۰۵	۵	۱	۲۵	۵۴
۰/۹۹۶۱	۵۹۴۰۰	۰/۲۰	۵	۲/۵	۵	۵۴
۰/۹۶۸۹	۵۷۸۷۶۹	۰/۰۰۱	۲	۱	۵	۵۴
۰/۹۹۸۶	۲۱۳۳۱	۰/۲۲	۸	۱	۵	۵۴

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مطالعه تأثیر پارامترهایی نظیر غلظت اولیه کروم، pH، ارتفاع ستون، و شدت جریان بر عملکرد جذب کروم در ستون پیوسته مورد بررسی قرارگرفت. ظرفیت جذب با افزایش ارتفاع از ۱۸ به ۵۴ cm، از ۰/۴۱ به ۲۳/۶۰ mg/g افزایش پیدا کرد و این امر به این دلیل اتفاق می‌افتد که آلاینده در تماس مقدار بیشتری از جاذب قرار می‌گیرد و کارایی ستون بیشتر می‌شود. ارتفاع بیشتر

ستون، pH کمتر، غلظت کمتر و سرعت جریان کمتر شرایط مطلوب‌تری برای حذف کروم هستند. به‌طوری‌که شرایط بهینه جذب توسط جاذب HD-Clinoptilolite به‌صورت pH برابر ۲، غلظت اولیه ۵ mg/L، سرعت جریان ۱ L/h، و ارتفاع ۵۴ cm با راندمان حذف ۹۸/۳۳ درصد است. نتایج دلالت می‌کنند که با افزایش ارتفاع زمان تخلیه ستون و حجم پساب خروجی از ستون افزایش پیدا می‌کند. درحالی‌که با افزایش شدت جریان به‌دلیل کاهش زمان تماس بین کروم و جاذب و عدم تماس کافی محلول حاوی کروم با نانوزئولیت موجود در ستون بستر ثابت و عدم جذب در مکان‌های فعال موجود بر سطح جاذب، ظرفیت جذب تا حد ۰/۱۸ mg/g کاهش پیدا می‌نماید. طبق مدل‌سازی‌هایی که صورت‌گرفت هر دو مدل بوهارت-آدامز و توماس قادر به توصیف داده‌های حاصل از ستون بستر ثابت پیوسته بودند. درنهایت می‌توان گفت گرانول‌های نانوزئولیت کلینوپتیولیت اصلاح شده با لیگاند آمونیوم بروماید کارایی بسیار بالایی برای حذف کروم از محلول‌های آبی را دارد. پیشنهاد می‌شود برای تاثیرگذاری بیشتر زئولیت کلینوپتیلولیت، از جاذب دیگری نیز هم‌زمان با زئولیت استفاده شود. هم‌چنین این آزمایشات را می‌توان به‌صورت جداگانه در راکتور بستر شناور و یا ترکیبی از دو راکتور بستر ثابت و شناور انجام داد. حتی می‌توان طی آزمایشاتی میزان کارایی جاذب بازیابی شده را در حذف کروم شش ظرفیتی بررسی کرد.

۶- مراجع

اسماعیلی ساری، ع.، ذوالفقاری، ن.، قاسمپوری، س.م.، شائق، س.ش.، و حسنی طباطبایی، م.، (۱۳۸۶) "بررسی تاثیر سن، جنس، سابقه شغلی، تخصص و تعداد دندان‌های پر شده با آمالگام بر غلظت جیوه ناخن در دندانپزشکان تهران"، *مجله دندانپزشکی جامعه اسلامی دندانپزشکان*، ۱۹(۱)، ۹۷-۱۰۴.

حسن‌زاده، د.، اشرفی، س.د.، تقوی، ک.، و نقی‌پور، د.، (۱۳۹۹)، "حذف فتوکاتالیستی کروم شش ظرفیتی از محلول آبی با استفاده از نانوذرات اکسید روی تثبیت شده بر روی زئولیت"، *سلامت و بهداشت*، ۱۱(۱)، ۳۷-۵۰.

ذوالفقاری، ن.، اسماعیلی ساری، ع.، قاسم‌پوری، س.م.، قربانی، ف.، احمدی فرد، ن.، و شکری، ز.، (۱۳۸۵)، "ارتباط سن، جنسیت و وزن با غلظت جیوه در اندام‌های مختلف ماهی شاه کولی (Chalcalburnus chalcalburnus) تالاب انزلی"، *مجله علوم و فنون دریایی*، ۵(۳-۴)، ۲۳-۳۱.

ذوالفقاری، ن.، دلسوز، م.، و رجایی، س.، (۱۳۹۵)، "مطالعه آلودگی جیوه در آب، رسوبات و ماهیان تجاری تالاب بین‌المللی هامون"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۷(۵)، ۲۵-۳۷.

فرهادیان، م.، ساکی، آ.، و داوری، ن.، (۱۳۹۶). "بررسی عوامل موثر فرآیندی در تخریب علف کش بنتازون در آب‌های آلوده توسط نانواکسیدهای فلزی تیتانیوم (IV) و آهن (III) بر پایه زئولیت طبیعی"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۲(۳)، ۲۱-۳۲،

https//:doi:10.22112/jwwse.2018.92536.1037.

نوری شمسی، م.ح.، جعفری، م.، و شاهین، م.، (۱۳۹۷). "مروری بر جاذب‌ها و نانوجاذب‌های طبیعی کیتوسان مورد استفاده در حذف آلاینده‌های فلزی آب"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۳(۲)، ۴۴-۶۰،

.https//:doi:10.22112/jwwse.2018.130500.1090

Akhtar, F., Andersson, L., Ogunwumi, S., Hedin, N., and Bergström, L., (2014). "Structuring adsorbents and catalysts by processing of porous powders", *Journal of the European Ceramic Society*, 34(7), 1643-1666, https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.01.008.

Alemu, A., Lemma, B., Gabbiye, N., Tadele, M., and Teferi, M., (2018), "Removal of chromium (VI) from aqueous solution using vesicular basalt: A potential low-cost wastewater treatment system", *Heliyon*, 4(7), e00682, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00682.

Atabati, A., Adab, H., Zolfaghari, G., and Nasrabadi. M., (2022), "Modeling groundwater nitrate concentrations using spatial and non-spatial regression models in a semi-arid environment", *Water Science and Engineering*, 15(3), 218-227, https://doi.org/10.1016/j.wse.2022.05.002.

Bohart, G.S., and Adams, E.Q., (1920), "Some aspects of the behavior of charcoal with respect to chlorine", *Journal of the American Chemical Society*, 42, 523, https://doi.org/10.1021/ja01448a018.

Farooqi, Z.H., Akram, M.W., Begum, R., Wu, W., and Irfan, A., (2021), "Inorganic nanoparticles for reduction of hexavalent chromium: Physicochemical aspects", *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123535, https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123535.

Golie, W.M., and Upadhyayula, S., (2016), "Continuous fixed-bed column study for the removal of nitrate from water using chitosan/alumina composite", *Journal of Water Process Engineering*, 12, 58-65, https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.06.007.

Gong, J.L., Zhang, Y.L., Jiang, Y., Zeng, G.M., Cui, Z.H., Liu, K., and Huan, S.Y., (2015), "Continuous adsorption of Pb (II) and methylene blue by engineered graphite oxide coated sand in fixed-bed column", *Applied Surface Science*, 330, 148-157, https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.11.068.

He, Y., Lin, H., Luo, M., Liu, J., Dong, Y., and Li, B., (2020), "Highly efficient remediation of groundwater co-contaminated with Cr(VI) and nitrate by using

study", *Journal of Environmental Management*, 90(11), 3443-3450, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.05.030.

Veerakumar, P., Thanasekaran, P., Lin, K.C., and Liu, S.B., (2017), "Biomass derived sheet-like carbon/palladium nanocomposite: An excellent opportunity for reduction of toxic hexavalent chromium", *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 5(6), 5302–5312, https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00645.

WHO, (2003), *Chromium in drinking-water*, Background Document for Development of WHO Guidelines for Drinking-Water Quality, World Health Organization, 13 p.

Wu, Y., Cha, L., Fan, Y., Fang, P., Ming, Z., and Sha, H., (2017), "Activated biochar prepared by pomelo peel using H_3PO_4 for the adsorption of hexavalent chromium: Performance and mechanism", *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(10), 1-13, https://doi.org/10.1007/s11270-017-3587-y.

Zolfaghari, N., (2018), "Risk assessment of mercury and lead in fish species from Iranian international wetlands", *MethodsX*, 5, 438-447, https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.05.002.

Zolfaghari, N., (2023), "The first ecological contamination study of avian mercury and lead in southeast Iran, Hamun International Wetlands", *Environmental Science and Pollution Research*, 30(42), 96575-96590, https://doi.org/10.1007/s11356-023-29219-9.

Zolfaghari, N., and Kargar. M., (2019), "Nanofiltration and microfiltration for the removal of chromium, total dissolved solids, and sulfate from water", *MethodsX*, 6, 549-557, https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.03.012.

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

nano-Fe/Pd bimetal-loaded zeolite: Process product and interaction mechanism", *Environmental Pollution*, 263, 1-11, https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114479.

Herrero-Latorre, C., Barciela-García, J., García-Martín, S., and Peña-Crecente, R.M., (2018), "Graphene and carbon nanotubes as solid phase extraction sorbents for the speciation of chromium: A review", *Analytica Chimica Acta*, 1002, 1-17, https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.11.042.

Kennedy, D.A., and Tezel, F.H., (2018), "Cation exchange modification of clinoptilolite – Screening analysis for potential equilibrium and kinetic adsorption separations involving methane, nitrogen, and carbon dioxide", *Microporous and Mesoporous Materials*, 262, 235-250, https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.11.054.

Koytsoumpa, E.I., Bergins, C., and Kakaras, E., (2018), "The CO_2 economy: Review of CO_2 capture and reuse technologies", *Journal of Supercritical Fluids*, 132, 3-16, https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.07.029.

Maponya, T.C., Ramohlola, K.E., Kera, N.H., Modibane, K.D., Maity, A., Katata-Seru, L.M., and Hato, M.J., (2020), "Influence of magnetic nanoparticles on modified polypyrrole/m-phenylediamine for adsorption of Cr (VI) from aqueous solution", *Polymers(Basel)*, 12(3), 679, https://doi.org/10.3390/polym12030679.

Mohammadifar, E., Shemirani, F., and Majidi, B., (2015), "Application of modified nano-γ-alumina as an efficient adsorbent for removing malachite green (MG) from aqueous solution", *Desalination and Water Treatment*, 54, 758-768, https://doi.org/10.1080/19443994.2014.890549.

Nakhaei, M., Mokhtari, H., Vatanpour Serghin, V., and Rezaei, K., (2023), "Efficiency of natural zeolite in the removal of heavy metals lead, cadmium, and cobalt using a fixed-bed adsorption column in Varamin aquifer (Iran, Tehran Province)", *Hydrogeology*, 8(1), 93-113. https://doi.org/10.22034/hydro.2023.56673.1289.

Pavelić, S.K., Medica, J.S., Gumbarević, D., Filošević, A., Pržulj, N., and Pavelić, K., (2018), "Critical review on zeolite clinoptilolite safety and medical applications in vivo", *Frontiers in Pharmacology*, 9, 1-15, https://doi.org/10.3389/fphar.2018.01350.

Shokri, A., and Karimi, S., (2021). "The removal of Hexavalent chromium; (Cr (VI)) by ZnO/LECA as a nano photocatalyst using full factorial experimental design", *Journal of Nanoanalysis*, 8(3), 167-175. https://doi.org/10.22034/jna.2021.1906290.1223.

Shokri, A., and Sanavi Fard, S., (2023), "Water-energy nexus: Cutting edge water desalination technologies and hybridized renewable-assisted systems; Challenges and future roadmaps", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 57, 103173, https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103173.

Uddin, M.T., Rukanuzzaman, M., Khan, M.M.R., and Islam, M.A., (2009), "Adsorption of methylene blue from aqueous solution by jackfruit (Artocarpus heteropyllus) leaf powder: A fixed-bed column

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال دهم، شماره ۱، صفحات ۶۱-۶۹، بهار ۱۴۰۴

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 10, No. 1, PP. 61-69, Spring 2025
DOI: 10.22112/jwwse.2025.467692.1407

مقاله پژوهشی

ارائه مدل مالی تطبیق‌پذیر ایجاد انرژی پایدار با استفاده از روش برق‌آبی در شرکت آب و فاضلاب مشهد

جواد براتی[۱]، مریم رسول‌زاده[۲*]، مهشید سامی[۳]، علیرضا صدقیان[۴] و ناهید رجب‌زاده[۵]

۱- عضو هیئت علمی جهاد دانشگاهی خراسان رضوی، مشهد، ایران.
۲- پژوهشگر جهاد دانشگاهی خراسان رضوی، مشهد، ایران.
۳- کارشناس ارشد اقتصاد، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.
۴- کارشناس ارشد عمران، گرایش محیط‌زیست، مدیر دفتر انرژی شرکت آب و فاضلاب مشهد، ایران.
۵- دکترای اقتصاد، شرکت آب و فاضلاب مشهد، ایران.
*نویسنده مسئول، ایمیل: mrasoulzadeh@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

در شرایط کنونی جهان، حفظ انرژی و ایجاد منابع پایدار برای آن دارای اهمیت دوچندان است. لذا نیاز است که دولت‌ها در راستای حفظ منابع و انرژی و همچنین درآمدزایی، به‌سمت استفاده از انرژی‌های پایدار حرکت نمایند. پژوهش حاضر، باهدف تولید انرژی پایدار با استفاده از روش برق‌آبی و ارائه مدل اقتصادی تطبیق‌پذیر برای شرکت آب و فاضلاب مشهد انجام شد. برای آن‌که نتایج، قابل‌تعمیم به‌هر شرایط و هر موقعیتِ مکانی و زمانی باشد، محاسبات به‌گونه‌ای چیدمان شد که اگر براساس اصول فنی و فرمول‌های مندرج در مراجع علمی و متقن، مشخصات موردنیاز برای تولید انرژی با روش برق‌آبی به‌عنوان داده ورودی و اولیه مدنظر باشد، در داده‌های ثانویه، میزان برق تولیدی و میزان درآمد حاصل از آن براساس نرخ تعرفه خرید برق قابل‌مشاهده است. درنهایت تصمیم‌گیرنده یا سرمایه‌گذار با محاسبه میزان هزینه ثابت و هزینه متغیر سالانه برای اجرای چنین پروژه‌ای و وارد نمودن آن در فرمول‌های لازم، می‌تواند شاخص‌های اقتصادی مانند قیمت تمام‌شده هر کیلووات ساعت، نرخ بازده داخلی (IRR)، دوره بازگشت سرمایه، ارزش حال خالص پروژه (NPV) را برای تصمیم‌گیری در مورد سرمایه‌گذاری و یا عدم آن مشاهده نموده و به‌کمک آن‌ها تصمیم‌گیری نماید. نتایج نشان داد که در نمونه موردمطالعه با دبی ۰/۰۷۵ m^2/s و ارتفاع ۸ متر، میزان برق تولیدی ۳۰۰۷۷ کیلووات ساعت در سال با قیمت تمام‌شده ۷۹۰۰۰ ریال است که در این نمونه، پروژه اقتصادی نشد.

کلمات کلیدی: تولید انرژی، شرکت آب و فاضلاب، الگوی فنی و مالی، روش برق‌آبی.

Research Paper

Presenting an Adaptable Financial Model for Creating Sustainable Energy Using Hydroelectricity in Mashhad Water and Wastewater Company

Javad Barati[1], Maryam Rasoulzadeh[2]*, Mahshid Sami[3], Alireza Sedghiyan[4] and Nahid Rajabzadeh[5]

1- Faculty Member of Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Mashhad, Iran.
2- Researcher, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Mashhad, Iran.
3- Master of Economics, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
4- Master of Civil Engineering, Environmental Orientation, Manager of Energy Office of WWC of Mashhad, Iran.
5- Ph.D. in Economics, Water and Wastewater Company of Mashhad, Iran.
*Corresponding Author, Email: mrasoulzadeh@gmail.com
Received: 14/07/2024
Revised: 04/11/2024
Accepted: 16/11/2024
© IWWA

Abstract

In the current conditions of the world, preserving energy and creating sustainable sources has double importance. Therefore, it is necessary for the governments to move towards the use of sustainable energy in order to preserve resources and energy as well as generate income. The current research was conducted with the aim of producing sustainable energy using the hydroelectric method and providing an adaptable economic model for Mashhad Water and Wastewater Company. To ensure that the results are generalizable to any condition, location, and time, the calculations were arranged in such a way that if the required specifications for generating electricity through hydropower—based on technical principles and formulas from reliable scientific references—are considered as primary input data, the secondary data will show the amount of electricity generated and the resulting revenue based on the electricity purchase tariff. Finally, the decision maker or investor, by calculating the amount of fixed and annual variable costs for the implementation of such a project and entering it into the necessary formulas, can calculate economic indicators such as the cost price of each kilowatt hour and the internal rate of return. Investment return period (IRR), net present value (NPV) of the project to decide whether or not to invest and to make a decision with their help. The results showed that in the studied sample with a flow rate of 0.075 m^2/s and a height of 8 m, the amount of electricity produced is 30,077 kw/hr/year with a cost price of 79,000 Rials, which means that the project is not economical with the values of this sample.

Keywords: Energy production, Water and Wastewater company, Technical and financial model, Hydroelectric method.

۱- مقدمه

سازمان ملل متحد، ۱۷ هدف توسعه پایدار را برای دستیابی به پایداری در جنبه‌های ضروری زندگی انسان، مانند گرسنگی یا سلامت، تعیین کرده است (Delanka-Pedige et al., 2021; Elavarasan et al., 2021). دو مورد از این اهداف یعنی هدف ششم با موضوع آب پاک و بهداشت و هدف هفتم با موضوع انرژی مقرون‌به‌صرفه و پاک هستند که برای دستیابی به سایر اهداف توسعه پایدار نیز حیاتی‌اند (Delanka-Pedige et al., 2021; Garcia et al., 2021). برای دستیابی به این اهداف، کشورها به اجرای چندین استراتژی ازجمله سرمایه‌گذاری در فناوری‌های تولید انرژی‌های تجدیدپذیر اقدام کرده‌اند (Elavarasan et al., 2021). اما درک چالش‌های تکنولوژیکی و اقتصادی دستیابی به سیستم‌های انرژی تجدید پذیر بسیار مهم است، زیرا هنگامی دستیابی به منابع انرژی پایدار انگیزه ایجاد خواهد کرد که دارای توجیه اقتصادی باشد. راه‌حل‌هایی برای دستیابی به این تعادل (تولید انرژی پاک همراه با مقرون‌به‌صرفه بودنِ آن)، در مطالعات کنونی، در حال بررسی هستند (Pokhrel et al., 2022).

تمرکز بر انرژی‌های پایدار و استفاده از آن‌ها هم اکنون در اکثر کشورهای جهان به‌عنوان یکی از اولین اولویت‌های توانیر و به‌ویژه شرکت‌های تابعه انتخاب شده‌اند و از آن‌جایی‌که شرکت آب و فاضلاب یکی از بخش‌های ارائه‌دهنده تسهیلات عمومی مهم در هر کشوری به‌شمار می‌رود که مهم‌ترین نیاز اساسی (آب) را برای بخش‌های مختلف جامعه تأمین می‌کند. لذا این شرکت باید در راستای حفظ منابع، انرژی و هم‌چنین درآمدزایی به‌سمت استفاده از انرژی‌های پایدار حرکت نماید. این درحالی است که پتانسیل‌های فراوان تولید انرژی پایدار نیز در فرایندهای اجرایی این شرکت وجود دارد (Eurostat, 2022). همین امر سبب شد مدیریت پایدار شبکه‌های آب و تأسیسات تصفیه به موضوعی حیاتی برای سیاست‌گذاران تبدیل شود. زیرا آب نباید صرفاً به‌عنوان یک محصول مصرفی درنظر گرفته شود، بلکه باید از آن به‌عنوان یک منبع ارزشمند محافظت شود. به‌این‌ترتیب، فرصت‌های بهبود مدیریت فاضلاب را نباید نادیده گرفت (Kehrein et al., 2020)، به‌ویژه آن‌که تقاضای برق در تصفیه فاضلاب معمولاً بسیار زیاد است (Capodaglio and Olsson, 2020; Revollar et al., 2021) . باید اقداماتی برای مقابله با این جنبه محیط‌زیستی یعنی بهبود بهره‌وری و تولید انرژی تجدید پذیر صورت‌گیرد (Zohrabian and Sanders, 2021; Paulu et al., 2021).

یکی از گزینه‌هایی که برای تولید برق درنظر گرفته می‌شود، روش برق‌آبی است که در آن برق از انرژی مکانیکی تأمین‌شده توسط فشار آب یا فاضلاب تولید می‌شود. به‌این‌ترتیب می‌توان مقداری از انرژی موجود در آب یا فاضلاب را که در غیر این‌صورت هدر می‌رود، کنترل کرد (Llácer-Iglesias et al., 2021). با این‌حال، همان‌طور که توسط برخی از محققان (Kretschmer et al., 2018; Adeyeye et al., 2021) در صنعت آب شهری مشاهده شده است، در مورد امکان تولید برق از روش برق‌آبی، نیاز به بررسی‌های فنی و مالی از دیدگاه سرمایه‌گذاران وجود دارد. روش برق‌آبی، یک فناوری شناخته‌شده برای تولید انرژی‌های تجدید پذیر و تأمین برق است که اخیراً در مقیاس کوچک به‌عنوان راه‌حلی ممکن برای بازیابی انرژی در سیستم‌های آب موجود (Choulot et al., 2012; Pérez-Sánchez et al., 2017)، ازجمله تصفیه‌خانه‌های فاضلاب (Ak et al., 2017; Bekker et al., 2021) موردمطالعه قرارگرفته است.

علی‌رغم این‌که صنعت آب و فاضلاب یکی از مصرف‌کنندگان عمده برق کشور است به‌طوری‌که حدود ۲ درصد برق مصرفی کشور در این بخش مصرف می‌شود، اما پتانسیل‌های بسیار زیادی برای تولید انرژی‌های پایدار دارد. جریان و فشار آب، اراضی بایر، فاضلاب و مخازن آب ازجمله منابع اصلی و منحصربه‌فرد تولید انرژی‌های تجدید پذیر در صنعت آب و فاضلاب محسوب می‌شود که کاربردی کردن استحصال انرژی‌های پاک از این منابع نه‌تنها قابلیت خودکفایی این صنعت از برق و انرژی مصرفی بیرونی را خواهد داشت بلکه می‌تواند به یک منبع درآمدی برای شرکت‌های آب و فاضلاب نیز تبدیل شود (سازمان بهره‌وری انرژی ایران، ۱۳۹۴).

به‌طورکلی درصورت وجود دبی و اختلاف ارتفاع کافی، امکان تولید برق از روش برق‌آبی وجود دارد. در روش مذکور، هر دو عامل باید برای تولید برق وجود داشته باشند تا امکان تولید برق به این روش امکان‌پذیر باشد. در خطوط انتقال آب، با مشکلات کمتری می‌توان از این پتانسیل استفاده کرد؛ به‌علاوه در بسیاری از کشورها به‌دلیل وجود اختلاف ارتفاع در شهرها و حجم آب کافی برای تولید برق، به‌جای فشارشکن‌های مستقر بر روی خطوط توزیع آب، توربین قرار داده‌شده است. یکی از روش‌های جدید تولید برق در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، استفاده از دبی در ورودی و خروجی این تأسیسات است. درمجموع تولید انرژی برق‌آبی که از آن به‌عنوان یک انرژی پاک استفاده می‌شود، گاز گلخانه‌ای تولید نمی‌کند و لذا بسیار موردتوجه است و برخلاف روش‌های شیمیایی، نیاز به حوضچه نگهداری فاضلاب به‌مدت

طولانی ندارد (پورزکی و همکاران، ۱۴۰۰).

هدف اصلی این پژوهش امکان‌سنجی هم‌زمان فنی و مالی تولید برق از انرژی آبی در شرکت آب و فاضلاب مشهد است. شایان‌ذکر است که اکثر مطالعات انجام‌شده، در ایران و خارج ایران بیشتر به مباحث فنی تولید انرژی در شرکت‌های آب و فاضلاب پرداخته‌اند و کمتر پتانسیل سنجی اقتصادی تولید انرژی تحلیل شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در این قسمت ابتدا روش برآورد میزان برق تولیدی به شیوه برق‌آبی ازنظر فنی، توضیح داده شده است، سپس روش‌های ارزیابی اقتصادی یک پروژه بیان شده و در انتها محاسبه قیمت تمام‌شده، آورده شده است.

۲-۱- ارزیابی فنی

همان‌گونه که بیان شد، روش برق‌آبی درواقع روشی برای تولید انرژی است که به آن نیروگاه‌های برق‌آبی گفته می‌شود. دسته‌بندی نیروگاه‌های برق‌آبی برحسب قدرت تولید به‌صورت زیر است (Tkac, 2018):

- واحدهای بزرگ آبی: ظرفیت بالای ۱۰۰ مگاوات
- واحدهای متوسط آبی: ظرفیت بین ۱۰ تا ۱۰۰ مگاوات
- واحدهای کوچک آبی: ظرفیت بین ۱ تا ۱۰ مگاوات
- واحدهای خیلی کوچک آبی: ظرفیت بین ۱۰۰ کیلووات تا ۱ مگاوات
- واحدهای میکرو: ظرفیت بین ۵ تا ۱۰۰ کیلووات
- واحدهای پیکو: ظرفیت بین چند صد وات تا ۵ کیلووات

با توجه به شرایط شهر مشهد، از نظر توپوگرافی، واحدهای برق‌آبی که قابل نصب (توسط شرکت آب و فاضلاب) باشد، با توجه به هِد آب و دِبی آن، می‌تواند در دسته واحدهای میکرو قرار گیرند. مهم‌ترین هزینه سرمایه‌ای این نوع انرژی، توربین برای نصب در محل آب است. انواع مختلف توربین‌های آبی استفاده‌شده برای این امر شاملِ؛ توربین کاپلان، توربین فرانسیس، توربین پلتون، روش PAT یا پمپ معکوس و پیچ ارشمیدس است. رابطه (۱) توان الکتریکی (انرژی قابل استحصال) حاصل از این روش را نشان داده است[۱].

$$P_e = QHg\rho_w\eta \qquad (۱)$$

که P_e: توان برحسب وات، Q: دبی برحسب $\frac{m^3}{s}$، H: هد برحسب m، g: شتاب جاذبه برحسب $\frac{m}{s^2}$، ρ_w: چگالی آب برحسب $\frac{kg}{m^3}$ و η: راندمان توربین است.

۲-۲- ارزیابی مالی

در تحقیق حاضر برای ارزیابی اقتصادی پروژه از شاخص‌های ارزش حال خالص فعلی (NPV)[۲]، نرخ بازدهی داخلی (IRR)[۳] و دوره بازگشت سرمایه (ROI)[۴] استفاده می‌شود که هرکدام از شاخص‌ها در ادامه توضیح داده‌شده است.

۲-۲-۱- ارزش فعلی خالص (NPV)

ارزش فعلی خالص برابر با کسر ارزش فعلی درآمدها از ارزش فعلی هزینه‌های یک پروژه است که می‌تواند منفی یا مثبت باشد. مثبت بودن آن به معنی این است که حاصل اجرای یک پروژه در یک دوره مشخص سودآور بوده و منفی بودن به معنی زیان‌ده بودن پروژه است (اسکونژاد، ۱۳۹۰). رابطهٔ (۲) نحوه محاسبه NPV را نشان می‌دهد.

$$NPV = \sum {B_t - C_t}/{(1+d)^t} \qquad (۲)$$

که B_t و C_t: به‌ترتیب منافع و هزینه طرح در سال t و d: نرخ تنزیل هستند. NPV ازلحاظ جبری می‌تواند صفر، مثبت و یا منفی باشد که اگر مثبت شد دارای توجیه اقتصادی است و چنان‌چه برابر صفر باشد در مورد رد یا قبول انجام طرح مزبور نمی‌توان به‌روشنی پاسخ گفت و اجرا و عدم اجرای آن تفاوتی ندارد. اگر NPV پروژه‌ای منفی شود توجیه اقتصادی ندارد.

۲-۲-۲- نرخ بازده داخلی (IRR)

منظور از نرخ بازده داخلی نرخ بهره‌ای است که ارزش فعلی درآمدهای یک پروژه را با ارزش فعلی هزینه‌های آن برابر می‌کند (رابطهٔ (۳)). اگر نرخ بازده داخلی بزرگ‌تر از نرخ بهره بازار باشد، به معنی سودآور بودن طرح بوده و اگر این نرخ کوچک‌تر از نرخ بهره بازار باشد به‌معنی زیان‌ده بودن طرح است (اسکونژاد، ۱۳۹۰).

$$NPV = \sum {B_t - C_t}/{(1+d)^t} = 0 \qquad (۳)$$

که B_t و C_t: به‌ترتیب منافع و هزینه طرح در سال t و d: نرخ تنزیل هستند. اگر نرخ به‌دست‌آمده بالاتر از نرخ تنزیل (d) باشد، پروژه دارای توجیه اقتصادی است و اگر کمتر از آن باشد فاقد توجیه اقتصادی است. به‌طور خلاصه یک پروژه در کلیه نرخ‌های تنزیل کمتر از IRR دارای توجیه اقتصادی و برای کلیه نرخ‌های بالاتر از

IRR فاقد توجیه اقتصادی است.

۲-۲-۳- محاسبه دوره بازگشت سرمایه (ROI) با استفاده از روش ارزش فعلی:

ROI همان نسبت سود حاصل از سرمایه‌گذاری به‌میزان هزینه اولیه است. چنان‌چه ارزش حال خالص صفر شود به شرطی که عدد تعداد سال (n) مجهول باشد، آن‌گاه دوره بازگشت سرمایه با برآورد میزان n به‌دست خواهد آمد (رابطهٔ (۴)).

$$\begin{matrix} NPV = 0 \\ PV_B = PV_C \\ PV_B - PV_C = 0 \end{matrix} \qquad (۴)$$

که PV_B و PV_C: به‌ترتیب ارزش فعلی درآمدها و ارزش فعلی هزینه‌ها را نشان می‌دهند.

۲-۲-۴- محاسبه هزینه تمام‌شده

برای محاسبه هزینه تمام‌شده ابتدا باید هزینه‌های ثابت، به اقساط یکنواخت سالانه تبدیل شود. محاسبه تبدیل هزینه‌های ثابت (هزینه‌های خرید و تهیه یا هزینه سرمایه‌ای) به اقساط یکنواخت سالانه، از طریق رابطه (۵) انجام می‌شود.

$$A = P[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}] \qquad P = \frac{F}{(1+i)^n} \qquad (۵)$$

که A: ارزش یکنواخت سالانه، P: ارزش حال هزینه‌های ثابت، F: هزینه‌های ثابت (هزینه‌ای که در سال مبنا انجام می‌شود یا همان هزینه‌های خرید و تهیه)، i: نرخ تنزیل (که می‌توان برابر نرخ بهره بانکی درنظر گرفت) و n: سال‌های عمر مفید پروژه هستند.

سپس عدد به‌دست‌آمده برای «اقساط یکنواخت سالانه و هزینه‌های ثابت» با «هزینه‌های متغیر» جمع شده و حاصل جمع آن‌ها، تقسیم بر مقدار تولید برق در یک سال (برحسب کیلووات ساعت) شده تا هزینه تمام‌شده برای یک کیلووات برق محاسبه شود. فرض‌های مدل مالی تحقیق حاضر شامل نرخ تنزیل، نرخ تورم، هزینه‌های ثابت و متغیر در قالب جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- فروض‌های مدل مالی (سال پایه: ۱۴۰۲)

نرخ تنزیل (درصد) - بهره بانکی	نرخ تورم سالانه (درصد)	هزینه ثابت (هزار ریال) یا تهیه و خرید	هزینه متغیر (هزار ریال) یا اجرا و بهره‌برداری
*٪۲۳	*٪۳۰	*۵۲۸۰۰۰۱	*۲۳۷۱۸۸۳

مأخذ: یافته‌های تحقیق (* مواردی که متناسب با هر پروژه و نظر سرمایه‌گذار، می‌توانند به‌عنوان مفروضات مدل درنظر گرفته شوند)

۳- نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، هدف آن است که شرکت آب و فاضلاب بتواند با واردکردن مشخصات فنی لازم برای نقاط مختلفی که امکان استحصال انرژی از روش برق‌آبی را دارا است، در مورد استفاده از چنین روشی تصمیم‌گیری نماید. برای آن‌که نتایج، قابل‌تعمیم به هر شرایطی و هر موقعیتِ مکانی و زمانی باشد، محاسبات به‌گونه‌ای چیدمان شد که اگر براساس اصول فنی و فرمول‌های مندرج در مراجع علمی و متقن، مشخصات موردنیاز برای تولید انرژی با روش برق‌آبی به‌عنوان داده ورودی و اولیه مدنظر باشد، در داده‌های ثانویه، میزان برق تولیدی و میزان درآمد حاصل از آن براساس نرخ تعرفه خرید برق قابل مشاهده است. درنهایت تصمیم‌گیرنده یا سرمایه‌گذار با محاسبه میزان هزینه ثابت و هزینه متغیر سالانه برای اجرای چنین پروژه‌ای و وارد نمودن آن در فرمول‌های لازم، می‌تواند شاخص‌های اقتصادی مانند قیمت تمام‌شده هر کیلووات ساعت، نرخ بازده داخلی (IRR)، دوره بازگشت سرمایه، ارزش حال خالص پروژه (NPV) را برای تصمیم‌گیری در مورد سرمایه‌گذاری و یا عدم آن مشاهده نموده و به‌کمک آن‌ها تصمیم‌گیری نماید.

سرمایه‌گذار یا تصمیم‌گیرنده، باید در رابطه (۱) اطلاعات موردنیاز را وارد کند و با توجه به میزان برق تولیدشده، قیمت تمام‌شده، درآمد حاصله و برآورد فرمول‌های (۲) تا (۴) در مورد اقتصادی بودن و نبودن پروژه تصمیم‌گیری نماید. در ادامه به برخی جدول‌ها و خروجی‌های اشاره‌شده برای نمونه فرضی اشاره می‌شود. لازم به ذکر است که در رابطه (۱)، مشخصاتی که نیاز است به‌عنوان داده اولیه وارد شود شامل «نوع توربین، راندمان توربین، مشخصات محل نصب توربین یعنی هد (H) و دبی آب (Q)» است. اما برای برآورد مقدار تولید در یک روز باید ساعت کارکرد پمپ در شبانه‌روز نیز در مقدار تولید ضرب شود، ضمن آن‌که باید به تعرفه فروش برق تجدیدپذیر در ایام مختلف سال دقت شود. میزان برق تولیدی برای نمونه فرضی، در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- میزان برق تولیدی

نوع توربین	راندمان توربین	ارتفاع یا اختلاف فشار (متر) (H)	دبی (Q) (مترمکعب بر ثانیه)	ساعت کارکرد پمپ (در شبانه‌روز)	ایام گرم سال (شش ماه اول سال) - هزار ریال***			نرخ فروش برق (سایر ایام سال) - هزار ریال	میزان تولید برق (کیلووات ساعت در سال)
					نرخ فروش برق (بار عادی)	نرخ فروش برق (پر باری)	نرخ فروش برق (کم باری)		
*پمپ معکوس	۰/۷*	۸*	۰/۰۷۵*	۲۰*	۳۴/۲۹*	۶۸/۵۷*	۱۷/۱۴*	۱۲/۴۵*	**۳۰۷۷/۴۶

مأخذ: یافته‌های تحقیق (* مواردی که تصمیم‌گیرنده می‌تواند تغییر دهد، ** اعدادی که تصمیم‌گیرنده در انتها مشاهده می‌کند، *** منبع: صورت‌جلسه ۳۸۰ هیات تنظیم بازار برق سازمان انرژی‌های تجدید پذیر (ساتبا) در سال ۱۴۰۲[۵])

سپس تصمیم‌گیرنده یا سرمایه‌گذار باید آیتم‌های هزینه‌های ثابت (تهیه و خرید)، هزینه‌های متغیر (بهره‌برداری و اجرا)، نرخ تورم سالانه و نرخ تنزیل را وارد نماید تا در خروجی ارزیابی اقتصادی پروژه، دوره بازگشت سرمایه و نرخ بازده داخلی و سایر آیتم‌های موردنظر را مشاهده نماید. لازم‌به ذکر است که با توجه به این‌که پروژه مفروض در زمین‌های متعلق به شرکت آب و فاضلاب اجرا می‌شود، لذا قیمت و زمین پروژه می‌تواند صفر لحاظ شود. در حالت کلی هزینه‌های ثابت اجرای یک پروژه شامل «زمین و محوطه‌سازی، ساختمان‌سازی، تجهیزات و ماشین‌آلات، تأسیسات و انشعابات، هزینه لوازم اداری و خدمات، هزینه‌های قبل از بهره‌برداری» هستند و هزینه‌های متغیر نیز شامل دسته‌های «نیروی انسانی، مواد اولیه، انرژی، نگهداری و تعمیرات، استهلاک، هزینه اداری و بیمه» هستند. با توجه به دسته‌های بیان‌شده فوق، جدول‌های ۳ و ۴ در ادامه ارائه می‌شوند.

جدول ۳- هزینه‌های ثابت اجرای پروژه

ردیف	نوع هزینه	هزینه (هزار ریال)
۱	زمین	۰
۲	محوطه‌سازی	۱،۳۸۰،۰۰۰
۳	ساختمان‌سازی[۶]	۳۰۰،۰۰۰
۴	تأسیسات و انشعابات	۰
۵	هزینه لوازم اداری و خدمات	۰
۶	تجهیزات و ماشین‌آلات	۳،۲۰۰،۰۰۱
۷	هزینه‌های قبل از بهره‌برداری	۴۰۰،۰۰۰
جـــــــــــــمع		۵،۲۸۰،۰۰۱

مأخذ: یافته‌های تحقیق

جدول ۴- هزینه‌های متغیر- سالانه اجرای پروژه

ردیف	نوع هزینه	هزینه (هزار ریال)
۱	خرید مواد اولیه	۰
۲	نیروی انسانی	۱،۸۳۴،۴۸۳
۳	هزینه آب، برق و گاز	۱۵۰۰۰
۴	نگهداری و تعمیرات	۲۴۷،۲۰۰
۵	استهلاک	۲۱۵،۲۰۰
۶	هزینه اداری و بیمه	۶۰۰۰۰
جمع کل		۲،۳۷۱،۸۸۳

مأخذ: یافته‌های تحقیق

همان‌گونه که قبلاً بیان شد، سرمایه‌گذار می‌تواند هر نوع هزینه‌ای را مدنظر قرار دهد و براساس آن تصمیم‌گیری نماید، مثلاً برخی هزینه‌ها در سرمایه‌گذاری در چنین پروژه‌ای ممکن است درنظر گرفته نشوند، از آن جمله می‌توان «زمین، تأسیسات و انشعابات، هزینه لوازم اداری» را نام برد.

محاسبه درآمد حاصل از «استحصال انرژی از روش برق‌آبی»

برای یک مورد نمونه‌ای (با فرض H برابر ۸ متر و Q برابر ۰/۰۷۵ مترمکعب بر ثانیه) انجام شد و درنهایت میزان برق تولیدی، ۴/۱۲۰۲ کیلووات در یک ساعت و در سال برابر ۳۰۰۷۷/۴۶ کیلووات (با فرض کارکرد ۲۰ ساعته پمپ در روز) برآورد شد. ازآن‌جا که تعرفه فروش برق تجدیدپذیر، در ساعات کم باری، میان باری و پرباری، متفاوت است، نیاز است که میزان تولید برق، به تفکیک هرکدام از این ساعات محاسبه شود که با استفاده از صورت‌جلسه ۳۸۰ هیات تنظیم بازار برق سازمان انرژی‌های تجدید پذیر (ساتبا) در سال ۱۴۰۲ محاسبه و در جدول ۵ آمده است (با فرض این‌که میزان تولید برق در ایام گرم و سرد و ساعات مختلف، یکسان باشد).

لازم‌به ذکر است که تصمیم‌گیرنده می‌تواند این نرخ‌های تعرفه خرید برق تجدیدپذیر را نیز تغییر داده و عدد همان سال موردنظر را لحاظ کند. در جدول ۵، ستون درآمد سالانه، حاصل‌ضرب سه آیتم شامل «کل ساعات در یک سال، میزان تولید برق در یک ساعت و تعرفه خرید تضمینی انرژی تجدید پذیر» است.

جدول ۵- درآمدهای سالیانه حاصل از فروش برق به روش برق‌آبی (هزار ریال)

شرح	تعداد ساعت‌ها در یک سال			میزان تولید برق در یک ساعت- کیلووات	تعرفه خرید تضمینی انرژی تجدید پذیر (هزار ریال)	درآمد سالانه (هزار ریال)
	ساعت -در شبانه‌روز	تعداد روزها در یک سال	کل ساعات در یک سال			
ساعات کم باری (ایام گرم)	۴	۹۳	۳۷۲	۴/۱۲۰۲	۱۷/۱۴	۲۶،۲۷۱
ساعات پر باری (ایام گرم)	۸	۹۳	۷۴۴	۴/۱۲۰۲	۶۸/۵۷	۲۱۰،۱۹۶
ساعات میان باری (ایام گرم)	۸	۹۳	۷۴۴	۴/۱۲۰۲	۳۴/۲۹	۱۰۵،۱۱۴
ساعات کم باری (ایام سرد)	۴	۲۷۲	۱۰۸۸	۴/۱۲۰۲	۱۲/۴۵	۵۵،۸۱۱
ساعات پر باری (ایام سرد)	۸	۲۷۲	۲۱۷۶	۴/۱۲۰۲	۱۲/۴۵	۱۱۱،۶۲۱
ساعات میان باری (ایام سرد)	۸	۲۷۲	۲۱۷۶	۴/۱۲۰۲	۱۲/۴۵	۱۱۱،۶۲۱
درآمد حاصل از فروش برق	-	-	-	-	-	۶۲۰،۶۳۴

مأخذ: یافته‌های تحقیق

با توجه به آن‌چه بیان شد، می‌توان بهای تمام‌شده یک کیلووات برق را به این روش، در نمونه مورد بررسی برآورد کرد و هم‌چنین محاسبات جریان نقدی، جریان تجمعی درآمد، شاخص‌های IRR و NPV و دوره بازگشت سرمایه را به‌دست آورد که در جدول‌های ۶ و ۷ آورده شده است. سالی که NPV (ارزش حال خالص جریان نقدی) مثبت می‌شود، در بیست سال آینده اتفاق نخواهد افتاد؛ بنابراین اجرای چنین طرحی دارای توجیه اقتصادی نیست.

جدول ۶- برآورد بهای تمام‌شده یک کیلووات برق به روش برق‌آبی در نمونه مورد بررسی

درآمد سالانه حاصل از عدم انتشار کربن (گرنت محیط‌زیستی) – (هزار ریال)	درآمد سالانه – سال صفر- سال اجرای پروژه (هزار ریال)	دوره بازگشت سرمایه (PBP) (بدون لحاظ نرخ تنزیل) – سال	نرخ بازده داخلی – (IRR) درصد	دوره بازگشت سرمایه پویا – (DPBP) (سال)	دوره‌ای که ارزش حال خالص (NPV) مثبت می‌شود	بهای تمام‌شده یک کیلووات ساعت (هزار ریال)
*۰	** ۶۲۰۶۳۳/۶۳۶	دوره >۲۰**	نامشخص**	دوره >۲۰**	دوره >۲۰**	**۷۹/۵۱۲۲

مأخذ: یافته‌های تحقیق (* مواردی که متناسب با هر پروژه می‌توانند تغییر کنند، ** اعدادی که پس از محاسبات فنی در انتها مشخص خواهند شد)

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق امکان‌سنجی اقتصادی تولید برق از انرژی آبی در شرکت آب و فاضلاب ارائه شد. الگوی اقتصادی تطبیق‌پذیر برای شرکت آب و فاضلاب نیز آورده شده است. برای آن‌که نتایج، قابل‌تعمیم به هر شرایطی و هر موقعیتِ مکانی و زمانی باشد، محاسبات به‌گونه‌ای چیدمان شد که اگر براساس اصول فنی و فرمول‌های مندرج در مراجع علمی و متقن، مشخصات موردنیاز

برای تولید انرژی با روش برق‌آبی به‌عنوان داده ورودی و اولیه مدنظر باشد، در داده‌های ثانویه، میزان برق تولیدی و میزان درآمد حاصل از آن براساس نرخ تعرفه خرید برق قابل مشاهده است. درنهایت تصمیم‌گیرنده یا سرمایه‌گذار با محاسبه میزان هزینه ثابت و هزینه متغیر سالانه برای اجرای چنین پروژه‌ای و وارد نمودن آن در فرمول‌های لازم، می‌تواند شاخص‌های اقتصادی مانند قیمت تمام‌شده هر کیلووات ساعت، نرخ بازده داخلی (IRR)، دوره بازگشت سرمایه، ارزش حال خالص پروژه (NPV) را برای تصمیم‌گیری در مورد سرمایه‌گذاری و یا عدم آن مشاهده نموده و به کمک آن‌ها تصمیم‌گیری نماید.

جدول ۷- جریان هزینه‌ها، درآمدها، شاخص ارزش حال خالص و IRR در طی بیست سال آینده برای استحصال انرژی از روش برق‌آبی (هزار ریال)

سال	هزینه	درآمد	جریان نقدی	NPV	IRR	جریان نقدی تجمعی (دوره بازگشت سرمایه)	ارزش حال جریان نقدی تجمعی (دوره بازگشت سرمایه با لحاظ نرخ تنزیل)
۱۴۰۲	۵۲۸۰۰۰۱	۰	-۵۲۸۰۰۰۱	-۴۲۹۲۶۸۳/۷۴	-	-۵۲۸۰۰۰۱	-۵۲۸۰۰۰۱
۱۴۰۳	۳۰۸۳۴۴۷/۷۲۹	۸۰۶۸۲۳/۷۲۷۸	-۲۲۷۶۶۲۴/۰۰۱	-۵۷۹۷۴۹۱/۷۲۵	-	-۷۵۵۶۶۲۵/۰۰۱	-۱۱۴۲۳۵۹۸/۵۶
۱۴۰۴	۴۰۰۸۴۸۲/۰۴۸	۱۰۴۸۸۷۰/۸۴۶	-۲۹۵۹۶۱۱/۲۰۲	-۷۳۸۷۹۳۹/۱۹	-	-۱۰۵۱۶۲۳۶/۲	-۱۸۳۷۴۶۴۳/۷۱
۱۴۰۵	۵۲۱۱۰۲۶/۶۶۲	۱۳۶۳۵۳۲/۱	-۳۸۴۷۴۹۴/۵۶۲	-۹۰۶۸۸۹۹/۹۲۵	-	-۱۴۳۶۳۷۳۰/۷۷	-۲۶۰۹۳۴۸۱/۶۳
۱۴۰۶	۶۷۷۴۳۳۴/۶۶۱	۱۷۷۲۵۹۱/۷۳	-۵۰۰۱۷۴۲/۹۳۱	-۱۰۸۴۵۵۲۵/۰۹	-	-۱۹۳۶۵۴۷۳/۷	-۳۴۵۵۴۲۰۸/۵۷
۱۴۰۷	۸۸۰۶۶۳۵/۰۵۹	۲۳۰۴۳۶۹/۲۴۹	-۶۵۰۲۲۶۵/۸۱	-۱۲۷۲۳۲۵۹/۰۱	-	-۲۵۸۶۷۷۳۹/۵۱	-۴۳۷۴۲۴۶۱/۰۸
۱۴۰۸	۱۱۴۴۸۶۲۵/۵۸	۲۹۹۵۶۸۰/۰۲۴	-۸۴۵۲۹۴۵/۵۵۳	-۱۴۷۰۷۸۵۵/۸۳	-	-۳۴۳۲۰۶۸۵/۰۶	-۵۳۶۵۳۶۳۹/۱۵
۱۴۰۹	۱۴۸۸۳۲۱۳/۲۵	۳۸۹۴۳۸۴/۰۳۱	-۱۰۹۸۸۸۲۹/۲۲	-۱۶۸۰۵۳۹۷/۱۹	-	-۴۵۳۰۹۵۱۴/۲۸	-۶۴۲۹۱۴۸۳/۳۸
۱۴۱۰	۱۹۳۴۸۱۷۷/۲۳	۵۰۶۲۶۹۹/۲۴	-۱۴۲۸۵۴۷۷/۹۹	-۱۹۰۲۲۳۱۰/۸۱	-	-۵۹۵۹۴۹۹۲/۲۷	-۷۵۶۶۶۹۴۰/۹۹
۱۴۱۱	۲۵۱۵۲۶۳۰/۳۹	۶۵۸۱۵۰۹/۰۱۲	-۱۸۵۷۱۱۲۱/۳۸	-۲۱۳۶۵۳۹۰/۲۶	-	-۷۸۱۶۶۱۱۳/۶۵	-۸۷۷۹۷۲۶۸/۲۲
۱۴۱۲	۳۲۶۹۸۴۱۹/۵۱	۸۵۵۵۹۶۱/۷۱۶	-۲۴۱۴۲۴۵۷/۸	-۲۳۸۴۱۸۱۵/۶۹	-	-۱۰۲۳۰۸۵۷۱/۴	-۱۰۰۷۰۵۳۲۶/۲
۱۴۱۳	۴۲۵۰۷۹۴۵/۳۶	۱۱۱۲۲۷۵۰/۲۳	-۳۱۳۸۵۱۹۵/۱۳	-۲۶۴۵۹۱۷۵/۹	-	-۱۳۳۶۹۳۷۶۶/۶	-۱۱۴۴۱۹۰۳۵/۳
۱۴۱۴	۵۵۲۶۰۳۲۸/۹۷	۱۴۴۵۹۵۷۵/۳	-۴۰۸۰۰۷۵۳/۶۷	-۲۹۲۲۵۴۹۱/۵۷	-	-۱۷۴۴۹۴۵۲۰/۲	-۱۲۸۹۷۰۹۶۰/۵
۱۴۱۵	۷۱۸۳۸۴۲۷/۶۷	۱۸۷۹۷۴۴۷/۸۹	-۵۳۰۴۰۹۷۹/۷۸	-۳۲۱۴۹۲۳۹/۸۴	-	-۲۲۷۵۳۵۵۰۰	-۱۴۴۳۹۸۰۰۴/۵
۱۴۱۶	۹۳۳۸۹۹۵۵/۹۷	۲۴۴۳۶۶۸۲/۲۶	-۶۸۹۵۳۲۷۳/۷۱	-۳۵۲۳۹۳۸۰/۲۸	-	-۲۹۶۴۸۸۷۷۳/۷	-۱۶۰۷۴۱۱۸۹/۳
۱۴۱۷	۱۲۱۴۰۶۹۴۲/۸	۳۱۷۶۷۶۸۶/۹۳	-۸۹۶۳۹۲۵۵/۸۲	-۳۸۵۰۵۳۸۲/۳۸	-	-۳۸۶۱۲۸۰۲۹/۶	-۱۷۸۰۴۵۵۱۴/۱
۱۴۱۸	۱۵۷۸۲۹۰۲۵/۶	۴۱۲۹۷۹۹۳/۰۱	-۱۱۶۵۳۱۰۳۲/۶	-۴۱۹۵۷۲۵۴/۵۲	-	-۵۰۲۶۵۹۰۶۲/۱	-۱۹۶۳۵۹۸۷۳/۶
۱۴۱۹	۲۰۵۱۷۷۷۳۳/۳	۵۳۶۸۷۳۹۰/۹۲	-۱۵۱۴۹۰۳۴۲/۳	-۴۵۶۰۵۵۷۴/۶۶	-	-۶۵۴۱۴۹۴۰۴/۵	-۲۱۵۷۳۷۰۳۰/۵
۱۴۲۰	۲۶۶۷۳۱۰۵۳/۲	۶۹۷۹۳۶۰۸/۱۹	-۱۹۶۹۳۷۴۴۵	-۴۹۴۶۱۵۲۲/۷۸	-	-۸۵۱۰۸۶۸۴۹/۵	-۲۳۶۲۳۳۶۳۲/۷
۱۴۲۱	۳۴۶۷۵۰۳۶۹/۲	۹۰۷۳۱۶۹۰/۶۵	-۲۵۶۰۱۸۶۷۸/۶	-۵۳۵۳۶۹۱۵/۱	-	-۱۱۰۷۱۰۵۵۲۸	-۲۵۷۹۱۰۲۶۹/۶
۱۴۲۲	۴۵۰۷۷۵۴۸۰	۱۱۷۹۵۱۱۹۷/۸	-۳۳۲۸۲۴۲۸۲/۱	-۵۷۸۴۴۲۴۰/۳۲	-	-۱۴۳۹۹۲۹۸۱۰	-۲۸۰۸۳۱۵۶۱/۶

مأخذ: یافته‌های تحقیق

در نمونه واردشده، سالی که NPV (ارزش حال خالص جریان نقدی) مثبت می‌شود، در بیست سال آینده اتفاق نخواهد افتاد؛ بنابراین نتیجه آن است که در شرایط کنونی اجرای پروژه در شرکت آب و فاضلاب مشهد اقتصادی نیست؛ اما لازم‌به ذکر است که این نتیجه با توجه به مقدار فرضیِ جریان یا فشار (H) و دبی آب (Q) حاصل شده است. به‌طور حتم اگر بتوان در نقطه‌ای توربین را جانمایی نمود که جریان و دبی مناسبی را به‌دست دهد، بر روی انرژی استحصالی اثرگذاشته و لذا درآمد را تحت‌تأثیر قرار داده و به‌تبع، بر میزان دوره بازگشت سرمایه و IRR اثر خواهد داشت. هم‌چنین اگر نرخ خرید برق تجدیدپذیر تغییر کند شرایط متفاوتی را رقم می‌زند. به‌همین منظور چهار سناریو در جدول ۸ تعریف شده است که نشان می‌دهد درصورت جانمایی مناسب توربین اگر مقادیر ارتفاع یا اختلاف فشار (H) و دبی (Q) متفاوت از نمونه مورد بررسی باشد، مقادیر IRR و دوره بازگشت سرمایه به‌گونه‌ای تغییر می‌یابند که پروژه صرفه اقتصادی داشته و برای سرمایه‌گذار جذاب خواهد بود

جدول ۸- سناریوهای توجیه‌پذیر برای سرمایه‌گذاری

سناریوها	ارتفاع یا اختلاف فشار(متر) (H)	دبی (Q) (مترمکعب بر ثانیه)	IRR در سال دهم (اگر عمر پروژه ده سال فرض شود)	دوره بازگشت سرمایه (PBP) - سال	دوره بازگشت سرمایه پویا (DPBP) - سال
اول	۸	۰/۱۱	٪۵۲	۲	۴
دوم	۱۲	۰/۰۷۵	٪۵۴	۲	۳
سوم	۸	۰/۱۲۵	٪۶۶	۲	۲
چهارم	۱۱	۰/۱	٪۷۷	۱	۲

مأخذ: یافته‌های تحقیق

نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۸ نشان می‌دهد که اگر هر یک از دو عامل ارتفاع و دبی آب تغییر یابند در توجیه‌پذیری اقتصادی پروژه نقش اساسی دارند و زمانی که مطابق سناریوی چهارم، هردو عامل، هم‌زمان و به‌میزان اندک (نسبت به نمونه موردبررسی) افزایش یابند تصمیم به سرمایه‌گذاری را بیش از پیش قابل‌توجیه می‌نمایند. به‌همین دلیل است که سرمایه‌گذاری بر روی پروژه موردمطالعه (شرکت آب و فاضلاب مشهد) با مقادیر دبی m^2/s ۰/۰۷۵ و ارتفاع ۸ متر دارای صرفه اقتصادی نیست. زیرا با مقادیر مذکور و با ساعت کارکرد ۲۰ ساعته پمپ در شبانه‌روز، میزان برق تولیدی ۳۰۰۷۷ کیلووات ساعت در سال است که با لحاظ هزینه‌های ثابت و متغیر و نرخ تنزیل (در این نمونه) قیمت تمام‌شده، ۷۹۰۰۰ ریال برای هر کیلووات ساعت خواهد بود و پس از محاسبه جریانات درآمدی و هزینه‌ها و با توجه به تورم و نرخ تنزیل، جریان نقدی منفی حاصل خواهد شد.

شایان ذکر است که در این پروژه می‌توان محاسبات معکوسی نیز تعبیه نمود، به‌گونه‌ای که سرمایه‌گذار می‌تواند دوره بازگشت سرمایه مدنظر خود و همچنین نرخ IRR موردقبول خود را وارد نموده و نرخ متوسط قیمت هر کیلووات ساعت برقی که دولت باید خریداری کند (به هزار ریال) را برآورد نماید. این نرخ نشان می‌دهد دولت تا چه میزان باید تعرفه هر کیلووات برق خریداری‌شده را بالا ببرد که انگیزه برای سرمایه‌گذاری در این صنعت فراهم شود و به‌عبارت‌دیگر پروژه را اقتصادی نماید. با توجه به آن‌چه بیان شد، پیشنهاد می‌شود که تعرفه خرید برق تجدید پذیر در راستای انگیزه دادن به سرمایه‌گذاران برای تولید انرژی‌های پایدار مورد بازنگری قرار گیرد، به‌طور حتم استفاده از انرژی‌های فسیلی برای تولید برق، علاوه بر آسیب‌های محیط‌زیستی، نمی‌تواند پایداری استفاده از منابع را تضمین نماید.

۵- قدردانی

مقاله حاضر برگرفته از طرح پژوهشی طی قراردادی بین شرکت آب و فاضلاب مشهد و سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی است. بدین‌وسیله از کارکنان محترم شرکت، برای همکاری در اجرای تحقیق قدردانی می‌شود.

۶- پی‌نوشت‌ها

1- https://greener4life.com/Hydroelectric-Power-Calculator
2- Net Present Value
3- Internal Return Rate
4- Return on Investment
5- https://media.dotic.ir/uploads/org/2023/12/19/70299631936672300.pdf

۶- منظور از ساختمان‌سازی در این پروژه ساخت فضای مناسب اطراف توربین است (فرض شده است که توربین در یک محل تقاطع که نیاز به فشارشکن دارد نصب شود و ازآن‌جا که هدف این پروژه آن است که محاسبات مربوط به برآورد برق تولیدی صحیح باشد، از یک پروژه مشابه برای استخراج اعداد استفاده شده است).

۷- مراجع

اسکونژاد، م.م.، (۱۳۹۰)، *اقتصاد مهندسی، ارزیابی اقتصادی پروژه‌های صنعتی*، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

پورزکی، ع.، مجتهدی، س.ح.، روحبخش، م.، و محمدی، م.، (۱۴۰۰)، "بررسی روش استحصال انرژی تجدید پذیر برق‌آبی از فاضلاب"، *نهمین کنفرانس انرژی‌های تجدید پذیر و تولید پراکنده ایران*، مشهد، ایران، https://civilica.com/doc/1465023.

Adeyeye, K., Gallagher, J., McNabola, A., Ramos, H.M., and Coughlan, P., (2021), "Socio-technical viability framework for micro hydropower in group water-energy schemes", *Energies*, 14(14), 4222, https://doi.org/10.3390/en14144222.

Bekker, A., van Dijk, M., Niebuhr, C.M., and Hansen, C., (2021), "Framework development for the evaluation of conduit hydropower within water distribution systems: A South African case study", *Journal of Cleaner Production*, 283, 125326, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125326.

load shifting", *Applied Energy*, 298, 117194, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117194.

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

Capodaglio, A.G., and Olsson, G., (2020), "Energy issues in sustainable urban wastewater management: Use, demand reduction and recovery in the urban water cycle", *Sustainability*, 12(1), 266, https://doi.org/10.3390/su12010266.

Delanka-Pedige, H.M.K., Munasinghe-Arachchige, S.P., Abeysiriwardana-Arachchige, I.S.A., and Nirmalakhandan, N., (2021), "Evaluating wastewater treatment infrastructure systems based on UN Sustainable Development Goals and targets", *Journal of Cleaner Production*, 298, 126795, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126795.

Elavarasan, R.M., Pugazhendhi, R., Jamal, T., Dyduch, J., Arif, M.T., Kumar, N.M., Shafiullahg, G.M., Chopra, S.S., and Nadarajahh, M., (2021), "Envisioning the UN Sustainable Development Goals (SDGs) through the lens of energy sustainability (SDG 7) in the postCOVID-19 world", *Applied Energy*, 292, 116665, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116665.

Eurostat (2022), "Population connected to at least secondary wastewater treatment", Viewed on 26 July 2022, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_06_20/default/table?lang=en.

Kehrein, P., van Loosdrecht, M., Osseweijer, P., Posada, J., and Dewulf, J., (2020), "The SPPD-WRF framework: A novel and holistic methodology for strategical planning and process design of water resource factories", *Sustainability*, 12(10), 4168, https://doi.org/10.3390/su12104168.

Kretschmer, F., Neugebauer, G., Stoeglehner, G., and Ertl, T., (2018), "Participation as a key aspect for establishing wastewater as a source of renewable energy", *Energies*, 11(11), 3232, https://doi.org/10.3390/en11113232.

Llácer-Iglesias, R.M., López-Jiménez, P.A., and Pérez-Sánchez, M., (2021), "Energy self-sufficiency aiming for sustainable wastewater systems: Are all options being explored?", *Sustainability*, 13(10), 5537, https://doi.org/10.3390/su13105537.

Paulu, A., Bartáˇcek, J., Šerešová, M., and Koˇcí, V., (2021), "Combining process modelling and lca to assess the environmental impacts of wastewater treatment innovations", *Water*, 13(9), 1246, https://doi.org/10.3390/w13091246.

Pérez-Sánchez, M., Sánchez-Romero, F.J., Ramos, H.M., and López-Jiménez, P.A., (2017), "Energy recovery in existing water networks: Towards greater sustainability", *Water*, 9(2), 97, https://doi.org/10.3390/w9020097.

Revollar, S., Meneses, M., Vilanova, R., Vega, P., and Francisco, M., (2021), "Eco-efficiency assessment of control actions in wastewater treatment plants", *Water*, 13(5), 612, https://doi.org/10.3390/w13050612.

Tkac, S., (2018), "Hydro power plants, an overview of the current types and technology", *Civil Engineering*, 13, 115-126, https://doi.org/10.1515/sspjce-2018-0011

Zohrabian, A., and Sanders, K.T., (2021), "Emitting less without curbing usage? Exploring greenhouse gas mitigation strategies in the water industry through

جناب آقای مهندس یاسر اسماعیلی
رئیس هیئت مدیره و مدیرعامل شرکت آب و فاضلاب کاشان

*** با توجه به جایگاه ویژه کاشان ازنظر جغرافیایی، اقتصادی و فرهنگی، اهمیت راهبردی مدیریت منابع آب در این منطقه چگونه ارزیابی می‌شود؟**

شهرستان کاشان به‌دلیل موقعیت ویژه‌اش در مرکز کشور، هم‌جواری با چهار استان مهم (اصفهان، قم، تهران و سمنان) و قرارگرفتن در کریدور ارتباطی غرب به شرق، همواره نقشی فراتر از یک شهر معمولی داشته است. این منطقه با سابقه‌ای نزدیک به ۶۰ سال در بهره‌مندی از شبکه مدرن آب، یکی از نخستین شهرهای کشور در این زمینه محسوب می‌شود. وجود جاذبه‌های گردشگری، صنایع بزرگ و مراکز علمی و فرهنگی نیز سبب شده که آب به‌عنوان محور اصلی توسعه منطقه شناخته شود. از این‌رو، ضرورت وجود یک شرکت مستقل آب و فاضلاب برای کاشان از همان ابتدا احساس می‌شد که نهایتاً در سال ۱۳۷۱، هم‌زمان با تشکیل شرکت‌های استانی، این شرکت به‌صورت رسمی تأسیس شد.

*** با توجه به محدودیت‌های منابع آبی، رویکردهای مدیریتی شرکت در سال‌های اخیر به چه سمت‌وسویی رفته‌اند؟**

- در سال‌های اخیر، به‌ویژه با توجه به کاهش نزولات جوی و محدودیت توسعه منابع جدید، رویکرد ما از مدیریت عرضه به سمت مدیریت تقاضا، مدیریت مصرف و مدیریت هدررفت تغییر یافته است. در دهه سوم عمر شرکت‌های آب و فاضلاب، این سه محور به‌عنوان پایه‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی عملیاتی مورد تأکید قرار گرفته‌اند.

*** لطفاً اقدامات شرکت در هریک از این سه محور را به تفکیک توضیح دهید.**

- در محور مدیریت تقاضا، ما توسعه زیرساخت‌های فاضلاب و استفاده از پساب تصفیه‌شده را برای مصارف صنعتی، تجاری و فضای سبز در دستور کار قرار داده‌ایم. اکنون بخشی از نیاز صنایع و فضای سبز شهری از پساب تصفیه‌خانه‌های کاشان، قمصر و نیاسر تأمین می‌شود و تفاهم‌نامه‌هایی برای گسترش این ظرفیت منعقد شده است.

در مدیریت مصرف، آمارها نشان می‌دهد که بیش از ۷۰ درصد مشترکان خانگی، مصرفی در حد الگو یا پایین‌تر دارند. برای گروه پرمصرف، پس از اخطار، اقدامات قطع انشعاب در صورت تداوم رفتار مصرفی نادرست به‌ویژه در فصل تابستان اجرا می‌شود. هم‌زمان، برنامه‌های فرهنگ‌سازی گسترده‌ای با مشارکت نهادهایی مانند آموزش و پرورش و رسانه‌ها در حال اجراست.

در محور مدیریت هدررفت آب، اقدامات متعددی اجرا شده است: از جمله راه‌اندازی سامانه ۱۲۲، مکانیزه‌سازی واحد حوادث، هوشمندسازی تاسیسات، نشت‌یابی فعال شبکه به‌ویژه در مناطق فرسوده، کنترل از راه دور مخازن و شناسایی انشعابات غیرمجاز.

*** در سال ۱۴۰۳ چه دستاوردهای اجرایی در زمینه کاهش هدررفت حاصل شد؟**

- در سال جاری، موفق شدیم حدود ۳۰۰ کیلومتر شبکه را نشت‌یابی کنیم که معادل صرفه‌جویی حدود ۳۰ لیتر بر ثانیه است. هم‌چنین، ۳۳ کیلومتر اصلاح شبکه و انشعابات انجام شده و ۳۲۲۲ کنتور معیوب تعویض شده است. علاوه‌بر این، شناسایی و تبدیل ۲۰۳ فقره انشعاب غیرمجاز با درآمد بیش از ۷۳۵ میلیون تومان صورت گرفته و بیش از ۱۲ هزار حادثه شبکه و انشعاب رسیدگی شده است..

*** نگاه شما به ساختار نهادی و حقوقی شرکت‌های آب و فاضلاب چیست؟ آیا این ساختار پاسخگوی چالش‌های امروز هست؟**

- واقعیت این است که شرکت‌های آب و فاضلاب ساختاری دوگانه دارند؛ نه کاملاً دولتی هستند و نه خصوصی. این وضعیت موجب شکل‌گیری خلأهای نرم‌افزاری و تصمیم‌گیری شده است. از طرف دیگر، مشارکت بخش خصوصی هنوز در حد مطلوب نیست. درحالی‌که توسعه تاسیسات به سرمایه‌گذاری‌های کلان نیاز دارد، فقدان قوانین مشوق و تضمین بازگشت سرمایه موجب بی‌میلی سرمایه‌گذاران شده است.

*** مهم‌ترین چالش‌های کیفی و ساختاری که هم‌اکنون با آن مواجه هستید کدامند؟**

- از جمله چالش‌های اصلی، می‌توان به فرسودگی زیرساخت‌ها، هدررفت بالا، پایین بودن تعرفه‌ها و واقعی نبودن قیمت آب اشاره کرد. این‌ها موجب شده‌اند منابع مالی لازم برای نگهداشت و ارتقای سیستم تأمین نشود. هم‌چنین، کاهش کیفیت منابع آب به‌ویژه در بخش شرب، چالش مضاعفی است که به‌دلیل تغییر اقلیم و افزایش آلودگی منابع سطحی و زیرزمینی تشدید شده است.

*** در حوزه فاضلاب چه اقداماتی صورت گرفته و چه چالش‌هایی باقی است؟**

- از سال ۱۳۷۵، احداث شبکه فاضلاب در کاشان آغاز شده و تاکنون بیش از ۵۰۰ کیلومتر شبکه و ۱۲ کیلومتر خط انتقال ایجاد شده است. با این‌حال، محدودیت منابع مالی مانع پوشش کامل شهر شده است. هم‌چنین، عدم وجود قوانین الزام‌آور برای استفاده از پساب در صنایع و کشاورزی و عدم همکاری برخی نهادهای شهری در مدیریت روان‌آب‌ها، از چالش‌های نرم‌افزاری جدی ماست.

*** جایگاه پژوهش و نوآوری در برنامه‌های شرکت چیست؟**

- پژوهش برای ما یک ضرورت است. همکاری نزدیکی با دانشگاه‌ها، انجمن‌ها و مراکز تحقیقاتی داریم تا مسائل صنعت را علمی و پایدار حل کنیم. پژوهش می‌تواند کیفیت خدمات را ارتقا دهد، هزینه‌ها را کاهش دهد و به تصمیم‌سازی‌های بهتر کمک کند. آینده صنعت آب و فاضلاب بدون پژوهش و نوآوری قابل تصور نیست.

*** چشم‌انداز شما برای آینده صنعت آب و فاضلاب چیست؟**

- اگر بخواهم واقع‌بینانه و هم‌زمان امیدوارانه به آینده این صنعت نگاه کنم، باید بگویم که چشم‌انداز آن کاملاً وابسته به تصمیم‌هایی است که امروز اتخاذ می‌کنیم و نحوه مواجهه ما با چالش‌های چندوجهی منابع آب. ما ناگزیر به حرکت به‌سوی یک نظام مدیریت یکپارچه منابع آب هستیم؛ نظامی که نیازهای همه بخش‌ها، از کشاورزی گرفته تا صنعت، شرب و حتی محیط‌زیست را به‌طور هم‌زمان و متوازن لحاظ کند. بدون چنین رویکرد کل‌نگری، نمی‌توان به توسعه پایدار امیدوار بود یا منابع آبی را برای نسل‌های آینده حفظ کرد.

از سوی دیگر، واقعی‌سازی قیمت آب البته با در نظر گرفتن حمایت‌های هدفمند از اقشار آسیب‌پذیر گام مهمی در اصلاح الگوی مصرف و استفاده عادلانه از منابع است. تحقق این هدف، نیازمند اجماع سیاستی و اجتماعی است، اما اگر با دقت اجرا شود، می‌تواند یکی از مؤلفه‌های کلیدی پایداری باشد.

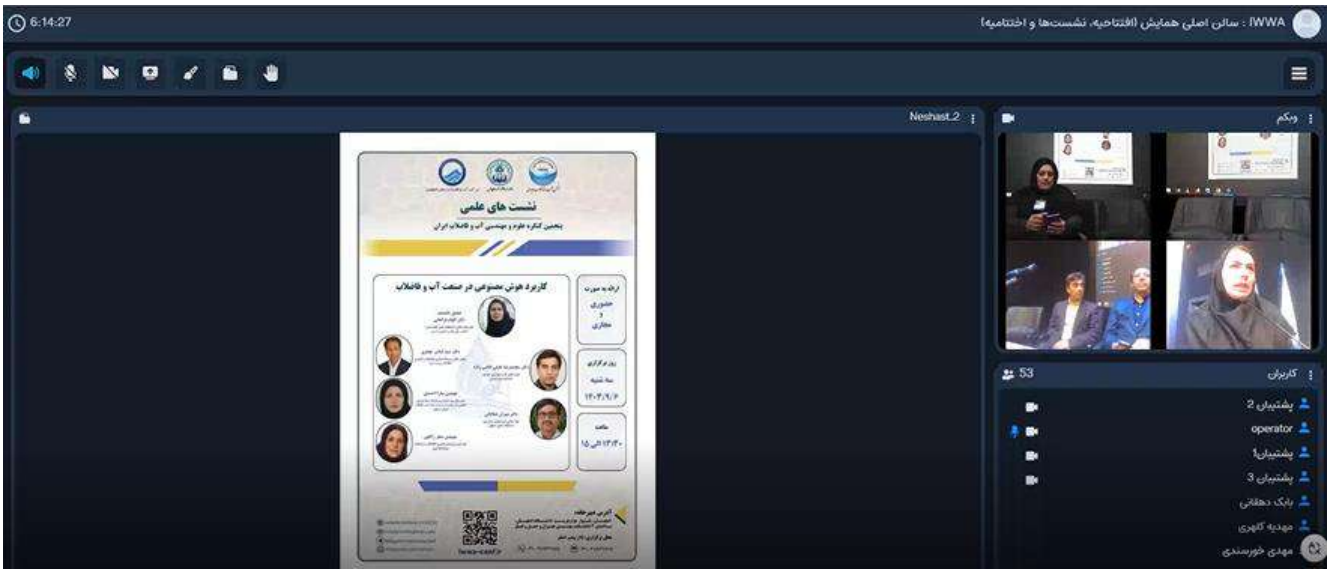
موضوع مهم دیگر، نقش بخش خصوصی است. واقعیت این است که دولت به‌تنهایی نمی‌تواند بار توسعه زیرساخت‌های آبی را به دوش بکشد. ما باید بستر حضور فعال و مؤثر بخش خصوصی را با بازنگری در مقررات، طراحی پروژه‌های جذاب و کاهش ریسک سرمایه‌گذاری فراهم کنیم. این مشارکت می‌تواند تحول‌آفرین باشد. در نهایت، فناوری به‌ویژه هوش مصنوعی را نمی‌توان نادیده گرفت. از پیش‌بینی دقیق بارش‌ها و مدیریت منابع، تا شناسایی نشت‌ها و بهینه‌سازی عملکرد تصفیه‌خانه‌ها، هوش مصنوعی فرصتی بی‌نظیر برای افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده در اختیار ما قرار می‌دهد.

در مجموع، آینده‌ای را برای این صنعت متصورم که هوشمند، مشارکتی و مسئولانه است؛ آینده‌ای که در آن آب نه صرفاً یک ماده حیاتی، بلکه عنصری راهبردی در مسیر توسعه پایدار و مسئولیت‌پذیری بین‌نسلی تلقی می‌شود.

نشست تخصصی کاربرد هوش مصنوعی در صنعت 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/wjprm10



اعضای نشست:

مهندس سارا احمدی (مدیر دفتر بهره‌برداری و توسعه شبکه توزیع و کاهش آب بدون درآمد، شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان)

دکتر سید عباس جعفری (مشاور معاون سرمایه انسانی، تحقیقات و فناوری اطلاعات وزارت نیرو)

دکتر محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده (عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی)

مهندس سحر راکعی (عضو گروه پژوهشی فناوری اطلاعات و ارتباطات وزارت نیرو)

دکتر مهران صفایانی (عضو هیات علمی گروه هوش مصنوعی، دانشگاه صنعتی اصفهان)

دکتر الهام فراهانی (عضو هیات علمی دانشگاه و عضو هیات مدیره انجمن ملی هوش مصنوعی ایران، مدیر نشست)

دکتر الهام فراهانی:

بسم‌الله الرحمن الرحیم. بسیار خرسندم که امروز در جمع صنعت آب و فاضلاب کشور حضور دارم تا در خصوص موضوع هوش مصنوعی در این صنعت گفتگو کنیم. اینجانب الهام فراهانی، عضو هیئت علمی دانشگاه و هم‌چنین عضو هیئت موسس و عضو هیئت مدیره انجمن هوش مصنوعی ایران هستم. انجمن مذکور حدود ۹ ماه پیش تأسیس شده است و با توجه به روند رو به رشد مباحث مرتبط با هوش مصنوعی در این بازه زمانی کوتاه، توانسته فعالیت‌های قابل‌توجهی را انجام دهد. امروز نیز در خدمت شما هستیم. از برگزارکنندگان محترم این کنگره، شامل دانشگاه اصفهان، شرکت آب و فاضلاب استان تهران و هم‌چنین انجمن آب و فاضلاب ایران صمیمانه تشکر می‌کنم. هم‌چنین از جناب آقای دکتر تابش که هماهنگی این نشست را برعهده داشتند، سپاسگزارم که این فرصت را فراهم کردند تا در خدمت شما باشیم.

ابتدا دوستان را معرفی خواهم کرد و سپس از اولین ارائه‌دهنده دعوت می‌کنم. پس از آن، این‌جانب به عنوان دومین ارائه‌دهنده در خدمت شما خواهم بود. در این پنل، جناب آقای دکتر جعفری از وزارت نیرو حضور دارند که ایشان فعالیت‌هایی را در زمینه نقشه راه هوش مصنوعی در وزارت نیرو آغاز کرده‌اند و ان‌شاءالله از تجربیات ارزشمند ایشان در این حوزه بهره‌مند خواهیم شد.

هم‌چنین جناب آقای دکتر جلیلی قاضی‌زاده، عضو هیئت

علمی دانشگاه شهید بهشتی و عضو هیئت مدیره انجمن آب و فاضلاب ایران، حضور دارند که درباره ارتباط میان دو انجمن مطالبی را ارائه خواهند کرد.

جناب آقای دکتر صفایانی، عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی اصفهان و از اعضای هیئت موسس انجمن هوش مصنوعی ایران نیز در این پنل حضور دارند و از ایشان خواهیم شنید که در حوزه هوش مصنوعی در کشور چه اقداماتی صورت‌گرفته و با چه چالش‌هایی مواجه هستیم.

علاوه‌بر این، سرکار خانم مهندس احمدی از شرکت آب و فاضلاب تهران به نمایندگی از شرکت‌های آب و فاضلاب حضور دارند تا ما را در جریان اقدامات انجام‌شده و برنامه‌های آینده شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان قرار دهند. در ادامه، سرکار خانم مهندس راکعی از پژوهشگاه نیرو نیز تشریف آورده‌اند تا تجربیات پژوهشی و تحقیقاتی خود در زمینه هوش مصنوعی در صنعت آب و برق را با ما به اشتراک بگذارند.

از حضور همه عزیزان تشکر می‌کنم و دعوت می‌کنم جناب آقای دکتر صفایانی به مدت ۱۰ دقیقه سخنان خود را ارائه دهند تا از آخرین تحولات و اخبار حوزه هوش مصنوعی بهره‌مند شویم.

دکتر مهران صفایانی:

بسم‌الله الرحمن الرحیم. از خانم دکتر بابت معرفی و هم‌چنین از برگزارکنندگان این همایش تشکر می‌کنم. بسیار خرسندم که موضوع هوش مصنوعی مورد توجه قرار گرفته است و به‌عنوان فردی که حدود ۲۰ سال در این حوزه فعالیت داشته‌ام، اکنون مشاهده می‌کنم که صنایع مختلف و از بخش‌های مختلف توجه ویژه‌ای به هوش مصنوعی نشان می‌دهند.

در این‌جا قصد دارم به چند محور اساسی بپردازم: ۱) تعریف مسئله هوش مصنوعی؛ ۲) این‌که گاهی برخی مواردی که جزء هوش مصنوعی نیستند، به اشتباه به‌عنوان هوش مصنوعی معرفی می‌شوند، بنابراین لازم است تعریف دقیق و صحیحی ارائه شود؛ ۳) مروری بر تاریخچه و روند پیشرفت هوش مصنوعی در جهان؛ ۴) چالش‌های فعلی جهانی در این حوزه و اتفاقات احتمالی آینده؛ ۵) بررسی این‌که آیا رویکرد و نگاه ما به این حوزه، رویکرد درستی است یا خیر.

قصد ندارم وارد جزئیات صنعت آب شوم و بیشتر مایلم بحث کلی هوش مصنوعی را مطرح کنم و دوستان دیگر نیز در ادامه به کاربردهای مشخص‌تر خواهند پرداخت. اگر بخواهیم تعریفی ارائه دهیم، هوش مصنوعی به معنای اعطای قابلیت‌هایی که انسان‌ها دارند به کامپیوتر یا ماشین است. این قابلیت‌ها شامل توانایی حل مسئله، تصمیم‌گیری، یادگیری از تجربیات، تعامل با انسان و درک ورودی‌های جدید است که هدف ما انتقال این قابلیت‌ها به ماشین‌ها است. در این‌جا معمولاً یک خلط مبحث رخ می‌دهد و آن این است که هوش مصنوعی با هوشمندسازی اشتباه گرفته می‌شود. هوشمندسازی به این معنا است که، برای مثال، سنسور بارانی وجود دارد که هنگام بارش باران واکنشی انجام می‌دهد، یا کنترل هوشمندی که براساس زمان پیک یا مصرف برق تصمیم‌گیری می‌کند. این‌ها بیشتر در حوزه هوشمندسازی قرار دارند، نه هوش مصنوعی. هوش مصنوعی به معنای یادگیری از داده‌ها است؛ یعنی ماشین بتواند از داده‌های پیشین یا تجربیات مشابه، الگوهایی را بیاموزد و روابط جدیدی را کشف کند. برای مثال، هنگامی که من از یک فروشگاه خرید می‌کنم و برخی محصولات را انتخاب نمی‌کنم اما سایر افراد با شخصیت مشابه تجربیات متفاوتی دارند، سیستم با توجه به خریدهای من و سایر افراد، پیشنهادهای جدیدی را ارائه می‌دهد. این نمونه‌ای است از یادگیری از داده‌های قبلی برای ارائه موارد جدید.

در مورد تاریخچه هوش مصنوعی، نخستین بار این موضوع حدود سال ۱۹۵۰ مطرح شد. در آن سال، آلن تورینگ برای نخستین بار این بحث را ارائه کرد. در همان دهه، اولین رخداد مهم، ظهور شبکه‌های عصبی مصنوعی بود. ایده بر این بود که نورون‌های بیولوژیکی مغز انسان شبیه‌سازی شوند و معادل آن‌ها در کامپیوتر ساخته شود تا رفتار مشابهی ایجاد شود. زیرا انسان‌ها با همین نورون‌ها قادر به انجام بسیاری از کارها هستند؛ در مغز انسان حدود ۱۰۰ میلیارد نورون و نزدیک به ۱۰۰ تریلیون ارتباط بین آن‌ها وجود دارد. با توجه به تجربیات شخصی طی این ۲۰ سال، باید بگویم تحول بعدی، ظهور شبکه‌های عصبی جدید بود که در دهه ۱۹۸۰ رخ داد و منجر به توسعه بیشتر شبکه‌های عصبی و کاربرد آن‌ها در پردازش تصویر شد. تحول اساسی بعدی ظهور یادگیری عمیق (Deep Learning) در سال ۲۰۱۲ بود. پیش از آن دو مشکل عمده وجود داشت: نیاز به حجم بالای پردازش و نیاز به داده‌های بسیار زیاد. در سال ۲۰۱۲، هر دو نیاز برطرف شد؛ دسترسی به پردازنده‌های قوی مانند GPU و داده‌های فراوان فراهم شد.

در این سال، شبکه‌ای به نام «الکس‌نت» معرفی شد که با

بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی عمیق و نوآوری‌های ویژه توانست نتایج فوق‌العاده‌ای کسب کند و رکوردهای موجود را جابه‌جا نماید.

از همین سال، شرکت‌های بزرگ به‌طور جدی وارد حوزه هوش مصنوعی شدند. به‌عنوان مثال، مایکروسافت و گوگل به‌صورت جدی وارد شدند و Open AI نیز در سال ۲۰۱۵ آغاز به‌کار کرد و پس از ۹ سال فعالیت، امسال به درآمدی حدود ۳/۷ میلیارد دلار رسیده است. تحول بعدی در سال ۲۰۱۷ رخ داد. شبکه‌های ترنسفورمر توسط تیمی از گوگل معرفی شدند و به باور من، انقلابی در هوش مصنوعی ایجاد شد. از سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ به بعد، مدل‌های زبانی بزرگ بر پایه ترنسفورمرها معرفی شدند؛ احتمالاً با مدل GPT آشنا هستید که بر همین مبنا ساخته شده و حرف T در نام آن به ترنسفورمر اشاره دارد. در حال حاضر، نسخه‌های مختلفی از این مدل‌های زبانی منتشر شده است؛ برای نمونه GPT-4 حدود ۱/۸ تریلیون پارامتر و GPT-3.5 حدود ۱۷۵ میلیارد پارامتر دارد. این مدل‌ها با داده‌هایی در مقیاس تریلیون آموزش دیده‌اند. کم‌کم به آنچه در ابتدا اشاره شد یعنی تعداد نورون‌های مغز انسان نزدیک می‌شویم. اکنون شبکه‌هایی که در اختیار داریم، به این اعداد نزدیک می‌شوند. ایده‌ها و رؤیاهایی که از سال ۱۹۵۰ مطرح بود، امروزه در حال تحقق است.

در ادامه مایلم اندکی درباره آینده هوش مصنوعی صحبت کنم. این مطالب را از سخنان آقای ایلان ماسک در روزهای اخیر نقل می‌کنم. ایشان عنوان کردند که به‌زودی هوش مصنوعی جایگزین پزشکان و وکلا خواهد شد. شاید در نگاه نخست این سخن بزرگ به‌نظر برسد اما با توجه به پیشرفت‌های هوش مصنوعی، چندان هم دور از انتظار نیست. یعنی، در گذشته هدف هوش مصنوعی انجام کارهای انسانی بود؛ اما اکنون هدف، انجام تخصص‌های انسانی از جمله پزشکی، وکالت، مشاوره و آموزش است. حتی آموزشی که امروز در دانشگاه‌ها ارائه می‌شود نیز قطعاً تحت تأثیر هوش مصنوعی قرار خواهد گرفت.

یکی از چالش‌های جدی در زمینه هوش مصنوعی، ضرورت توجه ویژه به آن است. باید دید چه اتفاقاتی در سال‌های آینده خواهد افتاد و آمادگی لازم را کسب کرد. پیش‌بینی می‌شود که بسیاری از مشاغل تحت تأثیر جدی هوش مصنوعی قرار گیرند؛ برای نمونه رانندگان، فروشندگان، معلمان، اساتید دانشگاه، حوزه‌های مالی، پزشکی و مشاوره، از جمله حوزه‌هایی هستند که هوش مصنوعی در آن‌ها وارد خواهد شد، چه بخواهیم و چه نخواهیم.

باید از اکنون به آن اندیشید؛ کسانی که امروز تصمیم به ادامه تحصیل دارند، باید به آینده پنج سال بعد توجه داشته باشند.

نکته پایانی که می‌خواهم به آن اشاره کنم، میزان سرمایه‌گذاری انجام‌شده در حوزه هوش مصنوعی است. سرمایه‌گذاری‌هایی که اکنون در هوش مصنوعی صورت می‌گیرد، بسیار بزرگ است. برای نمونه در سال ۲۰۲۲، حدود ۵۶ میلیارد دلار فقط در زمینه مدل‌های مولد (Generative AI) سرمایه‌گذاری شده که ۸۰ درصد آن در آمریکا انجام شده است. متأسفانه در ایران هنوز این توجه جدی و سرمایه‌گذاری کافی در زمینه هوش مصنوعی صورت نگرفته است. مسئولین نیز نسبت به چالش‌ها و فرصت‌های موجود در این حوزه آگاهی کافی ندارند و هنوز این موضوع جدی گرفته نشده است. با این‌حال، بررسی‌ها نشان می‌دهد که تنها در حوزه آب و صرفه‌جویی حدود ۶ میلیارد دلار سرمایه‌گذاری انجام شده است و در سال ۲۰۲۰ در آمریکا، اروپا و برخی کشورهای دیگر حدود ۷۹ میلیارد دلار در این حوزه سرمایه‌گذاری شده است. همه این‌ها به‌دلیل قابلیت‌ها و فرصت‌هایی است که هوش مصنوعی ایجاد می‌کند. بیش از این وقت شما را نمی‌گیرم و از توجه شما سپاسگزارم.

دکتر الهام فراهانی:

بار دیگر تشکر می‌کنم و خیر مقدم عرض می‌کنم خدمت سرکار خانم دکتر باغبان، مدیر دفتر کنترل کیفیت آب استان تهران که در این نشست حضور دارند. امیدواریم در آینده، در بحث کنترل کیفیت آب تهران، شاهد اجرای پروژه‌های مؤثری در حوزه هوش مصنوعی باشیم. هم‌چنین از جناب آقای دکتر صفایانی بابت آشنایی با مفاهیم هوش مصنوعی و تبیین وضعیت فعلی دنیا و جایگاه محدود ما در این حوزه، تشکر می‌کنم.

سخنان خود را با بیانات مقام معظم رهبری آغاز می‌کنم. ایشان در سال ۱۴۰۰ تأکید کردند که باید جزو ده کشور اول دنیا باشیم. اکنون لازم است بررسی کنیم که در چه جایگاهی قرار داریم. هم‌چنین در سال ۱۴۰۲، به مباحثی چون هوش مصنوعی، کوانتوم و اینترنت اشاره کردند و فرمودند با روش‌های قدیمی نمی‌توان ادامه داد و باید از ابزارهای نوین و فناوری روز بهره‌گرفت. این پرسش مطرح می‌شود که در صنعت آب و فاضلاب، تا چه میزان از فناوری‌های روز دنیا بهره‌مند شده‌ایم؟ در سال ۱۴۰۳ نیز، در مراسم تنفیذ ریاست جمهوری جناب آقای دکتر پزشکیان، بر ضرورت برخورد فعالانه با موضوعاتی مانند هوش مصنوعی تأکید شد. اکنون این سؤال مطرح است که از ابتدای امسال تاکنون، مسئولین ما تا چه اندازه فعالانه در این زمینه ورود کرده‌اند و در صنعت آب و فاضلاب چه اقدامات قابل‌توجهی انجام

شده است؟ هم‌چنین مقام معظم رهبری در دیدار هیئت دولت چهاردهم، مورخ ۱۴۰۳/۰۶/۰۶، فرمودند که در بحث هوش مصنوعی نباید تنها به کاربردها پرداخت و باید به زیرساخت‌ها نیز توجه شود. سؤال اساسی این است که در صنعت آب و فاضلاب، تا چه اندازه به بحث زیرساخت‌ها در زمینه هوش مصنوعی توجه شده است؟ زیرساخت‌ها شامل چه مواردی می‌شوند؟ بیاییم وضعیت کشور را در حوزه هوش مصنوعی بررسی کنیم. برای مثال، در سال ۲۰۲۲، رتبه ایران در شاخص آمادگی هوش مصنوعی دولت چند بوده است؟ شرکت آکسفورد با همکاری یک نهاد دیگر این شاخص را ارزیابی کرده و در سال ۲۰۲۳، ایران رتبه ۹۴ را کسب کرده است، در حالی که سال قبل رتبه ۷۵ را داشتیم؛ یعنی ۱۹ پله سقوط. دلیل این سقوط آن است که ما اقدامی انجام نداده‌ایم اما سایر کشورها با سرعت در حال پیشرفت هستند. کشورهای همسایه مانند امارات، عمان، عربستان و قطر سرمایه‌گذاری‌های قابل‌توجهی در زمینه هوش مصنوعی انجام داده‌اند. به همکاری‌های اخیر عربستان و امارات با شرکت مایکروسافت توجه کنیم. باید ببینیم ما چه میزان سرمایه‌گذاری داشته‌ایم؟ از ابتدای سال تاکنون چند GPU وارد کشور شده است؟ این GPU ها در چه حوزه‌هایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند؟ اگر آمارها را بررسی کنیم، وضعیت ما واقعاً مناسب نیست. امتیاز کل ایران در سه رکن فناوری، دولت و داده و زیرساخت، کاهش چشمگیری داشته است. مثلاً در رکن فناوری، امتیاز ما از ۴۵ در سال ۲۰۲۲ به ۲۲ در سال ۲۰۲۳ رسیده است؛ یعنی در هر سه رکن اصلی سقوط داشته‌ایم.

رکن فناوری به معنای استفاده از هوش مصنوعی در کاربردهای مختلف است. در رکن دولت، حتی سازمان هوش مصنوعی که داریم، هنوز اساسنامه‌اش تصویب نشده است. وزارتخانه‌ها چطور؟ آیا وزارت هوش مصنوعی داریم؟ آیا شرکت‌های نفت و آب و فاضلاب مشاور هوش مصنوعی دارند؟ نقشه راه یا استراتژی مشخصی برای هوش مصنوعی تدوین شده است؟ این‌ها همه مربوط به رکن دولت است. در رکن داده و زیرساخت، گفته می‌شود که «هوش مصنوعی گرسنه داده است». یعنی بدون داده مناسب و ساختارمند، هوش مصنوعی عملاً کارایی نخواهد داشت. در صنعت آب و فاضلاب، داده‌ها تا حدی وجود دارند اما هنوز استفاده بهینه از آن‌ها در حوزه هوش مصنوعی صورت نگرفته است. در زمینه زیرساخت، بحث GPU و کارت‌های گرافیکی بسیار حائز اهمیت است. این تجهیزات هزینه بالایی دارند و به‌دلیل تحریم‌ها، به کشورهایی مانند ایران به‌راحتی ارائه نمی‌شوند؛ حتی کشورهای منطقه مانند امارات و عربستان نیز به‌صورت محدود به آن‌ها دسترسی دارند. اکنون اگر بخواهیم یک GPU سفارش دهیم، حتی با دور زدن تحریم‌ها، حدود شش ماه زمان می‌برد تا به گمرک برسد و یک ماه نیز در گمرک می‌ماند. به عبارتی، حداقل هفت ماه طول می‌کشد تا بتوان یک سیستم سروری با هشت کارت گرافیکی وارد کرد که هزینه‌ای بالغ بر ۵۰ میلیارد تومان برای هر سرور خواهد داشت. با توجه به نرخ ارز و پتانسیل مالی صنعت، وضعیت مشخص است.

در شاخص آمادگی هوش مصنوعی، ایران اکنون در رتبه ۱۱۳ از ۱۷۴ کشور قرار دارد که کمترین امتیاز مربوط به سودان است. به نقل از وزیر ارتباطات که عضو هیئت موسس و هیئت مدیره انجمن ما نیز هستند، در همایش نظام‌های پرداخت بانک مرکزی بیان کردند: «قدرت تخریب هوش مصنوعی از بمب اتم بیشتر است»؛ چرا که دسترسی به آن ساده‌تر است. از سوی دیگر، در حوزه‌های حیاتی کشور مانند آب، می‌توان اقدامات مؤثری انجام داد اما اگر مدیریت نشود، آسیب‌های جدی نیز محتمل است.

تفاوت داده‌کاوی و هوش مصنوعی نیز باید مشخص باشد. بسیاری از شرکت‌های فعال در حوزه آب و انرژی، فعالیت‌های خود را به‌عنوان هوش مصنوعی معرفی می‌کنند، اما در واقع بیشتر به تحلیل داده یا داده‌کاوی می‌پردازند؛ یعنی داده‌های آماری و گرافیکی را جمع‌آوری و تحلیل می‌کنند. داده‌کاوی یعنی استخراج روابط و نتیجه‌گیری از داده‌های موجود، اما هوش مصنوعی فراتر رفته و مدل‌سازی انجام داده و آینده را پیش‌بینی می‌کند. مثلاً در صنعت آب، تحلیل داده فقط وضعیت فعلی را توصیف می‌کند، در حالی که هوش مصنوعی می‌تواند پیش‌بینی و پیشنهاد ارائه دهد.

در زمینه هوشمندی و هوش مصنوعی نیز باید تفاوت قائل شویم. برای مثال، سیستم‌های کنترل آب براساس داده‌های آنلاین تصمیم‌گیری می‌کنند و این هوشمندی است. اما زمانی که داده‌ها زیاد شده و الگوریتم‌های پیشرفته به‌کار گرفته شوند، می‌توان مدل‌سازی و تحلیل دقیق‌تر داشت، حتی با داده‌های تصویری می‌توان پیش‌بینی‌هایی انجام داد.

در حوزه کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت آب، یکی از مهم‌ترین موارد، پیش‌بینی خرابی‌های احتمالی زیرساخت‌هاست؛ به این‌صورت که می‌توان سیستم PM (پیش‌بینی خرابی) را پیاده‌سازی کرد تا قبل از وقوع خرابی، اقدامات لازم انجام شود. موضوع دیگر، بهبود شبکه و کنترل هدررفت آب از طریق تحلیل فشار و جریان است که با داده‌های مختلف پیش‌بینی می‌شود در کدام نقاط احتمال نشت وجود دارد و با استفاده از مدل‌های بهبود یافته، عملکرد سیستم ارتقا می‌یابد.

هم‌چنین، ارتقای کیفیت آب از طریق بررسی سنسورها و

پیش‌بینی آلودگی‌ها، کاهش مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های آب و شناسایی محل شکستگی لوله‌ها با استفاده از تصاویر، از دیگر کاربردهای مهم هوش مصنوعی است. به‌عنوان مثال، دوربینی که وارد لوله آب می‌شود، می‌تواند محل شکستگی را تشخیص دهد.

در بحث پیش‌بینی مصرف مشترکین نیز با استفاده از داده‌های گذشته، می‌توان تقاضای آینده را برآورد کرد. تغییرات اقلیمی، خشکسالی و سیل نیز از موضوعاتی هستند که در وزارت کشاورزی پروژه‌هایی تعریف شده و مورد توجه قرار گرفته است. لازم است در صنعت آب نیز به این مباحث پرداخته شود. تأکید می‌کنم که باید بر هوش مصنوعی متمرکز شویم، نه صرفاً هوشمندی. مطالعه پروژه سنگاپور توصیه می‌شود؛ این کشور هم‌اکنون رتبه اول را دارد و در حوزه‌های مختلف آب و فاضلاب، از هوش مصنوعی بهره می‌برد.

در صنعت آب و فاضلاب، چالش‌هایی چون کیفیت و کمیت داده، نبود هماهنگی و مالکیت داده و مشکلات مربوط به نیروی انسانی وجود دارد. نیروی انسانی متخصص در حوزه هوش مصنوعی هزینه بالایی دارد و صنعت توان جذب این نیروها را با حقوق فعلی ندارد. بنابراین، باید نیروهای فعلی آموزش ببینند و با گذراندن دوره‌های هوش مصنوعی، قادر به نظارت و اجرای پروژه‌ها شوند. هم‌چنین تدوین استانداردها، قوانین، مقررات، سرمایه‌گذاری، آموزش و توسعه همکاری‌های بین‌المللی نیز ضروری است. بررسی اقدامات کشورهای دیگر و تدوین نقشه راه هوش مصنوعی، اجرای پایلوت‌های کوچک و راه‌اندازی دیتا سنترها از دیگر نیازهای جدی این حوزه است.

انجمن هوش مصنوعی ایران نیز تحت نظارت وزارت علوم با حدود ۳۰ عضو هیئت موسس فعالیت می‌کند و برنامه‌هایی مانند برنامه تلویزیونی «پرسشگر» را اجرا می‌نماید که یکشنبه‌ها ساعت ۱۱ از شبکه آموزش پخش می‌شود. پیشنهاد می‌کنم در این برنامه شرکت کنید. هم‌چنین از آقای دکتر تابش دعوت می‌شود که به‌عنوان عضو هیئت علمی دانشگاه و فعال در صنعت آب، در این برنامه شرکت نمایند. در نهایت، مجله تخصصی نیز در حوزه هوش مصنوعی راه‌اندازی شده و علاقه‌مندان می‌توانند برای همکاری با انجمن هوش مصنوعی ایران تماس بگیرند. سپاسگزارم که وقت گذاشتید. ببخشید اگر سخنانم طولانی شد.

تشکر از دوستان عزیز، سروران بزرگوار. دعوت می‌کنم از جناب آقای دکتر جعفری از وزارت نیرو، که ببینیم در وزارت نیرو چه اتفاقاتی افتاده تو این زمینه. خوش آمدید. متشکرم.

دکتر سید عباس جعفری:

سلام وقت شما به‌خیر. از آقای دکتر تابش و دکتر جزایری ممنونم که این فرصت را به من دادند تا چند دقیقه‌ای خدمت شما باشم. عرض ادب دارم خدمت همه همکاران عزیزم در صنعت آب و فاضلاب و عزیزان دانش‌پژوه و اساتید محترم دانشگاهی. مطلبی که می‌خواهم عرض کنم کوتاه است و بیشتر یک مقدمه برای تعامل بین شما و وزارت نیرو خواهد بود. وزارت نیرو شامل بخش‌هایی نظیر آب، آب و فاضلاب، برق حرارتی، انرژی‌های تجدیدپذیر، توزیع، انتقال و مدیریت شبکه برق کشور است. ما در این حوزه‌ها کارهای فناورانه انجام می‌دهیم. پژوهشگاه نیرو داریم، مؤسسه تحقیقاتی آب داریم و یک شرکت بسیار بزرگ هم داریم که مالک شرکت‌هایی نظیر مپنا، مهاب قدس و ... است. بنابراین، ما سیطره و محدوده اجرایی بزرگی در کشور داریم.

اگر به داده‌های صنعت آب و فاضلاب نگاه کنیم، به‌عنوان مثال حوزه آب (من بخش برق را مطرح نمی‌کنم چون جلسه اجازه نمی‌دهد)، به‌عنوان نمونه، ما حدود ۲۵ میلیون مشترک داریم. ببینید چقدر جمعیت داریم، چند هزار کیلومتر شبکه آب و فاضلاب داریم، چقدر مخزن داریم. بنابراین می‌توان گفت که ما دارای یک دیتای بسیار بزرگ در کشور هستیم و واقعاً می‌توانیم از آن برای رفع ناترازی‌ها، صیانت از منابع آب یا بهبود خدمات به مردم استفاده کنیم. پس متوجه شدیم در وزارت نیرو که هوش مصنوعی واقعاً می‌تواند کمک زیادی به ما بکند. البته لازمه این کار، اصلاح معماری داده‌ها است. این جمله را هم از آقای دکتر علی‌آبادی گذاشتم که برگرفته از صحبت‌های آقای محرابیان وزیر سابق نیرو است. ایشان گفته بودند که ما ملزم هستیم از فناوری‌های نوین، مانند هوش مصنوعی و تحلیل داده، استفاده کنیم.

یادم هست اردیبهشت ۱۴۰۲، معاونت محترم علمی و فناوری ریاست‌جمهوری پیش‌نویس سند ملی هوش مصنوعی را برای ما ارسال کرد. همان روز متوجه شدیم که صنعت آب نیاز به سند جداگانه‌ای دارد. قبل از این‌که آن سند ابلاغ شود، خودمان مطالعه را شروع کردیم. این را خواهش می‌کنم به‌عنوان یک مطالبه در ذهن داشته باشید که بعد از ابلاغ سند ملی، وزارت نیرو خودش باید دست به‌کار شود و ما این کار را انجام دادیم. شروع کردیم به

نوشتن یک سند، نقشه راه و بخش‌هایی برای اجرای سند. طرح‌های هوش مصنوعی در وزارتخانه را جمع‌آوری کردیم تا ببینیم چه اقداماتی انجام داده‌ایم، در چه جایگاهی قرار داریم و چه توانمندی‌هایی داریم. متأسفانه در سند ملی هوش مصنوعی، اصلاً اشاره‌ای به صنعت آب و فاضلاب نشده بود. ما نیز رسماً گلایه خود را به شورای عالی انقلاب فرهنگی منتقل کردیم، اما منتظر نماندیم و سند جداگانه‌ای تهیه کردیم. این سند بخشی هوش مصنوعی وزارت نیرو، در تاریخ ۱۴۰۳/۰۸/۲۰ ابلاغ شد.

عزیزانی که نیاز به مطالعه سند دارند، من آن را برای آقای دکتر جزایری ارسال می‌کنم تا در هر شبکه یا کانالی که صلاح می‌دانند، در دسترس شما قرار گیرد. این سند چند بخش مهم دارد. با تدوین این سند، یک ستاد با عنوان ستاد راهبری هوش مصنوعی وزارت نیرو تأسیس کردیم. ریاست این ستاد با معاون محترم تحقیقات و فناوری وزارت است. معاونین شرکت‌های مادر تخصصی در حوزه آب و فاضلاب، از جمله آقای مهندس ملایی نیز عضو این ستاد هستند. یک کارگروه هم داریم که شامل مدیران مرتبط با تحقیقات و فناوری اطلاعات است. این ستاد هر سه ماه یک‌بار تشکیل می‌شود. آقای وزیر هم این موضوع را به معاون تحقیقات سپردند. در این سند، اهداف و اقداماتی که باید انجام دهیم مشخص شده است. نمی‌خواهم همه موارد را بخوانم، اما اولین کاری که آغاز کردیم، آموزش هوش مصنوعی به همکاران صنعت آب و فاضلاب بود.

پیشنهاد می‌کنم همکاران به مدیران خود اعلام کنند تا دوره‌های آموزشی عمومی و تخصصی برگزار کنیم. اگر لازم شد، به وزارتخانه اعلام کنید تا مجوز لازم را صادر کنیم و شما بتوانید آموزش ببینید. تا کنون دو گیمیفیکیشن برای آموزش راه‌اندازی کرده‌ایم. ما دیگر قرار نیست با روش‌های قدیمی آموزش بدهیم. همه با گیمیفیکیشن آشنا هستید؛ یک نظام انگیزشی و پاداش‌محور که شخصی‌سازی شده است، نه این‌که کسی به جای من امتحان بدهد و من برای امتیاز شغلی نمره بگیرم!

برای زیرساخت‌ها نیز اقدامات جدی در دستور کار قرارگرفته است. خواهش می‌کنم دوستان حوزه فناوری اطلاعات تجهیزاتی تهیه نکنند که بعداً امکان دیتا ماینینگ با آن‌ها وجود نداشته باشد. این را به مدیرعامل‌ها منتقل کنید؛ تجهیزاتی که در آینده به‌کار ما نمی‌آید، نخرید. لطفاً در نامه‌هایتان به مدیرعامل‌ها ذکر کنید که از همین حالا چه تجهیزاتی باید خریداری شود.

همان‌طور که عزیزان پیش از من نیز اشاره کردند، حتماً در برنامه‌های هوشمندسازی خود از هوش مصنوعی بهره بگیرید. تصور نکنید هوشمندسازی همان هوش مصنوعی است! تاکنون ۱۸ طرح موفق در حوزه برق و آب داشته‌ایم که سه مورد آن در حوزه آب و فاضلاب اجرا شده است. یکی از این پروژه‌ها مربوط به پروژه دکتر جزایری در آب و فاضلاب استان اصفهان است. ما پیگیر هستیم که این پروژه‌ها تجاری‌سازی شوند، در سطح کشور اجرا شده و حتی درصورت نیاز، بهره‌برداری بین‌المللی نیز داشته باشند. شاید تا پایان سال ۱۴۰۴ بتوانیم یک «دالان» ایجاد کنیم که اساتید دانشگاه، شرکت‌های دانش‌بنیان و پارک‌های فناوری به وزارت نیرو متصل شوند. این از جمله اقداماتی است که قصد داریم انجام دهیم.

اگر از من بپرسید اولویت هوش مصنوعی در وزارت نیرو کجاست، باید بگویم هم در بخش برق و هم در بخش آب مورد توجه است. در بخش آب، اولویت وزارت نیرو هوشمندسازی و کنترل کیفیت برداشت و مصرف آب است. ما با کمال میل از هرگونه ایده و پیشنهاد فناورانه در این خصوص استقبال می‌کنیم. در ابتدا با فاضلاب اصفهان و مهندس احمدی مطرح کنید و با ایشان در تماس باشید. خانم مهندس راه ارتباط با ما را می‌دانند و به شیوه مناسب منعکس می‌کنند. اگر لازم باشد، با خانم دکتر راکعی از پژوهشگاه نیز موضوع را مطرح کنید.

مسائلی مانند بهبود راندمان تأسیسات، تحلیل وقایع اقلیمی، فرونشست زمین و فعالیت‌های GIS، استفاده از هوش مصنوعی در رصد داده، داده‌کاوی، بیلان منابع و مصارف، تغییر اقلیم زاینده‌رود و سایر زمینه‌ها می‌تواند محل کاربرد هوش مصنوعی باشد. تحویل آب کشاورزی بر اساس نیاز واقعی، حفاظت از منابع آب و هوشمندسازی تعمیرات و نگهداری تأسیسات نیز جزو همین کاربردها است.

دوستانی که در صنعت آب و فاضلاب حضور دارند، توجه داشته باشند که نقشه راه تولید هوش مصنوعی در تولید برق حرارتی، ظرف چند ماه آینده مصوب خواهد شد. در این بخش می‌توانید از دکتر راکعی نیز بهره‌مند شوید. ما ۲۵ میلیون مشترک داریم که این خود یک ثروت است و می‌توان روی آن ایده‌های فناورانه هوش مصنوعی پیاده‌سازی کرد.

خیلی متشکرم. تلاش کردم کوتاه توضیح دهم که وزارت نیرو در چه مسیری قرار گرفته است. با افتخار اعلام می‌کنم که وزارت نیرو نخستین دستگاه اجرایی است که پس از تصویب سند ملی، سند بخشی اختصاصی خود را به امضای وزیر و بالاترین مقام دستگاه رسانده است. این سند برای معاونت محترم ملی ارسال شده و الگویی برای سایر دستگاه‌ها محسوب می‌شود.

دکتر الهام فراهانی:

خیلی متشکرم. از سرکار خانم مهندس راکعی از پژوهشگاه نیرو خواهش می‌کنم که ارائه خودشان را داشته باشند.

مهندس سحر راکعی:

بسم‌الله‌الرحمن‌الرحیم. سلام عرض می‌کنم خدمت همه بزرگواران. من راکعی هستم. همان‌طور که فرمودند، پژوهشگر پژوهشگاه نیرو هستم. ساختار پژوهشگاه نیرو یک مجموعه اختصاصی وزارت نیرو است برای انجام تحقیقات. در زمینه‌های مختلف ورود کرده‌ایم، البته بیشتر در زمینه برق بوده است. در حوزه آب نیز چندین سال است که همکاری می‌کنیم. پیرو صحبتی که آقای دکتر جعفری فرمودند، ما در ارتباط تنگاتنگی که با وزارت نیرو داریم، از چند سال پیش بحث تحول دیجیتال را آغاز کردیم. فکر می‌کنم از سال ۱۳۹۶ روی مباحثی مانند امنیت سایبری و هوش مصنوعی کار را شروع کردیم. در ارتباط تنگاتنگ با وزارتخانه داریم کارها را پیش می‌بریم.

همان‌طور که آقای دکتر جعفری اشاره کردند، بحث تدوین نقشه راه و سند راهبردی بسیار مهم است. زحمتی که از سمت وزارتخانه و ستاد کشیده شده، این است که یک دیدگاه راهبردی و کلان و حتی حاکمیتی ایجاد شده است؛ این سند در سطح حاکمیت تدوین شده و بسیار پاسخگوی نیازهای کلان است. اما یک نکته وجود دارد: ما می‌خواهیم وارد سطوح پایین‌تر شویم، یعنی وارد یک صنعت خاص شویم، مثلاً صنعت آب و فاضلاب یا حتی ریزتر، فقط صنعت تصفیه آب.

همه می‌دانند ضرورت استفاده از هوش مصنوعی چیست؛ هم اسناد بالادستی، هم فرمایشات مقام معظم رهبری، هم سند ملی، همه تأکید می‌کنند که باید این کار را انجام دهیم. از طرف دیگر، دنیا وارد انقلاب صنعتی چهارم شده است. IT و OT با هم تلفیق شده‌اند و بر روی هم سوار شده‌اند. اطلاعات و فناوری عملیات دیگر جدا نیستند. مباحثی مانند شهر هوشمند، آب هوشمند و مشکلات متعددی که وجود دارد، همه ضرورت استفاده از هوش مصنوعی را نشان می‌دهد.

اما من به‌عنوان یک بخش می‌خواهم از هوش مصنوعی استفاده کنم. مجدداً تأکید می‌کنم که در اینجا قرار است درباره استفاده از هوش مصنوعی صحبت کنیم، نه صرفاً درباره سند کلی آن. زمانی که می‌خواهیم در یک مجموعه و صنعت از هوش مصنوعی استفاده کنیم، چه مشکلاتی ممکن است پیش بیاید؟ یک گروه تشکیل می‌دهند، یک دفتر راه‌اندازی می‌کنند، چند نفر استخدام می‌کنند، یک‌سری تجهیزات می‌خرند، اما با مشکلاتی مواجه می‌شوند. این اقدامات با اهداف کلان سازمان هم‌راستا نیست. فقط هوش مصنوعی را راه‌اندازی می‌کنند تا بگویند ما هم هوش مصنوعی داریم. مثال‌ها اغلب سطحی و غیرقابل مقیاس‌پذیری هستند، سرمایه‌گذاری‌ها در جاهایی انجام می‌شوند که نتایج آن‌ها کاربردی ندارد و آینده این کارها را درنظر نمی‌گیرند.

برای حل این مسئله، ما یک چارچوب براساس رویکرد سیستماتیک ارائه دادیم. یعنی هر صنعت یا حوزه باید نقشه راه مخصوص به‌خود برای کاربرد هوش مصنوعی داشته باشد. این نقشه راه باید نشان دهد که چگونه از هوش مصنوعی ارزش ایجاد می‌شود، مسائل دیگر را ببیند و مدیران کسب‌وکار را درگیر کند. یک شکاف در دنیا وجود دارد، یعنی از زمانی که حوزه IT وارد دنیا شد، به‌خصوص در حوزه صنعت، همیشه شکاف بین کسب‌وکار و IT یک مسئله بوده است. شاید توجه کرده باشید که موفق‌ترین مسیر استفاده از IT در صنعت بانک و صنایع مالی است، چون حوزه کسب‌وکار سریع خود را با این موضوع هماهنگ کرد. ما در حوزه صنعت هنوز این فاصله و شکاف را داریم.

روشی که ما ارائه دادیم، به‌جای آن‌که از ابتدا روی اهداف هوش مصنوعی و پیاده‌سازی آن تمرکز کند، اهداف کلان آن مجموعه را شناسایی می‌کند. نیازمندی‌های توانمندسازی و زیرساخت‌های آن مجموعه را شناسایی می‌کند و در نهایت با ترکیب این‌ها، یک نقشه راه چابک (agile) طراحی می‌کند. از آن‌جا که هزینه و زمان محدود است، امکان پیاده‌سازی همه کاربردهای هوش مصنوعی وجود ندارد. بنابراین بهتر است آن‌هایی را انتخاب کنیم که اثربخشی بیشتری دارند. در ابتدا یک چشم‌انداز برای به‌کارگیری هوش مصنوعی ارائه می‌شود. این چشم‌انداز بر اساس اهداف سازمان تعریف می‌شود. مثلاً اگر صنعت تصفیه آب قصد دارد نقشه راه خود را تدوین کند، هدف اصلی آن چیست؟ پردازش آب به‌گونه‌ای که آب تمیز با صرفه اقتصادی در اختیار قرار گیرد. بنابراین اهداف کسب‌وکار در چشم‌انداز قرار می‌گیرد و براساس این چشم‌انداز، موارد کاربرد (use cases) شناسایی می‌شوند.

در مورد کاربرد از سمت تقاضا، منظور این است که در کجا تقاضا برای استفاده از هوش مصنوعی وجود دارد؟ ابتدا فرآیندهای

کلان آن کسب و کار استخراج می‌شود. مثلاً در حوزه تصفیه آب، چه فرآیندهایی وجود دارد؟ فرآیند تصفیه آب، فرآیند تعمیر و نگهداری، برنامه‌ریزی، امنیت سایبری و غیره. این‌ها به ریزفرآیند و فعالیت تقسیم می‌شوند. سپس بررسی می‌شود که کدام می‌تواند با هوش مصنوعی بهبود یابد؟ کدام می‌تواند با هوش مصنوعی بازتعریف شود؟ کدام می‌تواند با هوش مصنوعی اتوماتیک شود؟ برهمین اساس، موارد کاربرد از سمت تقاضا و عرضه شناسایی می‌شوند.

از سوی دیگر، قابلیت‌های موجود هوش مصنوعی نیز شناسایی می‌شود. در نهایت، همه این موارد کاربرد بررسی می‌شوند که چقدر با اهداف مجموعه هم‌راستا هستند و چقدر نیازمندی دارند. سپس براساس این موارد، اولویت‌بندی صورت می‌گیرد. علاوه‌بر این، عوامل توانمندساز شناسایی می‌شوند: مجموعه، سازماندهی، ساختار، حکمرانی، قوانین، نیاز نیروی انسانی، دانش، فناوری‌ها و اکوسیستم هوش مصنوعی در این صنعت به‌چه صورت است.

بر این اساس، موارد اولویت‌دار انتخاب می‌شوند و یک نقشه راه چابک براساس این موارد طراحی می‌شود. ما این‌کار را در حوزه تولید برق انجام داده‌ایم، در حوزه انتقال نیز مشغول آن هستیم و این روش در اختیار قرار می‌گیرد. توصیه می‌کنم این متد را بررسی کنید. این روش برای ورود هر صنعت به استفاده از هوش مصنوعی، بیشترین آورده را می‌تواند داشته باشد. من در خدمت شما هستم. اگر سوالی بود، کمکی نیاز بود یا موردی بود، خوشحال می‌شوم در خدمت باشم.

دکتر الهام فراهانی:

خیلی ممنون و متشکر. دعوت می‌کنم از جناب آقای دکتر قاضی‌زاده و با توجه به این‌که زمان کمی برای ما باقی‌مانده است، در حدود ۵ دقیقه در خدمت شما خواهیم بود و پس از آن به سراغ بخش پرسش و پاسخ خواهیم رفت.

دکتر محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده:

بسم‌الله‌الرحمن‌الرحیم. خدمت دوستان و حضار محترم سلام عرض می‌کنم. خدا قوت. همکاران اطلاعات خیلی خوبی درباره هوش مصنوعی ارائه دادند. اسناد بالادستی نیز کاملاً بر این موضوع تأکید دارند. اهمیت این موضوع اکنون برای مسئولین کشور نیز کاملاً مشخص است. دوستان اشاره کردند که ویژگی‌های هوش مصنوعی معمولاً مبتنی بر دیتاها و ویژگی‌هایی است که استفاده می‌شود.

این‌که دیتا اهمیت زیادی دارد و بحث کیفیت دیتاها نیز مطرح است، این‌ها مباحث تخصصی هستند. من می‌خواستم اشاره کنم که مسائلی که ما در آب و فاضلاب داریم، بسیاری از آن‌ها همراه با حجم زیادی از دیتا هستند. اگر بخواهیم یک مثال خوب از کارکرد هوش مصنوعی در آب و فاضلاب بیان کنیم، باید گفت که دوستان ما سال‌ها است که فشارسنج و دبی‌سنج دارند. گاهی اوقات گفته می‌شود که ما این دیتاها را جمع‌آوری کرده‌ایم، شما گفتید این‌ها را اندازه‌گیری کنیم، حالا باید چه کار کنیم؟

لذا می‌خواستم این موضوع را کامل‌تر بیان کنم که واقعاً بستر آب و فاضلاب برای استفاده از هوش مصنوعی بسیار فراهم است. به‌عنوان مثال، ما در شبکه‌های توزیع آب با موضوعات پیچیده‌ای سر و کار داریم. همه متخصصین می‌دانند که در یک شبکه توزیع آب، هم با تغییرات مکانی و هم با تغییرات زمانی به‌صورت هم‌زمان مواجه هستیم و باید به این‌ها آبرسانی کنیم. این خود موضوع بسیار پیچیده‌ای است. نمی‌توان گفت چون مثلاً من ۲۰ سال سابقه دارم، می‌توانم این مشکل را به‌صورت بهینه حل کنم.

خدمت شما عرض کنم که اگر بخواهم فقط به مشکلات اشاره کنم: کمبود آب، مقدار بالای هدررفت‌ها و تلفات، شبکه‌های فرسوده که نیاز به بازسازی دارند، هزینه‌های بهره‌برداری که افزایش یافته است، و در بخش مشترکین، مسائل دیگری وجود دارد. بحث پیش‌بینی مصرف، که البته این‌ها در شرایط عادی است. گاهی در شرایط بحرانی قرار می‌گیریم؛ موضوع پدافند غیرعامل و مسائل امنیتی که هر روز با آن‌ها مواجه هستیم، موضوع تغییر اقلیم که شرایط را دشوارتر کرده است، هزینه‌های انرژی و مدیریت انرژی که در تأسیسات آب و فاضلاب مطرح است، در کنار بحث آبرسانی، موضوع کیفیت آب و توقع مشترکین برای ارتقای خدمات، همه این‌ها موضوعات کاملاً پیچیده‌ای هستند. در نتیجه، این بستر، کاربردی بودن هوش مصنوعی را نشان می‌دهد.

نمونه‌هایی وجود دارد مانند مدیریت فشار، مدیریت هدررفت و هم‌چنین بحث پهنه‌بندی. شبکه‌های ما پهنه‌بندی کامل ندارند چون هزینه‌های آن بالا است. حالا چگونه می‌توان به شکل بهینه پیشنهاد داد که این پهنه‌بندی انجام شود؟ و سایر موضوعاتی که بستر مناسبی برای استفاده از هوش مصنوعی هستند. خودم تحقیقی انجام دادم و از آقای دکتر جعفری پرسیدم که در آب و

فاضلاب چند پروژه هوش مصنوعی انجام شده است؟ حقیقتاً فقط پنج مورد را توانستم پیدا کنم. البته باید گفت برخی از این‌ها فقط هوشمندسازی هستند و هوش مصنوعی واقعی نیستند. علی‌رغم اهمیت موضوع، متخصصینی که در اختیار داریم و نیازی که وجود دارد، واقعاً کار بسیار کمی در این زمینه انجام شده است.

همکاران بعداً درباره استان اصفهان توضیح خواهند داد. یک پروژه نیز در استان گلستان داشتیم که با استفاده از هوش مصنوعی انجام شد و نتایج جالبی داشت. مثلاً در بخش مشترکین، برخی مصرف‌کننده‌ها وجود دارند که مصرف غیرعادی دارند یا با تغییر قیمت‌ها، مصرف‌شان دستکاری می‌شود یا اتصالات غیرمجاز دارند، یا به گونه‌ای باعث افزایش هدررفت‌های ظاهری می‌شوند.

ما آمدیم با روش کلاسترینگ و روش نظارت‌نشده، اطلاعات چند سال گذشته مشترکین گرگان را گرفتیم و با استفاده از هوش مصنوعی، آن مشترکینی که اصطلاحاً آب‌دزدی داشتند و مصارف غیرمتعارف داشتند را شناسایی کردیم. جالب این‌که این کار حتی با یک کامپیوتر معمولی هم انجام شد؛ نیازی به تجهیزات پیچیده نبود. پس از آن، اطلاعات بررسی شد و ۱۵۰۰ مشترک شناسایی شدند و نواقص آن‌ها رفع شد. همین باعث شد درآمد شرکت افزایش پیدا کند. این یک مثال ساده، کاربردی و قابل پیاده‌سازی است.

در مورد تفاوت هوشمندسازی و هوش مصنوعی، دوستان اشاره کردند. از نظر ما، هوشمندسازی یک فرآیند است که ممکن است مثلاً ۲۰ سال طول بکشد. اما هوش مصنوعی یک ابزار است که می‌توانیم سریع‌تر از آن استفاده کنیم. یک پروژه‌ای هم در منطقه ۱ تهران تعریف شده بود با عنوان «چرا هوشمندسازی پیشرفت نکرده است؟». نتایج بسیار مفصل بود، شاید شما فکر کنید به دلیل کمبود بودجه است اما نتیجه این تحقیق این بود که دلیل اصلی، مسائل مدیریتی است.

بنابراین اگر مدیران ما به مباحث اعتقاد داشته باشند، کارها پیش می‌رود. عامل دوم، عوامل اطلاعاتی و ارتباطی است؛ یعنی بستری که اطلاعات به‌درستی منتقل نمی‌شود و مسائل مربوط به حراست و امنیت داده‌ها، که موانعی هستند و باید برطرف شوند. عامل سوم، عوامل مالی و اعتباری است.

چالش‌های دیگری نیز وجود دارد، مانند پروتکل‌های امنیتی. زمانی که هوش مصنوعی وارد می‌شود، انگار یک بلک‌باکس است. ما باید این را در اختیار کشور خودمان داشته باشیم و بتوانیم مسائل امنیتی آن را حل کنیم. نیروی متخصص، بین‌رشته‌ای بودن، این‌که اصلاً در شرکت آب و فاضلاب مسئول هوش مصنوعی چه کسی است؟ کدام معاونت مسئول است؟ این‌ها مشخص نیست. باید ساختاری برای آن تعریف شود.

تجربه‌ای هم داریم؛ حدود ۲۰ یا ۲۵ سال پیش، در بحث GIS، شرایط به‌گونه‌ای بود که هر کسی می‌گفت من GIS کار می‌کنم. شرکت‌ها می‌آمدند و قرارداد می‌بستند و هرکدام برای خودشان کار می‌کردند. اما شرکت مهندسی آب و فاضلاب یک اقدام خوب انجام داد، دستورالعمل ارتقای سیستم‌های قابل را تدوین کرد، هوشمندسازی را تعریف کرد و مراحل، تعاریف و شاخص‌ها را مشخص نمود. این‌کار بسیار کمک کرد تا شرکت‌ها بدانند باید چه‌کار کنند و هرکس به‌طور سلیقه‌ای عمل نکند. همین اتفاق باید برای هوش مصنوعی هم رخ دهد. بستر کار برای شرکت‌ها فراهم شود، تعاریف تطبیق داده شود، وظایف مشخص گردد و هر کسی بداند چه وظیفه‌ای دارد. بسیار متشکرم.

مهندس سارا احمدی:

به نام خدا، سلام و وقت به‌خیر خدمت حضار گرامی. ممنون از فرصتی که در اختیار بنده قرار گرفت. تشکر می‌کنم از برگزارکنندگان این کنگره. در خدمت شما هستم تا توضیحاتی ارائه دهم درباره اقداماتی که به‌صورت خاص در شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان برای استفاده از هوش مصنوعی انجام شده است.

استان اصفهان، اگر جزو اولین‌ها نباشد، قطعاً جزو برترین‌ها در این حوزه است. ما اولین شبکه هوشمند را در سال ۱۳۹۶ راه‌اندازی کردیم و تا پایان سال ۱۳۹۸، فاز اجرایی آن را به‌طور کامل اجرا کردیم. دوستان به تفاوت میان هوش مصنوعی و هوشمندسازی اشاره کردند. فقط این را بدانیم که زمانی می‌توانیم به هوش مصنوعی دست پیدا کنیم که بحث هوشمندسازی تجهیزات خود را پیاده‌سازی کنیم، داده‌ها را به‌صورت آنلاین جمع‌آوری کنیم، و این کار را با کمترین هزینه و نیروی انسانی و با خطای کمتر انجام دهیم.

چرا استان اصفهان به‌سمت هوش مصنوعی رفت؟ همان‌طور که بیان شد، تعیین هدف و چالش‌ها در شرکت اهمیت به‌سزایی دارد. چالشی که در شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان وجود داشت، ناترازی بین منابع و مصارف بود. استان اصفهان بیش از هزار روستا را تحت پوشش دارد. سامانه‌ای که میزان ظرفیت آن تنها ۱۱/۵ مترمکعب است و در سال ۱۳۸۶ افق طرح آن به پایان

رسیده است. لازم بود که سامانه جایگزین وارد مدار شود اما متأسفانه این اتفاق نیفتاد. همین موضوع باعث شد که نیاز آبی استان اصفهان در پیک مصرف حدود ۱۸/۹ مترمکعب بر ثانیه باشد و ما با ۳/۴ مترمکعب برثانیه کمبود و ناترازی و عدم توانایی در تأمین آن در شرایط پیک مصرف مواجه شویم. این مسائل باعث شد که به دنبال روش‌هایی باشیم تا بتوانیم حداقل منابع موجود را به بهترین شکل مدیریت کنیم.

بنابراین ناچار بودیم از ابزارهای هوشمندسازی و هوش مصنوعی استفاده کنیم. در مقایسه بین ظرفیت تولید و تقاضا، ما با چهار سناریو مواجه می‌شویم که این سناریوها برای تحلیل برنامه هوش مصنوعی نیز استفاده شدند:

۱) حالت‌هایی که میزان تولید بیشتر از تقاضا است؛ قطعاً در چنین حالاتی مشکلی وجود نخواهد داشت. ۲) سناریوی دوم حالتی است که منابع داخلی مانند چاه‌های رزرو در اختیار داریم؛ اینجا باید بررسی شود که آیا این منابع می‌توانند کمبود را جبران کنند یا خیر؟ در چنین شرایطی، هوش مصنوعی تصمیم می‌گیرد کدام یک از چاه‌ها، با چه ظرفیتی و در کدام موقعیت مکانی وارد مدار شود. ۳) سناریوی سوم که تمرکز اصلی ما بر آن بود، بحث مدیریت مصرف و مدیریت فشار است. هرچه دامنه این بازه بیشتر باشد، مدیریت کارآمدتر خواهد بود. هرچه پهنه‌بندی‌ها دقیق‌تر و قابل اندازه‌گیری و کنترل باشند، تجهیزات مناسب نصب‌شده باشد و فشارشکن‌ها در نقاط مناسب قرار گرفته باشند، قدرت تصمیم‌گیری و کنترل روی شبکه افزایش یافته و بهره‌وری از ظرفیت تولید بالاتر خواهد رفت و آب به شکلی عادلانه‌تر در اختیار متقاضیان قرار خواهد گرفت. ۴) سناریوی آخر مربوط به گذر از آستانه تنش است. زمانی که با مدیریت فشار، نتوان کمبودها را جبران کرد، در این‌جا است که هوش مصنوعی باید تصمیم بگیرد که چگونه به‌صورت عادلانه بحث‌های جیره‌بندی را بین زیرمجموعه‌های مختلف (subzone) به‌طور یکنواخت اجرا کند.

ضرورت اجرای هوشمندسازی، در مدیریت بحران شرایط کم‌آبی به ما کمک می‌کند. یکی از این موارد، کاهش خطای انسانی است؛ این‌که من یک اپراتور پشت سیستم قرار داده باشم که با نظر خود تصمیم بگیرد براساس داده‌های تله‌متری کدام موارد را روی شبکه تغییر دهد، ممکن است با خطا مواجه شود. بنابراین، وجود هوش مصنوعی می‌تواند این خطا را به حداقل ممکن برساند. افزایش قابلیت اطمینان، یعنی مطمئن باشم در تمامی نقاط شبکه می‌توانم حداقل فشار را تأمین کنم، عدالت در توزیع، مدیریت مصرف، کاهش هدررفت به واسطه مدیریت فشار که در شبکه اتفاق می‌افتد و درنهایت، همه این‌ها منجر به رضایتمندی مشترکین خواهد شد که هدف غایی همه شرکت‌های آب و فاضلاب است.

در سال ۱۳۹۶، که پروژه هوشمندسازی را شروع کردیم، یک‌سری مدل‌های اولیه تعریف شد مبنی بر این‌که باید سیستم‌های آنلاین فشار داشته باشیم. اکنون شرکت آب و فاضلاب نزدیک به ۶۰۰ ایستگاه کاهش آنلاین فشار در سراسر استان دارد که حدود ۱۶۰ ایستگاه در خود شهر اصفهان است. بخش تعیین نقشه‌های GIS نیز فعال است؛ بیش از ۶۰ درصد نقشه‌های شبکه آب و مشترکین با دقت بالای ۹۰ درصد برداشت شده‌اند و این نقشه‌ها قابلیت تحلیل هیدرولیکی دارند.

تشکیل کارگروه‌های بخش‌های طراحی هیدرولیکی که به‌صورت خاص بحث‌های پهنه‌بندی و مدل‌سازی را انجام می‌دهند و در واقع دستورکارها را تدوین می‌کنند و به مناطق ابلاغ می‌نمایند، تحلیل‌های هیدرولیکی را پیاده‌سازی می‌کنند تا در نهایت الصاق تجهیزات داخل این پهنه‌ها اتفاق بیفتد. بعد از این، بحث هوشمندسازی، موارد جدیدی مطرح شد؛ از جمله تقویت سیستم‌ها، سرورها و لایسنس‌های نرم‌افزاری که باید خریداری می‌شدند و ما این موارد را انجام دادیم.

همان‌طور که می‌دانید، پیاده‌سازی هوشمندسازی یک هرم است که قسمت پایه آن سنسورها هستند؛ یعنی روی شبکه، با سنسورها ارتباط داریم و بحث فشارشکن‌ها مطرح است، چراکه تخصیص آب به زیرحوزه‌ها براساس سنسورها و کدهایی است که به فشارشکن‌ها می‌دهیم. بعد از آن، بحث اسکادا مطرح است که در حال‌حاضر در اصفهان بیش از هزار نقطه تله‌متری وجود دارد و داده‌های آنلاین آن‌ها به‌صورت مستمر رصد می‌شود. این نکته بسیار مهم است که زیرمجموعه بخش اسکادا، اپراتورهای ما هستند که در واقع تصمیم‌گیری می‌کنند که آنچه هوش مصنوعی در اختیار آن‌ها قرار می‌دهد، آیا پیاده‌سازی شود یا خیر.

در نهایت، بحث هوش تجاری مطرح است که ما نرم‌افزار صدف را به منظور ارزیابی شاخص‌هایی که مدنظر مدیران است، پیاده‌سازی کرده‌ایم. یک‌سری شاخص‌های مهم در این نرم‌افزار مانیتورینگ می‌شود که قابلیت مشاهده و کنترل در سطوح کلان را فراهم می‌کند.

کاری که در شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان اتفاق افتاد و حاصل تلاش همه همکاران شرکت بود، ساخت یک نرم‌افزار داخلی با نام «فهیم» است. این نرم‌افزار نه فقط یک سامانه، بلکه یک فراسامانه است؛ چراکه مجموعه‌ای از سامانه‌ها مانند اسکادا و GIS را شامل می‌شود که هر یک داده‌هایی تولید می‌کنند. اما لازم بود که برای تصمیم‌گیری و تصمیم‌سازی، این داده‌ها

به‌صورت یکپارچه درآیند. بنابراین این فراسامانه نوشته شد که در آن مکان‌یابی تأسیسات، اسکادا، هیدرولیک شبکه (و دیگر نیاز به نرم‌افزار WaterGEMS برای تحلیل هیدرولیکی نیست) و خود نرم‌افزار بحث تحلیل هیدرولیکی را انجام می‌دهد و در نهایت برای شما سناریو تعریف می‌کند و نتایج را در اختیار شما قرار می‌دهد و در نهایت شما تصمیم‌گیری می‌کنید که آیا آن‌چه نرم‌افزار پیشنهاد داده، پیاده‌سازی شود یا خیر.

دکتر الهام فراهانی:

ما بیشتر علاقه‌مند بودیم که اگر شرکت آب و فاضلاب اصفهان در زمینه هوش مصنوعی پروژه‌ای انجام داده است، درباره آن توضیح دهید.

مهندس سارا احمدی:

سامانه فهیم، اتفاقی که در آن می‌افتد، بحث پیش‌بینی تقاضا را براساس تحلیل‌های هفت‌روزه انجام می‌دهد. این سامانه با سامانه‌های هواشناسی ارتباط دارد و اطلاعات را از آن‌ها دریافت می‌کند و خود، میزان تخصیص مورد نیاز را برای هفت روز آینده تخمین می‌زند.

دکتر الهام فراهانی:

لطفاً برای ما بیشتر توضیح دهید، چون این موضوع تا حدی چالش‌برانگیز است و ما می‌خواهیم هوشمندسازی را از هوش مصنوعی تفکیک کنیم. لطفاً بفرمایید که همین بحث دریافت و تحلیل داده‌ها که می‌فرمایید، در کدام بخش آن‌ها از هوش مصنوعی استفاده شده است؟

مهندس سارا احمدی:

اتفاقی که در اینجا می‌افتد، این است که از مقایسه این دو، این برنامه با استفاده از چهار سناریویی که برای شما تعریف کردم، میزان تخصیص‌ها را پیش‌بینی می‌کند و پس از مقایسه نتایج آن‌ها، میزان ست‌پوینت‌ها را مشخص می‌کند. در داخل این نرم‌افزار از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است که در واقع مقایسه بین داده‌ها را انجام می‌دهد و براساس آن تصمیم‌گیری می‌کند. این نرم‌افزار هم‌چنین می‌تواند فرمان‌ها را اعمال کند که ست‌پوینت‌های تنظیمی شبکه به چه‌صورت باشد و قیودی که برای آن تعریف می‌کنیم (مانند میزان تخصیص، حداقل فشار شبکه و ...) را خودش بهینه‌سازی می‌کند و بهترین حالت‌ها را به ما پیشنهاد می‌دهد. اما ما اجازه اعمال روی شبکه را به آن نمی‌دهیم و اپراتورهای ما هستند که در نهایت تصمیم می‌گیرند که آیا آن‌چه سامانه هوشمند پیشنهاد داده و مدل نهایی را به آن‌ها نمایش می‌دهد، استفاده شود یا خیر. در صورتی‌که تأیید کنند، این کار انجام می‌شود. ممنون از فرصتی که در اختیار من قرار دادید. متشکرم.

دکتر الهام فراهانی:

خیلی ممنون و متشکر. من یک نکته‌ای را خدمت شما عرض کنم: استفاده از هوش مصنوعی در کشور ما، در پروژه‌های مختلفی که در حال انجام است، اگر بخواهیم اولویت‌بندی کنیم، بحث هوش مصنوعی و پزشکی در اولویت‌های آخر کشور ما قرار دارد. نه تنها در کشور ما، بلکه در بسیاری از کشورهای دیگر نیز همین‌طور است. یعنی بحث استفاده از هوش مصنوعی در زمینه پزشکی، اولویت کمی برای آن قائل هستیم. چرا؟ یکی به‌دلیل مسائل فرهنگی است و دیگری این‌که تا چه میزان می‌توانیم به سامانه‌هایی که مبتنی بر هوش مصنوعی هستند اعتماد کنیم. یعنی مثلاً به جای یک پزشک، یک سامانه هوشمند برای ما تصمیم‌گیری کند.

در سامانه‌های آب و فاضلاب نیز همین بحث مطرح است. سامانه‌های اسکادا از گذشته این قابلیت را داشتند که بتوانیم بر تمامی فشارشکن‌ها از راه دور کنترل داشته باشیم و اقدامات را به‌صورت سیستماتیک و از راه دور انجام دهیم. اما هیچ‌گاه در شرکت آب و فاضلاب، جرئت انجام این کار را به‌صورت کامل نداشتیم، چراکه ممکن بود با یک خطایی که در شبکه رخ می‌دهد، ناگهان فشار زیادی به بخشی از شبکه وارد شود و شکستگی‌ها و اتفاقات ناگواری را به دنبال داشته باشد. بنابراین، درست است که امروز درباره استفاده از هوش مصنوعی صحبت کردیم، اما حتماً باید این را مدنظر قرار دهیم که این استفاده کاملاً هوشمندانه باشد و در مواردی استفاده شود که تبعات نامطلوبی به دنبال نداشته باشد.

هوش مصنوعی می‌تواند در تصمیم‌گیری‌ها کمک‌کننده باشد. حتی در سامانه‌های امنیتی شبکه نیز از هوش مصنوعی استفاده می‌شود، اما به‌طور کامل روی سامانه قرار نمی‌گیرد؛ یعنی اطلاع‌رسانی می‌کند به اپراتور، اما درنهایت یک انسان تصمیم‌گیری اصلی را انجام می‌دهد.

پس به‌عنوان جمع‌بندی این نشست می‌توانیم بگوییم: هوش مصنوعی خوب است، باید در صنعت آب و فاضلاب به‌کار گرفته شود، اما باید در تصمیم‌گیری‌ها کمک‌کننده باشد و با هوشمندی از این فناوری استفاده کنیم.

اگر سوالی هست دوستان بفرمایید؛ ما به اندازه ۵ دقیقه زمان داریم تا پرسش و پاسخ‌ها را انجام دهیم.

از کادر اجرایی هم خواهش می‌کنم که فضا را آماده کنند تا تفاهم‌نامه‌ی بین انجمن آب و فاضلاب ایران و انجمن هوش مصنوعی ایران منعقد شود.

سوال ۱: بسم الله الرحمن الرحیم. عرض سلام و ادب و احترام دارم خدمت حضار محترم، به ویژه اساتید بزرگوار. سؤال من از دکتر قاضی‌زاده است درباره مدیریت مصرف و پروژه‌ای که انجام دادند. برای من مهم بود که بدانم در آن پروژه چه اقداماتی انجام شد که توانستید درآمد قابل‌توجهی به‌دست آورید. به چه‌صورت از هوش مصنوعی استفاده کردید؟ اگر توضیحی هست، خوشحال می‌شوم بشنوم.

دکتر جلیلی قاضی‌زاده: ببینید، شما می‌دانید که ما در بحث مشترکین داده‌های زیادی داریم. این داده‌ها شامل مشترکین مسکونی، صنعتی و... هستند. بسیاری از مشترکین، مصارف غیرمتعارفی دارند؛ مثلاً یک ساختمان ده واحد دارد اما فقط به اندازه یک واحد آب مصرف می‌شود و مابقی آن‌ها محاسبه نمی‌شود. پس زمانی که این مصارف نامتعارف شناسایی و رفع می‌شوند، درآمد شرکت هم افزایش پیدا می‌کند. ما مصرف سال‌های اخیر مشترکان را بررسی کردیم و متوجه شدیم که برخی مشترکین در سال‌های گذشته مصرف خیلی بالایی داشتند و حالا یک‌دفعه این مصارف افت کرده است. بنابراین، این می‌تواند نشان‌دهنده یک مشکل باشد. به‌همین دلیل، این موارد را خوشه‌بندی کردیم و به‌صورت ۵۰ تا ۵۰ تا با اولویت‌بندی معرفی کردیم. زمانی که همکاران ما این موارد را بررسی کردند، انواع و اقسام مشکلات مشاهده شد. لذا باید توجه داشته باشید که این‌کار را با نرم‌افزار اکسل نمی‌توان انجام داد. اکنون در بسیاری از شهرها، مشاهده می‌شود که زیر ۵ یا ۷ مترمکعب، ۲۰ درصد از مشترکین به این صورت هستند، در حالی‌که واقعاً نمی‌تواند این‌گونه باشد. حالا یا مشکل از کنتور است یا bypass شده یا موارد این‌چنینی. بنابراین، مشترکین مشکوک شناسایی و بررسی می‌شوند. من لیست آن را هم دارم و می‌توانم برای شما ارسال کنم تا انواع و اقسام مسائل را مشاهده کنید. در نهایت، رفع همه این موارد منجر به افزایش درآمد شرکت خواهد شد.

دکتر صفایانی: یک بحثی که ما همیشه در استفاده از هوش مصنوعی داریم، این است که سیستم‌های هوشمند باید مستقر باشند و به مرور زمان بتوانند تمامی موارد و خطاها را شناسایی کنند. نظرات مشترکین و هم‌چنین خود کارکنان و متخصصان حوزه آب باید اخذ شود و سیستم‌ها دائماً ارتقا پیدا کنند و به مرور زمان نیز این کار احتمالاً انجام خواهد شد.

سوال ۲: در بحث انرژی و مدیریت آن چگونه می‌توانیم از هوش مصنوعی استفاده کنیم.

دکتر صفایانی: ما بحث پیش‌بینی مصرف را داریم که مدل‌های هوش مصنوعی می‌توانند انجام دهند. بحث بعدی یادگیری رفتارهای نرمال است. ما می‌توانیم رفتارهای نرمال مشترکین را به هوش مصنوعی آموزش دهیم. هوش مصنوعی می‌تواند هر چیزی را که خارج از این رفتار نرمال باشد به‌عنوان ناهنجاری تشخیص دهد. البته این‌کار در حوزه‌های مختلف مثل مصرف آب، مصرف برق و تجهیزات الکتریکی هم قابل انجام است. عملکردهای غیرعادی را می‌توان توسط هوش مصنوعی شناسایی کرد.

سوال ۳: کاربرد هوش مصنوعی بر روی ناترازی چیست؟

مهندس سحر راکعی: ما در چند جا می‌توانیم از هوش مصنوعی استفاده کنیم. یکی از آن‌ها برنامه‌ریزی است. ما در برنامه‌ریزی‌ها می‌توانیم از هوش مصنوعی در تخصیص منابع به مصارف استفاده کنیم و به ترازی‌های موجود فائق بیاییم. یکی دیگر از مسائلی که هوش مصنوعی می‌تواند در آن به ما کمک کند، بهبود چرخه تولید یا استحصال است. وقتی ما فرآیندها را به هوش مصنوعی می‌دهیم، بار ورودی به مجموعه (مثلاً در آب و فاضلاب) وقتی مقدارش بیشتر شود، عملاً ناترازی کاهش می‌یابد. حال این‌که در چه زمانی برای ما خوب است؟ مهم است که عیب‌یابی را انجام دهیم. همین عیب‌یابی که پیشگیرانه بوده، زودتر تشخیص داده می‌شود و برطرف می‌شود. بنابراین در نهایت این کار به ناترازی کمک می‌کند. ما یک‌سری اهداف داریم که این اهداف مربوط به کار مدنظر است. ما باید ببینیم برای هر هدفی چگونه می‌توانیم از هوش مصنوعی کمک بگیریم. در هرجا که برنامه‌ریزی، پیش‌بینی، تخصیص، مفاهیم مسیریابی (مسیریابی عملکردی) باشد، در تمام این‌ها می‌توان از هوش مصنوعی استفاده کرد.

سوال ۴: نقشه راه هوش مصنوعی سازمان آب چگونه است؟

دکتر جعفری: این‌که دستور حاکمیتی چه برنامه استراتژیکی

دارد و چگونه نگاه می‌کند به این‌که هوش مصنوعی در صنعت در کجا اولویت دارد، این می‌شود برنامه استراتژیک حوزه ستادی. این‌که در حوزه آب در کدام قسمت اولویت دارد، مثلاً در حوزه تغذیه آب، بهبود کیفیت آب، پیش‌بینی حوادث، رضایت مشترکین، کاهش و بهینه‌سازی مصرف آب. در واقع سند هوش مصنوعی در وزارت نیرو یک سند استراتژیک است؛ شاید این سند را بتوانیم در نفت هم با ۲۰ درصد تغییرات بنویسیم. اما در آن‌جا بحث شیمی و پالایش و انشعاب حوزه انرژی است، اما در این‌جا انشعاب آب و فاضلاب را داریم. مورد بعدی این‌که ما ابتدای راه هستیم و شاید سه یا چهار سال دیگر متوجه شویم که باید این سند را بازنویسی کنیم. ما یک چیزی را نوشته‌ایم و جلو می‌رویم و قدم‌به‌قدم آن را اصلاح خواهیم کرد.

سوال ۵: خانم دکتر فراهانی، سؤال من در خصوص فرمایشات شما درباره ویدیومتری شبکه آب و فاضلاب بود

دکتر فراهانی: با توجه به این‌که ما یک‌سری سربازان را در طرح صیاد شیرازی داریم و در شرکت‌های دانش‌بنیان ۱۴ ماه سربازی خود را می‌گذرانند، در یکی از شرکت‌ها، یکی از سربازها در حال کار روی این پروژه است. این کار هنوز عملیاتی نشده است؛ یعنی رفتند و یک‌سری لوله‌های ساده و شکسته را تهیه کردند و داخل سامانه‌شان قرار دادند و الان سامانه با دقت خیلی خوبی قادر است شکستگی‌ها و ترک‌ها را شناسایی کند. این کار برای لوله‌های فاضلاب انجام شده و برای آب انجام نشده است. بنابراین این کار هنوز عملیاتی نشده و در حد یک نمونه آزمایشگاهی است و ما امیدوار هستیم که این پروژه‌ها برای همه ارائه داده شود، بررسی و روی آن‌ها سرمایه‌گذاری شود و بتوانیم این طرح‌ها را اجرایی کنیم.

در رابطه با بحث کشاورزی هم دوستان سؤال کردند. در زمینه کشاورزی، شرکت‌های دانش‌بنیانی هستند و وزارت ارتباطات هم پای کار آمده و استفاده از داده‌های الکتریکی برای برخی داده‌های کشاورزی در حال انجام است. خلاصه این‌که در بحث کشاورزی خیلی خوب درحال پیشرفت هستیم و امیدواریم در آینده شاهد نتایج مثبت نیز باشیم.

سوال ۶: از شرکت طوس آب هستم، در مورد پروژه‌هایی که در حال‌حاضر در زمینه هوش مصنوعی درحال انجام است، یک بحث، بحث پیش‌بینی سیلاب است. این مورد پروژه‌ای است که ما در شرکت، در قسمت شمالی کشور انجام دادیم. یک بحث دیگر هم طرح جامع استان تهران است؛ پروژه‌ای که با توجه به داده‌های ۳۰ ساله استان تهران، الان مدل جامع منابع و مصارف استان تهران را با مدل ماکسیمم تنظیم کردیم و با استفاده از هوش مصنوعی، خشکسالی و تأمین آب را برای شهر تهران و استان تهران و بحث تاب‌آوری را انجام دادیم. بحث دیگر در مورد resiliency شبکه توزیع آب است. واقعیت این است که برای ورود به چنین مباحثی در هوش مصنوعی، کمبود داده‌ها واقعاً خودش را نشان می‌دهد و به‌نوعی من خودم یک‌سری طرح پژوهشی در این زمینه تعریف کردم؛ شاید ما بخواهیم یک شهری را داشته باشیم که با هوش مصنوعی، داده‌های آن به‌طور کامل برداشت شود و بعد وارد بحث‌های تاب‌آوری بشویم.

دکتر فراهانی: ما یک بحثی داریم به اسم data service؛ ما باید در صنایع مختلف یک‌سری دیتا را آماده‌سازی کنیم و به‌صورت service ارائه دهیم. شاید دانشجوها بخواهند در این زمینه‌ها پروژه انجام دهند، بنابراین باید بتوانند از این دیتاها استفاده کنند. این‌ها یکی از مشکلات زیرساختی است که ان‌شاءالله ما در وزارت نیرو بحث تجمیع داده‌ها و راه‌اندازی یک سرویس داده را خواهیم داشت.

آقای جعفری، ما از شما خواهش می‌کنیم که یک اعلامیه کلی در وزارت نیرو بگذارید و اطلاع‌رسانی کنید که شرکت‌هایی که در زمینه هوش مصنوعی کار می‌کنند، بیایند و موضوعاتشان را ارائه بدهند تا بتوانیم حمایتشان کنیم.

دکتر جعفری: ما این‌کار را انجام داده‌ایم و شرکت‌هایی آمده‌اند و ما حمایت کردیم. من این جمله را دوست ندارم که بگویید وزارت نیرو به شما داده نداده است. من دانشگاهی هستم، اجرایی هم هستم. باید به‌وضوح مشخص کنید که چه داده‌هایی را نیاز دارید. ما خیلی مراقب هستیم که داده‌هایمان را به کجا می‌دهیم و برای چه‌کاری می‌دهیم. ما در حوزه امنیت سایبری هم مسئله داریم. بنابراین خوشحال می‌شوم که به ما وصل شوید؛ ما به شما کمک خواهیم کرد.

مهندس سحر راکعی: بحث دیگری که من لازم می‌دانم با افتخار بگویم و چون در این زمینه هم وزارت نیرو نسبت به سایر صنایع پیشرو بوده، بحث حکمرانی داده است. بحث حکمرانی داده وقتی انجام شود، تمامی مسائل حل خواهد شد. در وزارت نیرو و شرکت‌های زیرمجموعه آن در حال انجام است.

دکتر فراهانی: تشکر می‌کنم از حضار گرامی.

رتبه دوم مسابقه پایان‌نامه برتر سال ۱۴۰۳ در مقطع دکتری
(برگزار شده توسط انجمن آب و فاضلاب ایران)

دانشکده: مهندسی مکانیک

عنوان: مطالعه عددی -تجربی یک مدل شبکه واقعی توزیع آب به‌روش آنالیز جریان گذرا بر مبنای دیماند پالسی و (فشار RTC) کنترل بلادرنگ

نگارش: سعید محمدزاده نقارچی

استاد راهنما: دکتر روزبه شفقت

تاریخ: ۱۴۰۰/۱۱/۰۶

چکیده

یکی از مهم‌ترین مسائل در شبکه‌های آبرسانی، مسئله نشت و آب بدون درآمد می‌باشد که حتی در شبکه‌های جدید نیز امری اجتناب‌ناپذیر است. از جمله تبعات منفی نشت، نیاز به منابع اضافی برای تأمین آب با کیفیت مناسب، افزایش هزینه‌های تولید، تصفیه، انتقال و توزیع آب، ورود آلودگی به شبکه و ... می‌باشد. با توجه به اهمیت موضوع، مطالعات پژوهشی گذشته، به‌طور عمده بر دو محور کارهای اصلاحی و نیز کارهای پیشگیرانه استوار بوده است. در بخش فعالیت‌های اصلاحی، تجهیزات نشت‌یابی با هزینه‌های اولیه بالا توسعه یافتند که در بسیاری از شرایط از کارآیی مطلوبی برای شناسایی نشت‌های موجود برخوردار نیستند، لذا توجه به روش‌های پیشگیرانه از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود. در این راستا کنترل فشار اضافی شبکه، راه‌کاری مناسب برای برون‌رفت از ناکارآمدی روش‌های نشت‌یابی و جلوگیری از هدررفت آب می‌باشد. بیش از یک دهه است که ایده کنترل بلادرنگ فشار برای تنظیم هد تحویلی به مشترکین و هم‌چنین کاهش نشتی در شبکه‌های توزیع آب ارائه شده است. از سویی دیگر، با توجه به ماهیت گذرای جریان در یک شبکه آبرسانی، در توسعه دانش کنترل بلادرنگ، درنظر گرفتن حالت‌های گذرای هیدرولیک شبکه‌های توزیع آب برای ایجاد تنظیمات دینامیکی ضروریست؛ لذا در این رساله، به‌منظور توسعه چارچوب‌های انتخاب گره کنترلی و معماری سیستم کنترل بلادرنگ، مدل‌سازی و شبیه‌سازی گذرای جریان بر مبنای دیماند پالسی در یک شبکه توزیع آب، با استفاده از روش عددی حل مشخصه‌ها انجام شد. در این تحقیق، با توسعه روابط برای شبکه‌های شیب‌دار در قالب یک کد کامپیوتری، امکان تحلیل شبکه‌های آبرسانی با رقوم متغیر مورد ارزیابی قرارگرفت. به‌منظور اعتبارسنجی و کالیبراسیون، نتایج حاصل از روش مشخصه‌ها با نتایج نرم‌افزار تحلیل هیدرولیکی ایپانت و نیز داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. برای استخراج داده‌های آزمایشگاهی از شبکه آبرسانی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل با هد ثابت ۷ متر به‌همراه ۳ حلقه و ۴ شاخه شیب‌دار استفاده شده است. با هدف میدان‌گرا بودن این روش، شبکه روستایی گاوانکلا بابل و با میزان آب بدون درآمد بالا (۴۷٪) بررسی شد. توپولوژی خاص منطقه مورد مطالعه، کوچک بودن و در عین‌حال تنوع فشاری بالا (به‌گونه‌ای که بخش‌های از شبکه دارای مازاد هد و در مقابل بخش‌هایی نیز کمبود هد دارند) موجب شد تا ملاحظات سیستم کنترل بلادرنگ در این تحقیق افزایش یابد. داده‌های مورد نیاز، شامل دبی ورودی به شبکه و هد نقطه بحرانی به‌ترتیب با استفاده از دبی‌سنج آلتراسونیک و سنسور فشارسنج اندازه‌گیری و توسط سامانه ارسال از راه دور جمع‌آوری شد. سپس با تحلیل‌های

هدررفت برمبنای روش آنالیز اجزاء نشت (به‌صورت سالانه) و نیز برمبنای روش حداقل جریان شبانه (هر ۱۰ دقیقه)، مقدار و الگوی نشت برای اعمال در روش دیماند پالسی مشخص شد. در نهایت نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد، ایجاد مناطق ایزوله فشاری با تحلیل هیدرولیکی به‌روش عددی حل مشخصه‌ها، موجب تعیین بهترین استراتژی‌های کنترلی خواهد شد. با توجه به نتایج، با اعمال استراتژی کنترل پیشرفته فشار، متوسط هد شبکه تا ۵۴ درصد کاهش یافته است. هم‌چنین، متوسط نوسانات هد شبکه نیز از ۹/۷ متر به ۳/۵ متر کاهش یافته است که ضمن کاهش تعداد شکستگی، می‌تواند موجب افزایش رضایتمندی مشترکین شود. در ادامه سه شاخص میزان کاهش نشتی، کاهش نوسانات هد و عدم ایجاد پدیده مخرب کاویتاسیون در بدنه شیر، به‌عنوان معیارهای انتخاب گره‌های کنترلی لحاظ شدند. نشان داده شد که میزان هدررفت واقعی با به‌کارگیری استراتژی مناسب از ۲۵٪ به ۱۰٪ کاهش می‌یابد. از دیگر دستاوردهای مهم این مطالعه، می‌توان به ارائه برتری پارامتر مصرف مجاز شبانه مشترکین نسبت به پارامتر نمای نشت در تخمین دقیق مقدار نشت به‌روش حداقل جریان شبانه اشاره کرد. ارزیابی تأثیر اندازه گام مکانی در دقت حل به‌روش مشخصه‌ها نشان داد که با درنظر گرفتن تقسیم‌بندی مناسب برای هر لوله، سریع‌ترین پاسخ با خطای کمتر از ۱ درصد به‌دست می‌آید. هم‌چنین با کمک روش شبکه عصبی مصنوعی، پارامترهای کلیدی در سنجش از راه دور بررسی شدند تا تعداد سنسورها جهت ساده‌سازی الگوریتم کنترلی و معماری سیستم کنترل بلادرنگ کمینه شود. در نهایت تابع کنترلی با همگرایی ۹۹٪ ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی هیدرولیکی، شبکه توزیع آب، کنترل بلادرنگ فشار، شیر فشارشکن، روش مشخصه‌ها، مدیریت نشت.

رتبه دوم مسابقه پایان‌نامه برتر سال ۱۴۰۳ در مقطع کارشناسی ارشد
(برگزار شده توسط انجمن آب و فاضلاب ایران)

دانشکده: مهندسی عمران

عنوان: تعیین مکان سنسورهای فشار به‌منظور کالیبراسیون و نشت‌یابی در شبکه توزیع آب به‌کمک روش خوشه‌بندی چندنمایی و تحلیل حساسیت کلی

نگارش: محمد رجبی

استاد راهنما: دکتر مسعود تابش

تاریخ: ۱۴۰۲/۰۶/۲۰

چکیده

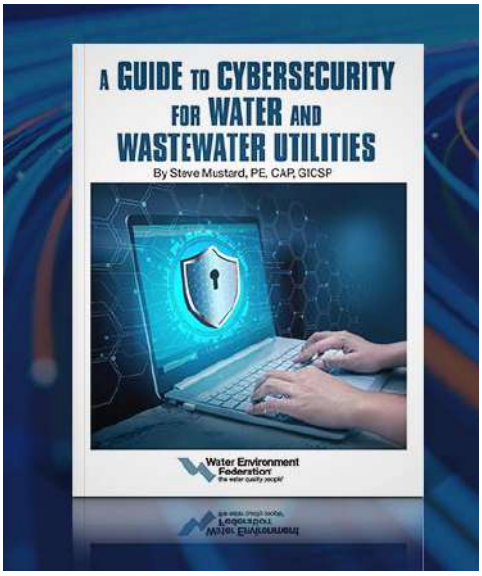
هدف اصلی شبکه توزیع آب تأمین حجم مورد انتظار آب با فشار کافی و کیفیت قابل‌قبول است. نشت در شبکه توزیع آب یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاداختلال در عملکرد مناسب شبکه توزیع آب است که باعث مشکلاتی هم‌چون هدررفت آب، خرابی لوله‌ها و ورود آلودگی به شبکه توزیع آب می‌شود. پیش‌نیاز بسیاری از روش‌های محاسباتی برای یافتن نشت، استفاده از مدل کالیبره شده شبکه توزیع آب است. تعیین مکان مناسب سنسورها برای جمع‌آوری داده‌های فشار از شبکه توزیع آب به‌منظور کالیبراسیون و نشت‌یابی در شبکه نقش حیاتی در عملکرد این فرآیند دارد. روش تعیین تعداد و مکان سنسورها در این مطالعه از دو بخش اصلی تشکیل شده است. در بخش اول گره‌های شبکه گروه‌بندی می‌شود و در بخش دوم در هر گروه یک گره به‌عنوان مکان قرارگیری سنسور تعیین می‌شود. به‌منظور کاهش تعداد سنسورها در شبکه گره‌هایی که رفتار تغییر فشار آن‌ها تحت سناریوهای مختلف تغییرات زبری و وقوع نشت مشابه یکدیگر هست در یک گروه قرار می‌گیرند. با توجه به این‌که خوشه‌بندی گره‌های شبکه بر اساس دو ماتریس حساسیت فشار نسبت به تغییرات زبری و وقوع نشت است، از روش خوشه‌بندی Multi-view K-means استفاده شده است. در این روش نتایج خوشه‌بندی برای هر یک از نماها در انتها تجمیع شده و از مراکز و فواصل جدید براساس هر دو ماتریس حساسیت استفاده می‌شود. در هر دسته از گره‌های شبکه توزیع آب، معیار انتخاب مکان سنسور، تعداد شناسایی تغییرات فشار تحت سناریوهای مختلف و هم‌چنین آنتروپی اندیس حساسیت Sobol است. در این مطالعه برای محاسبه اثرات اندرکنش بین پارامترها و هم‌چنین نحوه توزیع حساسیت بین پارامترها از روش تحلیل حساسیت Sobol استفاده شده است. عمل‌کرد روش مکان‌یابی سنسور در این مطالعه در دو شبکه Anytown و C-town مورد ارزیابی قرارگرفته است. در انتها در شبکه Anytown، کالیبراسیون با دقت ۰/۱ متر ارتفاع آب و نشت‌یابی با میانگین فاصله ۴۳۰ متر انجام گرفت و تفاوت قابل‌توجهی با حالت انتخاب تصادفی گره‌ها داشت. در شبکه C-town نیز عملکرد کالیبراسیون و نشت‌یابی تفاوت بسیار زیادی با حالت قرارگیری تصادفی سنسورها داشت.

واژه‌های کلیدی: شبکه توزیع آب، کالیبراسیون، نشت‌یابی، خوشه‌بندی چندنمایی، تحلیل حساسیت کلی.

عنوان: راهنمای امنیت سایبری برای شرکت‌های آب و فاضلاب

ناشر: فدراسیون محیط‌زیست آب (WEF)

زمان انتشار: سال ۲۰۲۴



این کتاب، برای کمک به مدیران و بهره‌برداران شرکت‌های آب و فاضلاب در دنیای پیچیده امنیت سایبری درنظر گرفته شده است. این کتاب، راهنمایی قابل‌دسترسی در خصوص این‌که چگونه شرکت‌های خدمات‌رسان با جمعیت تحت‌پوشش مختلف، می‌توانند ریسک‌های خود را مدیریت کرده، روی منابع خود متمرکز شده و کنترل‌هایی را برای ایمن نگه‌داشتن امکانات خود پیاده‌سازی کنند، در اختیارشان قرار می‌دهد. موضوعات کتاب راهنمای امنیت سایبری برای شرکت‌های آب و فاضلاب، به قرار زیر است:

- ریسک فزاینده امنیت سایبری شرکت‌های خدمات‌رسان؛
- فرآیند ارزیابی مناسب ریسک امنیت سایبری برای شرکت‌های خدمات‌رسان؛
- کنترل‌های مربوط به امنیت سایبری که باید پیاده‌سازی شود؛
- چگونه شرکت‌های خدمات‌رسان می‌توانند فرهنگ خوب مدیریت امنیت سایبری را توسعه دهند؛
- نحوه کار با اشخاص ثالث برای اطمینان از مدیریت ریسک امنیت سایبری خود؛
- چگونه شرکت‌های خدمات‌رسان باید مدیریت امنیت سایبری را حفظ کنند.

فهرست مطالب این کتاب:

فصل اول: مقدمه
فصل دوم: ریسک امنیت سایبری برای شرکت‌های خدمات‌رسان
فصل سوم: ارزیابی و مدیریت ریسک امنیت سایبری
فصل چهارم: موانع امنیت سایبری
فصل پنجم: آگاهی و فرهنگ
فصل ششم: برخورد با اشخاص ثالث
فصل هفتم: حفظ امنیت سایبری
فصل هشتم: اصطلاحات، منابع و مطالعه بیشتر

اطلاعات بیشتری از این کتاب در لینک زیر موجود است:

https://www.wef.org/publications/publications/books/a-guide-to-cybersecurity-for-water-and-wastewater-utilities/?utm_campaign=Cybersecurity+Email&utm_source=email&utm_medium=email&utm_term=&utm_content=&cpn_id=669e6698130402ab8057ee5a&e_id=6697e328985def9c826b8631

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

- اعلام برندگان مسابقه ایده برتر در سال ۱۴۰۳
- برگزاری وبینار تخصصی ۵۳ (۲۰ فروردین)
- برگزاری جلسه نود و نهم هیئت مدیره انجمن آب و فاضلاب ایران (۲۷ فروردین‌ماه)
- انتشار خبرنامه شماره ۱۰۹ (۳۱ فروردین‌ماه)
- برگزاری اولین جلسه شورای سیاستگذاری همایش ۱۴۰۴ (۲ اردیبهشت ماه)
- برگزاری جلسات شورای اجرایی همایش ۱۴۰۴ (۱۳ و ۳۰ اردیبهشت ماه)
- برگزاری وبینار تخصصی ۵۴ (۱۷ اردیبهشت ماه)
- برگزاری جلسه اتاق فکر پروژه تاریخ شفاهی (۳۰ اردیبهشت ماه)
- برگزاری جلسه صدم هیئت مدیره انجمن آب و فاضلاب ایران (۳۱ اردیبهشت ماه)
- انتشار خبرنامه شماره ۱۰۹ (۳۱ فروردین‌ماه)
- انتشار قسمت دوم مصاحبه با آقای مهندس چیت چیان در کانال‌های تاریخ شفاهی صنعت آب و فاضلاب ایران
- برگزاری جلسات شورای اجرایی همایش ۱۴۰۴ (۱۱ خرداد ماه)
- عدم برگزاری وبینار تخصصی ۵۴ (۲۸ خرداد ماه) به دلیل قطع اینترنت
- انتشار نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب، دوره ۱۰، شماره ۱، خردادماه ۱۴۰۴

خبرنامه انجمن آب و فاضلاب ایران

IWWA Newsletter

Vol. 10, No. 109, April 2025

SAVE OUR GLACIERS

WORLD WATER DAY 2025: FACTSHEET

حفاظت از یخچال‌های طبیعی، مسیری برای مقابله با بحران آب

خبرنامه انجمن آب و فاضلاب ایران

IWWA Newsletter

Vol. 10, No. 110, May 2025

"آب را دریابیم"؛ پوششی برای بیداری اجتماعی

ردیف	رویداد	موضوع (ارائه دهنده)	لینک آپارات
۱	وبینارهای تخصصی انجمن آب و فاضلاب ایران	ویروس کرونا در صنعت آب و فاضلاب (دکتر عبدالله رشیدی)	https://www.aparat.com/v/hevFM?playlist=28325845
		راه‌کارهای بهبود کیفیت پساب برکه‌های تثبیت فاضلاب (دکتر حسین ساسانی)	https://www.aparat.com/v/Antvj?playlist=28327448
		مروری بر ظرفیت‌های ارتقای پژوهش و نوآوری در حوزه آب کشور (دکتر مجتبی شفیعی)	https://www.aparat.com/v/Pob7C?playlist=29641530
		نشت‌یابی در شبکه‌های آبرسانی (دکتر محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده)	https://www.aparat.com/v/Uf3N5?playlist=28368237
		مدیریت شورابه‌های ناشی از سامانه‌های نمک‌زدایی با تاکید بر فناوری‌های ZLD (دکتر عباس اکبرزاده)	https://www.aparat.com/v/4QcMo?playlist=30860968
		چالش‌های روش‌های جایگزین برای بهبود و مدیریت کیفیت آب (دکتر مسعود یونسیان، مهندس سلیمه رضایی‌نیا و دکتر محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده)	https://www.aparat.com/v/mTSiK?playlist=737673
		ارزیابی عملکرد مدل‌های متابولیسم آب شهری قابلیت‌ها و محدودیت‌ها (دکتر کوروش بهزادیان)	https://www.aparat.com/v/DtoQY?playlist=33226803
		سواد آبی در جوامع شهری (دکتر شروین جمشیدی)	https://www.aparat.com/v/FPtCY?playlist=34242002
		تأثیرات شرایط اقلیمی بر روی ظرفیت شبکه‌ها و شکست (دکتر احسان روشنی)	https://www.aparat.com/v/5c7Ph?playlist=35313047
		ارزیابی اثرات محیط‌زیستی پروژه‌های آب و فاضلاب با رویکرد چرخه حیات (LCA) (مهندس هانیه صفرپور)	https://www.aparat.com/v/W8P7J?playlist=35547113
		کاربردهای اقتصاد چرخشی در صنعت آب و فاضلاب (دکتر سیدحسین سجادی‌فر)	https://www.aparat.com/v/y1euk?playlist=36262652
		توسعه و بهره‌برداری از شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب با رویکرد تمرکززدایی (دکتر علی حقیقی)	https://www.aparat.com/v/36WoO?playlist=37676753
		نقشه‌راه برای ارتقای شبکه‌های آبرسانی موجود به هوشمند (دکتر محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده)	https://www.aparat.com/v/f8dyx?playlist=37677090
		مبانی نظری تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار شبکه‌های توزیع آب (دکتر مسعود تابش)	https://www.aparat.com/v/RPkeb?playlist=38227690
		آشنایی با تکنیک PCR در تحقیقات محیط‌زیست و بهداشت محیط (دکتر رحیم عالی)	https://www.aparat.com/v/mbNDM?playlist=39035474
		بررسی ۲۵،۰۰۰ مقاله محیط‌زیست برای یافتن داغترین موضوعات تحقیقاتی (دکتر علیرضا بازارگان)	https://www.aparat.com/v/hwC9l?playlist=39248099
		توسعه مدل روندیابی مقیاس قاره‌ای میزوروت به منظور لحاظ دریاچه‌ها و مخازن (دکتر شروان قراری)	https://www.aparat.com/v/6Ewy5?playlist=39248537
		مروری بر وضعیت و تجارب تصفیه آب و فاضلاب در ژاپن (دکتر یحیی محزون)	https://aparat.com/v/epxDt
		سیستم‌های آبی پایدار و تاب‌آور (دکتر راضیه فرمانی)	https://aparat.com/v/EaeTg
		ارزیابی و بهینه‌سازی انرژی در سیستم‌های توزیع آب (دکتر سعید هاشمی)	https://www.aparat.com/v/3sxtT?playlist=737673
		بازچرخانی و مدیریت کیفی زهاب‌های کشاورزی (دکتر بهمن یارقلی)	https://www.aparat.com/v/Fcvyw?playlist=737673
		بازچرخانی آب‌های خاکستری در ساختمان‌های بلندمرتبه و مجتمع‌های مسکونی جدید در قالب	https://www.aparat.com/v/IFHhK?playlist=737673

		مباحث الزامی جهت ساخت مسکن (دکتر عباس اکبرزاده و همکاران)	
		مقدمه‌ای بر یادگیری ماشین برای کاربردهای مهندسی آب شهری (دکتر سیدامیرهوشنگ آیتی)	https://www.aparat.com/v/D7BvT?playlist=737673
		طراحی پایدار زیرساخت‌های دفع آب سطحی و فاضلاب شهری به کمک بهینه‌سازی چند هدفه و سیستم‌های کمک تصمیم‌گیری (دکتر امین ابراهیم بخشی پور)	https://aparat.com/v/D7BvT
		چالش‌های مدل‌سازی در بهره‌برداری بهینه و هوشمند از شبکه‌های توزیع آب (دکتر مهدی دینی)	https://www.aparat.com/v/rKPvH/
		مدلسازی سیلاب و زهکشی شهری- اهمیت و رویکردها و مقدمه‌ای بر مدل TU-FLOW و کاربردهای آن (دکتر حامد توکلی‌فر، دکتر دانکن کیتس)	ttps://www.aparat.com/v/jTbgx/
		کاربرد متدولوژی ارزش برای بهبود پروژه‌های بزرگ آب و آبفا (دکتر کامران امامی)	https://www.aparat.com/v/Nig5q/
		آلودگی منابع آب و خاک به آرسنیک و روش‌های پالایش آن (دکتر بهمن یارقلی)	https://www.aparat.com/v/AxQw3
		مدل‌های داده‌محور و برخط پیش‌بینی سیلاب در سیستم‌های جمع‌آوری آب باران شهری (مهندس فرزاد پیاده)	https://www.aparat.com/v/kdcZC
		پیل سوختی میکروبی به‌عنوان یک راه‌حل پایدار برای تصفیه فاضلاب: از تحقیق تا کاربرد (دکتر علیرضا ولی‌پور مرندی)	https://www.aparat.com/v/cQevG
		بیوراکتورهای غشایی در تصفیه فاضلاب: وضعیت موجود، چالش‌ها و فرصتهای پیش‌رو (دکتر مسعود طاهریون)	https://www.aparat.com/v/zNPCU
		اثرات تغییر اقلیم بر کیفیت رواناب‌های شهری: از مدل‌سازی تا رویکردهای مدیریتی مبتنی بر توسعه پایدار (دکتر یاسر طهماسبی بیرگانی)	https://aparat.com/v/AOrNB
		نبرد شبکه‌های متمرکز و غیرمتمرکز جمع‌آوری آب شهری: از دیدگاه افزونگی (مهندس سینا حصارکزازی)	https://aparat.com/v/5SVaJ
		مدیریت ناترازی تولید و مصرف آب با تکیه بر مدیریت مصرف آب (دکتر عباس اکبرزاده)	https://www.aparat.com/v/Q3SCk
		واکاوی تجربه کشور چین در حفاظت از منابع طبیعی و مدیریت مصرف آب (دکتر بنفشه زهرایی)	https://www.aparat.com/v/Onls2
		ضربه آبی، چرا و چگونه؟ از مفاهیم تا اجرا (مهندس ابوالفضل رضایی‌راد)	https://www.aparat.com/v/TtlmP
		پکیج‌های تصفیه فاضلاب؛ معیارهای طراحی و روش ساخت (مهندس حمیدرضا خسروجردی)	https://www.aparat.com/v/ieWtp
		سپتاژ، یک معضل محیط‌زیستی کشور، چالش‌ها، راه‌حل‌ها (دکتر ذبیح اله یوسفی)	https://aparat.com/v/DcoFP
		قدرت تحول آفرین سنجش از دور و هوش مصنوعی (دکتر احد نظرپور)	https://aparat.com/v/Fvb7q
		مطالعه ترکیبات مختل‌کننده غدد درون‌ریز (EDCs) در رودخانه کارون و تصفیه‌خانه فاضلاب (دکتر علی اکبر بابائی)	https://www.aparat.com/dashboard/videostat/185Cp

		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://aparat.com/v/n5B73
		معرفی نسل جدید مواد اولیه PE100-RD مناسب جهت لوله و اتصالات پلی‌اتیلنی مورد استفاده در سامانه‌های لوله‌گذاری انتقال آب با گندزاداهای پایه کلر (دکتر غلامرضا پیرچراغی، مهندس حمیدرضا شمسی و مهندس علیرضا صحاف امین)	https://www.aparat.com/v/JL0OZ
		چرخه معیوب آب بدون درآمد و مکانیسم نشت آب شناخت و راهکار (مهندس محمدرضا عزیزی)	https://www.aparat.com/v/XIujP
		مدل یادگیری ماشین ارتقا یافته توسط فیزیک مسئله برای مدل‌سازی شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب (دکتر علی حقیقی)	https://www.aparat.com/v/yas7w5j
		ارتقای عملکرد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌کمک ابزار مدل‌سازی و استراتژی‌های کنترل هوشمند (مهندس علی خواجویان)	https://www.aparat.com/v/vrwl09a
		نحوه طراحی، نگهداری و تعمیرات و تعویض شیرآلات شبکه‌های توزیع آبرسانی شهری (مهندس روح الله توکلی)	https://www.aparat.com/v/qxu7o4r
		چالش‌های مدل‌سازی شبکه توزیع آب در شرکت‌های آب و فاضلاب (مهندس محمدامین غیبی)	https://www.aparat.com/v/rbq7l7e
		کاربرد مدل پویایی سیستم در مدیریت و برنامه‌ریزی آب شهری (مهندس صادق دانش پژوه)	https://aparat.com/v/ckv6314
		نمک‌زدایی آب در ایران: وضعیت موجود، چالش‌ها و فرصت‌ها (دکتر مسعود طاهریون)	https://www.aparat.com/v/iojt09e
		شبکه‌های توزیع آب هوشمند با رویکرد پایش شبکه آب و مدل‌های داده مبنا (مهندس محمد رجبی)	https://www.aparat.com/v/xpl25f3
		تعیین محل نشت‌ها در شبکه‌های توزیع آب به‌روش شبیه‌سازی هیدرولیکی (دکتر رضا معاشری)	https://aparat.com/v/nqkqc80
		بررسی نوسانات جریان در شبکه‌های توزیع آب شهری با وجود مخازن ذخیره آب داخل ساختمان‌ها (دکتر رامتین مظاهری)	https://www.aparat.com/v/znmnpnv/
		مسائل و چالش‌های کلیدی برای مدیریت شبکه‌های توزیع آب در شرایط عدم قطعیت (Prof. Maria Conceicao Cunha)	https://irwwa.ir
		مدل‌های شکست برای سیستم‌های آب شهری: قابلیت انتقال و عدم قطعیت‌ها (Dr-Ing. Bahnam Askari Lasaki)	https://aparat.com/v/oorl4x9
		بازچرخش و استفاده مجدد از فاضلاب شهری و صنعتی در شهرکهای صنعتی: رویکردها، چالشها، مقررات بین المللی و ملی، درجه تصفیه با توجه به نوع مصارف صنعتی (پروفسور افشین تکدستان)	https://aparat.com/v/resx9a1
۲	نشست‌های	سامانه‌های فاضلاب، اپیدمی‌ها و بیماری‌های نوظهور	https://www.aparat.com/v/6OhwE?playlist=31020035
		تاب‌آوری شبکه‌های آب و فاضلاب	https://www.aparat.com/v/IXWfd?playlist=31174320

	تخصصی انجمن آب و فاضلاب ایران	هوشمندسازی و نوآوری در سامانه‌های آب و فاضلاب	https://www.aparat.com/v/7JxVU?playlist=35531526
		بازنگری شاخص و استاندارد کیفیت منابع آب ایران	https://www.aparat.com/v/lSgM7?playlist=31219788
		چالش‌های تعیین الگوی مصرف آب	https://www.aparat.com/v/tn4E9?playlist=32316111
		تاب‌آوری زیرساخت‌های آب و فاضلاب در شرایط بحران به ویژه سیلاب	https://www.aparat.com/v/DZzYX?playlist=879646
		استفاده از آب خاکستری در محیط‌های شهری	https://www.aparat.com/v/t1iaZ?playlist=33416246
		چالش‌ها، راهبردها و انتظارات از وزیر آتی نیرو در حوزه آب	https://www.aparat.com/v/o1geI?playlist=36877054
		نقش اقتصاد در مدیریت مصرف آب	https://www.aparat.com/v/LxjEw?playlist=879646
		کاهش تلفات واقعی	https://www.aparat.com/v/s3lwQ?playlist=879646
		تلفات ظاهری آب	https://www.aparat.com/v/nBNj5?playlist=879646
		مدیریت مصرف آب	https://www.aparat.com/v/PO35T?playlist=879646
		نمک‌زدایی آب‌های شور و بازیافت آب به‌عنوان منابع راهبردی در مقابله با تنش آبی کشور	https://www.aparat.com/v/xyr2O?playlist=879646
		مدیریت مصرف آب و سازگاری با کم آبی	https://www.aparat.com/v/dVKvu?playlist=879646
		مدیریت تعارضات آب و بازتعریف مسئله زاینده‌رود	https://www.aparat.com/v/hEXdv?playlist=879646
		دستاوردها و چالش‌های استفاده از آب‌های نامتعارف	https://www.aparat.com/v/Ax3cG?playlist=879646
		نمک‌زدایی آب‌های شور و بازیافت آب به‌عنوان منابع راهبردی در مقابله با تنش آبی کشور	h https://www.aparat.com/v/xyr2O
		رویکردهای برنامه ایمنی آب	https://www.aparat.com/v/BFhCa
		نقش اقتصاد در مدیریت مصرف آب	https://www.aparat.com/v/LxjEw
		چالش‌های انتقال آب دریا به فلات مرکزی	https://www.aparat.com/v/Lzf1g
		تاب‌آوری سامانه‌های آب و فاضلاب، با نگاه به تجربه همدان و شهرکرد	https://www.aparat.com/v/B5Lle
		چالش‌های استفاده دوباره از پساب‌های شهری در صنعت و فضای سبز	https://www.aparat.com/v/41JAS
		بررسی چالش‌ها و پیامدهای تغییر اقلیم و مداخلات انسانی بر کیفیت آب	https://aparat.com/v/jBUwJ
		مدیریت بهینه مصرف آب با رویکرد الزام صنایع به استفاده از پساب	https://aparat.com/v/eotT5
		راه‌کار و چالش‌های سرمایه‌گذاری در کاهش هدررفت آب در سامانه‌های آبرسانی	https://aparat.com/v/qOUfQ
		نشست تخصصی فرونشست زمین، چالش‌ها و راه‌کارها	https://aparat.com/v/ylr1g40
		نشست تخصصی کاربرد هوش مصنوعی در صنعت آب و فاضلاب	https://aparat.com/v/wjprm10
		نشست تخصصی مدیریت لجن در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب	https://aparat.com/v/cawfci9
۳	اولین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران (۱۳۹۵)	مراسم افتتاحیه	https://www.aparat.com/v/hcuQk?playlist=5771644
		نشست تخصصی اول؛ سیاست‌های تأمین آب شرب در ایران	https://www.aparat.com/v/j2lAK?playlist=5771644
		نشست تخصصی دوم؛ سیاست‌های صنعت جمع‌آوری فاضلاب و بازیافت پساب	https://www.aparat.com/v/LajYD?playlist=5771644
		نشست تخصصی سوم؛ تأثیر مسائل اجتماعی، فرهنگی و مشارکت جامعه در مدیریت مصرف آب	https://www.aparat.com/v/6LBfm?playlist=5771644
		مراسم اختتامیه	https://www.aparat.com/v/hr4Un?playlist=5771644
۴	اولین همایش ملی مدیریت	مراسم افتتاحیه	https://www.aparat.com/v/AmjKX
		نشست تخصصی اول؛ مدیریت مصرف آب	https://www.aparat.com/v/PO35T
		نشست تخصصی دوم؛ تلفات ظاهری آب	https://www.aparat.com/v/nBNj5
		نشست تخصصی سوم؛ کاهش تلفات واقعی	https://www.aparat.com/v/s3lwQ

	مصرف و هدررفت آب (۱۳۹۶)	مراسم اختتامیه	https://www.aparat.com/v/wmjDk
۵	دومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران و دومین همایش ملی عرضه و تقاضای آب شرب و بهداشتی (۱۳۹۷)	مراسم افتتاحیه	https://www.aparat.com/v/SAOxw
		نشست تخصصی اول؛ مدیریت تعارضات آب و بازتعریف مسئله زاینده‌رود	https://www.aparat.com/v/hEXdv
		نشست تخصصی دوم؛ مدیریت مصرف آب و سازگاری با کم‌آبی	https://www.aparat.com/v/dVKvu
		نشست تخصصی سوم؛ دستاوردها و چالش های استفاده از آب‌های نامتعارف	https://www.aparat.com/v/Ax3cG
		مراسم اختتامیه	https://www.aparat.com/v/pYO7g
۶	دومین همایش ملی مدیریت مصرف آب با رویکرد کاهش هدررفت و بازیافت (۱۳۹۸)	مراسم افتتاحیه	https://www.aparat.com/v/SHiuG
		نشست تخصصی اول؛ چالش‌های تعیین الگوی مصرف آب	https://www.aparat.com/v/tn4E9
		نشست تخصصی دوم؛ تاب‌آوری زیرساخت‌های آب و فاضلاب در شرایط بحران به ویژه سیلاب	https://www.aparat.com/v/DZzYX
		نشست تخصصی سوم؛ استفاده از آب خاکستری در محیط‌های شهری	https://www.aparat.com/v/t1iaZ
		مراسم اختتامیه	https://www.aparat.com/v/nQ2Ez
۷	سومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران (۱۳۹۹)	مراسم افتتاحیه	https://www.aparat.com/v/V7BNT
		نشست تخصصی اول؛ سامانه‌های فاضلاب، اپیدمی‌ها و بیماری‌های نوظهور	https://www.aparat.com/v/6OhwE
		نشست تخصصی دوم؛ تاب‌آوری شبکه‌های آب و فاضلاب	https://www.aparat.com/v/IXWfd
		نشست تخصصی سوم؛ هوشمندسازی و نوآوری در سامانه‌های آب و فاضلاب	https://www.aparat.com/v/7JxVU
		نشست تخصصی چهارم؛ بازنگری شاخص و استاندارد کیفیت منابع آب ایران	https://www.aparat.com/v/lSgM7
		کلینیک صنعت اول؛ شبکه‌های توزیع آب	https://www.aparat.com/v/cGUn1
		کلینیک صنعت دوم؛ کیفیت آب	https://www.aparat.com/v/ntsvY
		کلینیک صنعت سوم؛ تصفیه فاضلاب و بازیافت آب	https://www.aparat.com/v/Fz5wu
		کلینیک صنعت چهارم؛ شبکه های جمع آوری فاضلاب	https://www.aparat.com/v/lKLRc
		مراسم اختتامیه	https://www.aparat.com/v/yLp7u
۸	اولین همایش ملی مدیریت کیفیت آب و سومین همایش ملی مدیریت مصرف آب (۱۴۰۰)	مراسم افتتاحیه	https://www.aparat.com/v/FWHLM
		نشست تخصصی اول؛ نمک‌زدایی آب‌های شور و بازیافت آب به‌عنوان منابع راهبردی در مقابله با تنش آبی کشور	https://www.aparat.com/v/xyr2O
		نشست تخصصی دوم؛ رویکردهای برنامه ایمنی آب	https://www.aparat.com/v/BFhCa
		نشست تخصصی سوم؛ نقش اقتصاد در مدیریت مصرف آب	https://www.aparat.com/v/LxjEw
		کلینیک صنعت اول؛ محور شبکه‌های توزیع آب و کاهش هدررفت	https://www.aparat.com/v/5c82a
		کلینیک صنعت دوم؛ محور بازیافت آب	https://www.aparat.com/v/KnEdF
		کلینیک صنعت سوم؛ محور کیفیت آب	https://www.aparat.com/v/A5wkz
		مراسم اختتامیه	https://www.aparat.com/v/OgGXj

۹	چهارمین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران (۱۴۰۱)	مراسم افتتاحیه	https://www.aparat.com/v/OB57I
		نشست تخصصی چالش‌های انتقال آب دریا به فلات مرکزی	https://www.aparat.com/v/Lzf1g
		نشست تخصصی تاب‌آوری سامانه‌های آب و فاضلاب، با نگاه به تجربه همدان و شهرکرد	https://www.aparat.com/v/B5Lle
		نشست تخصصی چالش‌های استفاده دوباره از پساب‌های شهری در صنعت و فضای سبز	https://www.aparat.com/v/41JAS
		کلینیک صنعت اول؛ محور کیفیت آب	https://www.aparat.com/v/16VTE
		کلینیک صنعت دوم؛ محور شبکه‌های توزیع و هدررفت آب	https://www.aparat.com/v/PupUv
		کلینیک صنعت سوم؛ محور بازیافت آب و تصفیه فاضلاب	https://www.aparat.com/v/hr8Qs
		مراسم اختتامیه	https://www.aparat.com/v/nRdX3
		پیام آقای مهندس محمودیان	https://aparat.com/v/kIHYq
		کارگاه ایمنی آب	https://aparat.com/v/Uaun9
۱۰	دومین همایش ملی کیفیت آب و چهارمین همایش ملی مدیریت مصرف آب با رویکرد کاهش هدررفت و بازیافت (۱۴۰۲)	مراسم افتتاحیه	https://www.aparat.com/dashboard/videostat/UwoCu
		سخنرانی جناب آقای دکتر مهدی قاسمیه	https://www.aparat.com/dashboard/videostat/YHGs3
		سخنرانی جناب آقای دکتر مسعود تابش	https://www.aparat.com/dashboard/videostat/Q5jre
		سخنرانی جناب آقای دکتر مسعود تجریشی	https://www.aparat.com/dashboard/videostat/Ovg0e
		سخنرانی سرکار خانم دکتر سمیه رفیعی	https://aparat.com/v/Zz6aS
		مراسم تجلیل از پیشکسوتان برگزیده	https://www.aparat.com/dashboard/videostat/Gs89r
		نشست تخصصی اول؛ بررسی چالش‌ها و پیامدهای تغییر اقلیم و مداخلات انسانی بر کیفیت آب	https://aparat.com/v/jBUwJ
		نشست تخصصی دوم؛ مدیریت بهینه مصرف آب با رویکرد الزام صنایع به استفاده از پساب	https://aparat.com/v/eotT5
		نشست تخصصی سوم؛ راه‌کار و چالش‌های سرمایه‌گذاری در کاهش هدررفت آب در سامانه‌های آبرسانی	https://aparat.com/v/qOUfQ
		کلینیک صنعت اول؛ طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع آب و مدیریت مصرف	https://aparat.com/v/GDMw7
		کلینیک صنعت دوم؛ کیفیت آب و پساب	https://aparat.com/v/HuZRi
		کلینیک صنعت سوم؛ تصفیه و بازچرخانی فاضلاب شهری و صنعتی	https://www.aparat.com/v/nCJ0p
		مراسم اختتامیه	https://aparat.com/v/j90wr
۱۱	پنجمین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران (۱۴۰۳)	مراسم افتتاحیه	https://aparat.com/v/fhttc6r
		نشست تخصصی فرونشست زمین، چالش‌ها و راه‌کارها	https://aparat.com/v/ylr1g40
		نشست تخصصی کاربرد هوش مصنوعی در صنعت آب و فاضلاب	https://aparat.com/v/wjprm10
		نشست تخصصی مدیریت لجن در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب	https://aparat.com/v/cawfci9
		کلینیک صنعت-محور طراحی و بهره برداری از شبکه توزیع آب و مدیریت مصرف	https://www.aparat.com/v/wyioho8
		کلینیک صنعت - محور تصفیه و بازچرخانی فاضلاب شهری و صنعتی	https://www.aparat.com/v/bxcbjtu
		مراسم اختتامیه	https://aparat.com/v/iyzomj1

کنفرانس های داخلی

عنوان کنفرانس	برگزارکنندگان	محل برگزاری	تاریخ برگزاری	سایت کنفرانس
نخستین کنفرانس هیدروانفورماتیک و هوش مصنوعی در مهندسی آب	دانشگاه فردوسی مشهد	دانشگاه فردوسی مشهد	۲۶ و ۲۷ شهریورماه ۱۴۰۴	HYDROAI.UM.AC.IR
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/
سومین همایش ملی مدیریت کیفیت آب وپنجمین 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/

کنفرانس های خارجی

عنوان کنفرانس	محل برگزاری	تاریخ برگزاری	سایت کنفرانس
14th IWA Specialist Group for Instrumentation, Control, and Automation (ICA)	Oslo/Norway	30 Jun - 02 July 2025	iwa-ica2025.net
12th International Water Association Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries	Turkey	10 - 12 Sep 2025	https://agro2025.itu.edu.tr/
IWA Membrane Technology Conference 2025	Austria	15 – 19 September 2025	https://mtc2025.org/
13th Urban Drainage Modelling Conference	Innsbruck, Austria	15 – 19 September 2025	http://www.udm2025.org/
IWA Efficient Conference 2025	Netherlands	17 - 19 Sep 2025	https://www.awa.asn.au/efficient2025
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/
The 19th IWA Conference on Sludge Management - Toward Material Cycle and Low Carbon Society	Kyoto/Japan	21-24 October 2025	Iwa-19th-sludgemanagement.jp
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	Japan	21 – 24 Oct 2025	https://iwa-19th-sludgemanagement.jp/
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/

3rd National Conference on
Water Quality Management
&
5th National Conference on
Water Consumption Management
with Loss Reduction and Reuse Approach
سومین همایش ملی
مدیریت کیفیت آب
و
پنجمین همایش ملی
مدیریت مصرف آب
با رویکرد کاهش هدررفت و بازیافت
2-4 Dec. 2025
Abbaspour School of Engineering
Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴
پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور
دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
محورهای همایش
هدررفت واقعی، ظاهری و مصارف مجاز بدون درآمد در شبکه‌های توزیع آب
تاثیرات 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
پایش کمی و کیفی پساب بازیافتی
پایش کیفی اکوسیستم‌ها
مدیریت مصرف آب
رویکردهای اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و حقوقی در مدیریت مصرف و استفاده از پساب
تاثیر 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
برنامه ایمنی آب
محور ویژه:
• عوامل و چالش‌های ناترازی در بخش آب و تاثیر آن بر تاب‌آوری شهری •
مهلت ارسال مقالات کامل: ۵ مهرماه ۱۴۰۴
آدرس دبیرخانه: تهران، حکیمیه، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست
تلفن: ۰۲۱-۷۷۳۱۲۸۹۶ نمابر: ۰۲۱-۷۷۳۱۲۸۹۶
تلگرام/ واتساپ / ایتا: ۰۹۱۸۹۷۱۴۷۵
iwwa-conf.ir
irwwa.conf@gmail.com
t.me/iwwa_conf
Instagram.com/irwwa.ir

فراخوان دهمین دوره
"انتخاب پایان‌نامه برتر"

۱۰

ویژه دانش‌آموختگان سال‌های ۱۴۰۱ به بعد

انجمن آب و فاضلاب ایران در نظر دارد در دهمین دوره برگزاری مسابقات پایان‌نامه برتر، به‌منظور ترویج تحقیقات بنیادی و کاربردی در حوزه علوم و مهندسی آب و فاضلاب، پایان‌نامه‌های برتر در "مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری" را با اهدای لوح تقدیر و جوایز نفیس مورد تشویق قرار دهد.

از علاقه‌مندان دعوت می‌شود 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 پایان‌نامه 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، هم‌زمان 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 می‌شود، اعطا می‌شود.

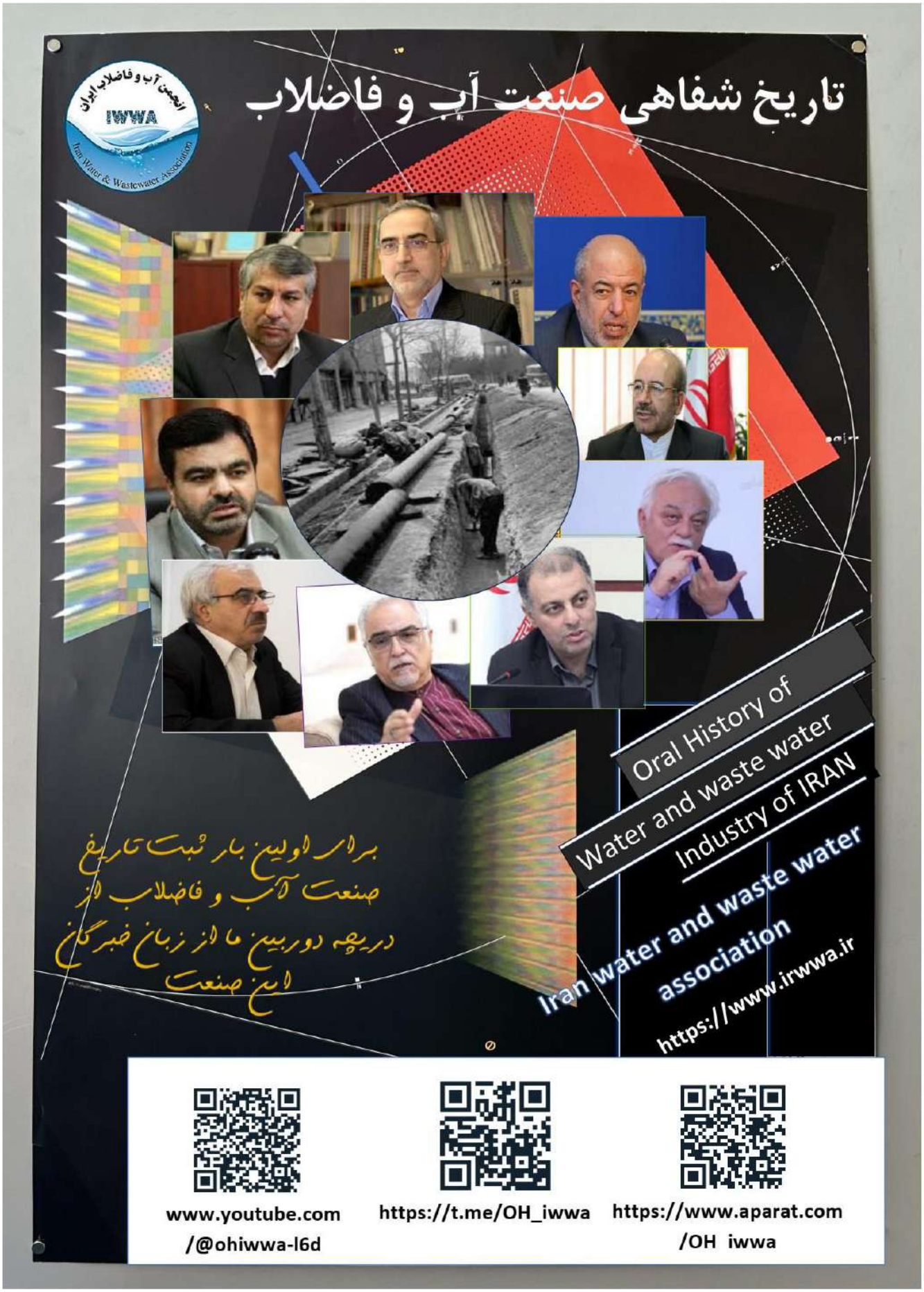
Telegram.me/irwwa94

۰۲۱-۸۸۳۹۱۳۹۰

https://www.aparat.com/irwwa

۰۹۹۶۰۳۹۹۹۳۷

irwwa.ir
info@irwwa.ir


تاریخ شفاهی صنعت آب و فاضلاب
انجمن آب و فاضلاب ایران
IWWA
Iran Water & Wastewater Association
Oral History of
Water and waste water
Industry of IRAN
Iran water and waste water
association
https://www.irwwa.ir
برای اولین بار ثبت تاریخ
صنعت آب و فاضلاب از
دریچه دوربین ما از زبان خبرگان
این صنعت
www.youtube.com
/@ohiwwa-l6d
https://t.me/OH_iwwa
https://www.aparat.com
/OH iwwa

نام شرکت	سطح عضویت	لوگو
مهندسین مشاور آبساران	الماسی	
شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان	الماسی	
شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجان غربی	الماسی	
مهندسین مشاور طرح و تحقیقات اصفهان	الماسی	
شرکت آب و فاضلاب کاشان	الماسی	
فرآیند ارقام پرداز	الماسی	
شرکت آب و فاضلاب مشهد	طلایی	
فناور ایمن لوتوس	طلایی	
شرکت مهندسی خطوط لوله توانا	طلایی	

شرکت عمران میادین آب	طلایی	
شرکت پارس رهاب شیبکوه	طلایی	
مهندسی مشاور طوس آب	نقره‌ای	
مهندسین مشاور پارس آرین آب	نقره‌ای	
پویاک	نقره‌ای	
صنایع وکیوم پارس	نقره‌ای	
مهندسین مشاور آبران	نقره‌ای	
خدمات مهندسی برق و الکترونیک رعدآب	نقره‌ای	
رشاب طرح	نقره‌ای	
بهینه طراحی پرشیا	نقره‌ای	
زایندآب	نقره‌ای	
مهندسین مشاور یکم	برنزی	
آبان بسپار پارسیان	برنزی	

فراگیر انرژی و پالایش مادیار	برنزی	
خط لوله هامون (هپیکو)	برنزی	
سنجش افزار آسیا	برنزی	
آب و فاضلاب فارس	برنزی	
شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجان شرقی	برنزی	
مهندسین مشاور آینده میترا	برنزی	
شرکت مهندسی و ساخت بویلر و تجهیزات مپنا	برنزی	
شرکت مهندسین مشاور آب‌سو	برنزی	
شرکت مهندسی فن آوران خرد راد	برنزی	
شرکت فرآیند زیست	برنزی	
شرکت دریارود جنوب	برنزی	

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.

حق عضویت اعضای حقیقی

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

هزینه چاپ آگهی در نشریات انجمن

نوع	مبلغ (ریال)
۱ صفحه در یک شماره	۲۰۰۰۰۰۰۰
۲ صفحه در یک شماره	۴۰۰۰۰۰۰۰
۱ صفحه در چهار شماره پیاپی*	۹۰۰۰۰۰۰۰
۲ صفحه در چهار شماره پیاپی*	۱۲۰۰۰۰۰۰۰

* شامل یک‌سال عضویت حقوقی انجمن

شماره حساب: ۱۳۵۷۲۰۶۲۳

شماره شبا: IR930180000000000135720623

شماره کارت مجازی: ۵۸۵۹-۸۳۷۰-۰۹۹۰-۳۱۰۱

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

لطفا اســـکن فیش واریزی را به ایمیل واحد پذیرش انجمن (membership@irwwa.ir) ارسال فرمایید.

جدول مزایای اعضای حقوقی طرح جدید

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

اعضای محترم حقوقی / حامیان انجمن، می‌توانند از **اعتبار خود** در یک یا چند مورد از موارد زیر استفاده کنند:

- درج آگهی در نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب (تمام صفحه، معادل ۲ میلیون تومان اعتبار و نیم صفحه معادل ۱ میلیون تومان اعتبار)؛
- استفاده از کارگاه‌ها و دوره‌های آموزشی (متناسب با هزینه کارگاه و تعداد شرکت‌کنندگان معرفی‌شده از سوی شرکت از اعتبار کسر می‌شود)؛
- شرکت در همایش‌های انجمن (متناسب با هزینه شرکت در همایش و تعداد شرکت‌کنندگان معرفی‌شده از سوی شرکت از اعتبار کسر می‌شود)؛
- امکان اجاره غرفه نمایشگاهی که هم‌زمان با همایش‌های انجمن برگزار می‌شوند (متناسب با متراژ غرفه از اعتبار کسر می‌شود)؛
- صدور گواهی شرکت در وبینار (صدور هر گواهی برای شرکت‌کنندگان معرفی‌شده 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 به‌شرح زیر بهره‌مند شوند.

مزایای عضویت در انجمن آب و فاضلاب ایران

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

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 منحصرا 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، حتما باید از طریق صفحه شخصی قبلی خود نسبت به ارسال مقاله اقدام نموده و به‌هیچ عنوان دوباره در سامانه ثبت نام نکند.
- وارد کردن اسامی و اطلاعات کامل تمامی نویسندگان در سامانه و در محل مربوط به مشخصات نویسندگان مقاله، الزامی است.
- نویسندگان در طی مراحل ارسال مقاله، در قسمت نامه به سردبیر، متعهد می‌شوند که مقاله صرفا 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 و در سایت اعلام کند.

❖ فایل‌های لازم

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

- فایل word مقاله بدون نام نویسندگان، که شامل کلیه اجزا و محتویات مقاله است و شکل‌ها و جدول‌ها در جای خود جانمایی شده‌اند.
- فایل pdf مقاله بدون نام نویسندگان که شامل کلیه اجزا و محتویات مقاله است و شکل‌ها و جدول‌ها در جای خود جانمایی شده‌اند.
- فایل مشخصات نویسندگان.
- فایل حق چاپ (Copy Right): نامه‌ای است که نویسندگان با مضمون تعهد ارسال مقاله فقط برای مجله علوم و مهندسی آب و فاضلاب تهیه می‌کنند و با امضای کلیه مولفین با ترتیبی که قرار است چاپ شود، ارسال می‌نمایند (نمونه این نامه در زمان ثبت مقاله در قسمت نامه به سردبیر قابل رویت است).
- فایل تعارض منافع (Conflict of Interests): نامه‌ای است که نویسندگان با مضمون تعهد به رعایت کلیه اصول اخلاق نشر ارسال می‌نمایند (نمونه این نامه در زمان ثبت مقاله در قسمت نامه به سردبیر قابل رویت است).

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

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

❖ نام نویسنده(گان):

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

❖ نام مؤسسه:

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

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 به‌صورت 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 به‌صورت 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 به‌طور 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، بخش قدردانی در انتهای مقاله و قبل از بخش مراجع نوشته می‌شود. بخش‌های مختلف متن و همه صفحات و همین‌طور تمام سطرها به‌ترتیب شماره‌گذاری می‌شوند.

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

❖ **جدول‌ها و شکل‌ها:**

جدول‌ها و شکل‌ها در محل مناسب بعد از معرفی آن‌ها در متن مقاله در فایل word مقاله با کیفیت مناسب چاپ، ارائه می‌شوند. همه جدول‌ها و شکل‌ها شماره‌گذاری شده و عنوان جدول در بالای آن و عنوان شکل در زیر آن نوشته می‌شود. در عنوان جدول‌ها و نمودارها باید سه ویژگی «چه، کجا و کی» برای محتوای آن مشخص شود. مثلاً نوشته شود: نوسان‌های دبی آب خام در تصفیه خانه بابا شیخ علی شهر اصفهان در سال ۱۳۹۵. در ضمن اگر شکل یا جدولی از مرجع دیگری اخذ شده است، به مرجع موردنظر در آخر عنوان جدول یا شکل اشاره می‌شود و مشخصات مأخذ در بخش مراجع درج می‌شود. هم‌چنین ارسال فایل اصلی شکل‌ها در محیط نرم‌افزاری به‌همراه کاربرگ داده‌های نمودار نیز ضروری است. در فایل pdf مقاله، تمامی شکل‌ها و جدول‌ها در محل خودشان در متن مقاله جانمایی می‌شوند.

- در صورتی‌که 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 به‌صورت خوانا با حروف و علائم مناسب با استفاده از Microsoft Equation تهیه می‌شوند. واحدها برحسب واحد بین‌المللی (SI) و معادلات به‌ترتیب 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 به‌منظور اشاره به مرجع به‌صورت (نویسنده، سال) عمل می‌شود. ارجاع در داخل متن به بیش از یک مرجع در کنار هم، به‌این صورت است که مراجع با نقطه ویرگول (؛) ازهم 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 (به‌صورت فارسی) و مراجع انگلیسی (به‌صورت انگلیسی) نوشته می‌شود. در صورتی‌که نویسندگان تا دو نفر باشند، نام هر دو نویسنده و در صورتی‌که 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 به‌صورت الفبایی است. تاکید می‌شود که در بخش فهرست مراجع، نام مجله، انتشارات، موسسه، کنفرانس و غیره به‌صورت کامل درج می‌شود و از به‌کار بردن نام اختصاری آن‌ها (Abbreviation) خودداری شود.

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

در نگارش انواع مراجع از فرمت زیر استفاده شود:

- **مقاله فارسی:**

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

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

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

- **مقاله غیر فارسی:**

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

- **مقاله منتشر نشده:**

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

- **کتاب:**

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

- **بخشی از کتاب:**

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

- **موسسه به‌جای 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.

- **پایان‌نامه:**

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 صورت‌گیرد. 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 قابل‌قبول 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 می شود 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 ساختاربندی 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 به‌شرط 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. بدین‌ترتیب، 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 حال‌حاضر کاملاً عینی یا واقعی نیستند. نویسندگانی که از هوش مصنوعی برای نوشتن تحقیقات خود استفاده می کنند باید تمام تلاش خود را برای اطمینان از صحت 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 می شود باید مبلغ دو میلیون و پانصد هزار ریال برای هزینه پردازش اولیه و مبلغ پنج میلیون ریال برای هزینه انتشار به شماره کارت: ۳۱۰۱-۰۹۹۰-۸۳۷۰-۵۸۵۹ 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. 1, Spring 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:	**Haghighi, A. (Ph.D.)**

Editorial Board:

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

Industrial Water and Wastewater Policy Council:

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

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

نشریه علمی

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

سال دهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۳

انجمن آب و فاضلاب ایران

ISSN 2588-3941

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering

Volume 10, No. 1, Spring 2025

Preface (Smart Management of Drought and Water Scarcity in Iran: From Regional Experiences to the Artificial Intelligence Revolution) 2
Pejman Taheri

Papers

Modeling the Evaluation of the Financial Performance of the Water and Wastewater Industry with a Confirmatory Factor Analysis Approach 3
Amir Norouzi Sarang, Alireza Mehrazeen and Abolghasem Masih Abadi

Locating the Average Pressure Zone Point in Water Distribution Networks through Hydraulic Analysis 19
Reza Moasheri and Mohammadreza Jalili Ghazizadeh

Vulnerability Assessment of Urban Sewer Networks Against Industrial Discharges Using RAMCAP Method, Case Study: Tehran City 30
Aghil Ghorbani Shahnajafi, Seyed Hossein Hashemi and Seyed Naser Bashi Azghadi

Performance Evaluation of a Microbial Desalination Cell Using Bio-Cathode for the Treatment of Saline Water 41
Raoof Rabiee and Seyed Morteza Zamir

Chromium Removal from Aqueous Solutions Using Fixed Bed Continuous Reactor with Ammonium Bromide Ligand-Modified Nanozeolite Spherical Granules 49
Azam Dehnabi and Nima Zolfaghari

Presenting an Adaptable Financial Model for Creating Sustainable Energy Using Hydroelectricity in Mashhad Water and Wastewater Company 61
Javad Barati, Maryam Rasoulzadeh, Mahshid Sami, Alireza Sedghiyan and Nahid Rajabzadeh

General Section

Interview (Eng. Yaser Esmaeili) 70
Round-Table (Specialized meeting on the application of artificial intelligence in the water and wastewater industry) 72
Best Thesis 85
Book Presentation 88
IWWA News 89