ISSN 2588-3941

نشریه علمی

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

سال هشتم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲

پیشگفتار (همتاهای دیجیتال، فناوری تحول آفرین در مدیریت آب شهری) ۲
علی حقیقی

مقالات علمی

تصفیه فسفات زهاب‌های کشاورزی با استفاده از راکتور زیستی کاه و کلش گندم ۴
آتنا نادری، هادی رمضانی اعتدالی، عباس کاویانی، محمد بی‌جن‌خان و مجتبی اکرم

کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب با درنظر گرفتن عدم‌قطعیت متغیر فشار در گره‌ها ۱۳
مهدی دینی، غلامرضا عباس‌پور و سیده عطری ثاقبیان

بررسی عملکرد روش ترکیبی دگینگ با الگوریتم پایه درخت هوفدینگ در طبقه‌بندی کیفی آب شرب ۲۵
محمدتقی ستاری و سحر جاویدان

ارزیابی پیوند آب-انرژی در صادرات و واردات برق ایران با استفاده از رویکرد آب مجازی ۳۵
مرتضی تهامی‌پور زرندی و عرفان اسمعیل‌زاده هنجنی

بهینه‌سازی فرآیند اکسیداسیون پیشرفته رادیکال سولفاتی برای کاهش مواد آلی فاضلاب کارخانه خمیر و کاغذ با استفاده از روش سطح پاسخ ۴۷
علی طهماسبی، محمدحسین صراف‌زاده و سید بهنام غفاری

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر نانو اکسید روی و نانو اکسید مس بر مقاومت شیارشدگی و جذب آلایندگی در آسفالت متخلخل در رواناب سطحی شهری ۵۹
رامتین صبح‌خیز فومنی، طاهر رجایی و اسماعیل فاتحی‌فر

مطالب عمومی

مصاحبه (دکتر منوچهر وثوقی) ۷۰
میزگرد (نشست تخصصی چالش‌های استفاده دوباره از پساب‌های شهری در صنعت و فضای سبز) ۷۲
پایان‌نامه برتر ۸۲
معرفی کتاب ۸۷
گزارش همایش ۸۸
اخبار انجمن ۱۰۴

www.jwwse.ir

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال هشتم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲
انجمن آب و فاضلاب ایران

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

سال ۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲

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

شورای سیاستگذاری صنعت آب و فاضلاب

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

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

مهندس علی اصغر قانع: رئیس کانون 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 (همتاهای دیجیتال، فناوری تحول آفرین در مدیریت آب شهری) ۲
علی حقیقی

مقالات علمی

تصفیه فسفات زهاب‌های کشاورزی با استفاده از راکتور زیستی کاه و کلش گندم ۴
آتنا نادری، هادی رمضانی اعتدالی، عباس کاویانی، محمد بی‌جن‌خان و مجتبی اکرم

کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب با درنظر گرفتن عدم‌قطعیت متغیر فشار در گره‌ها ۱۳
مهدی دینی، غلامرضا عباس‌پور و سیده عطری ثاقبیان

بررسی عملکرد روش ترکیبی دگینگ با الگوریتم پایه درخت هوفدینگ در طبقه‌بندی کیفی آب شرب ۲۵
محمدتقی ستاری و سحر جاویدان

ارزیابی پیوند آب-انرژی در صادرات و واردات برق ایران با استفاده از رویکرد آب مجازی ۳۵
مرتضی تهامی‌پور زرندی و عرفان اسمعیل‌زاده هنجنی

بهینه‌سازی فرآیند اکسیداسیون پیشرفته رادیکال سولفاتی برای کاهش مواد آلی فاضلاب کارخانه خمیر و کاغذ با استفاده از روش سطح پاسخ ۴۷
علی طهماسبی، محمدحسین صراف‌زاده و سید بهنام غفاری

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر نانو اکسید روی و نانو اکسید مس بر مقاومت شیارشدگی و جذب آلایندگی در آسفالت متخلخل در رواناب سطحی شهری ۵۹
رامتین صبح‌خیز فومنی، طاهر رجایی و اسماعیل فاتحی‌فر

مطالب عمومی

مصاحبه (دکتر منوچهر وثوقی) ۷۰
میزگرد (نشست تخصصی چالش‌های استفاده دوباره از پساب‌های شهری در صنعت و فضای سبز) ۷۲
پایان‌نامه برتر ۸۲
معرفی کتاب ۸۷
گزارش همایش ۸۸
اخبار انجمن ۱۰۴

همتاهای دیجیتال، فناوری تحول آفرین در مدیریت آب شهری

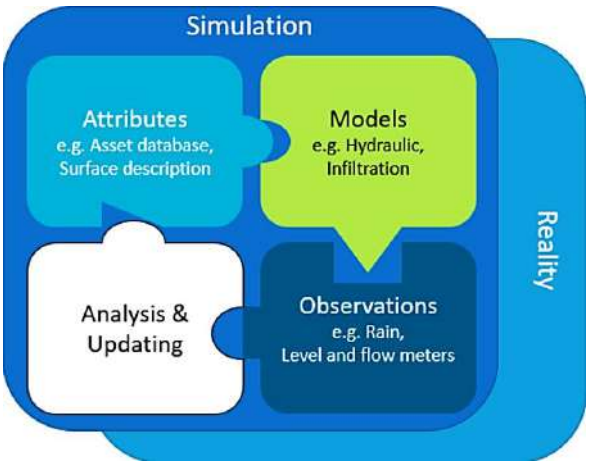
دکتر علی حقیقی
استاد دانشگاه شهید چمران اهواز و
سردبیر نشریه

امروز همه می‌دانیم که کشور عزیزمان ایران با بحران‌های آبی و محیط‌زیستی کم سابقه‌ای رو به رو است و این مهم چالش‌های پیچیده‌ای را برای مدیریت منابع آب کشور به‌وجود آورده است. کمبود آب به‌دلیل تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و مصرف بی‌رویه آب توامان با آلودگی روزافزون منابع موجود و توسعه ناپایدار کشاورزی و صنعت، معضلات بزرگی برای مدیریت منابع آب کشور ایجاد کرده است. در کنار همه اقدامات و روش‌های علمی موثر برای مقابله با این چالش‌ها، آگاهی و استفاده صحیح از فناوری‌های نوین مبتنی بر پایش مستمر و کنترل زمان واقعی (Real-time control) سیستم‌های منابع آب امری ضروری است.

مدیریت آب شهری شامل چالش‌های متعدد اما به‌هم پیوسته‌ای در زمینه تأمین، انتقال و توزیع آب، جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی و فاضلاب و تصفیه آب شرب و فاضلاب و درنهایت بازچرخانی پساب تصفیه‌شده است. اگر فقط بر مدیریت زیرساخت‌های موجود تمرکز کنیم، می‌توان گفت که فرسودگی این تأسیسات از یک‌سو و کاهش تاب‌آوری آن‌ها به‌دلیل فشارهای روزافزون از سوی دیگر، نیاز به راه‌حل‌های نوآورانه را تأکید می‌کند که می‌توانند به بهبود کارآیی، پایداری و انطباق در برابر فشارهای رو به افزایش سیستم‌های آب شهری کمک کنند و زمینه را برای تعمیر و نگهداری موثرتر آن‌ها فراهم سازند.

در سال‌های اخیر، مفهومی تحت‌عنوان همتاهای دیجیتال (Digital Twins) به‌عنوان یک فناوری امیدبخش در صنایع مختلف معرفی شده است. یک همتای دیجیتال، یک نمونه مجازی از یک سیستم فیزیکی است که از داده‌های زمان واقعی و تجزیه و تحلیل‌های پیشرفته برای شبیه‌سازی، نظارت و بهینه‌سازی عملکرد آن سیستم استفاده می‌کند. ایده اصلی همتاهای دیجیتال برای نخستین بار در دهه ۱۹۹۰ توسط David Gelernter و با انتشار کتابی به نام "آینه‌های جهان" مطرح شد. این ایده سپس در سال ۲۰۰۲ توسط Michael Grieves، در کنفرانس انجمن مهندسان ساخت و تولید در دانشگاه میشیگان تشریح و به دانشمندان و مهندسان مکانیک معرفی شد. با این‌حال، ناسا نقش مهمی در توسعه مفهوم همتاهای دیجیتال ایفا کرد، چنان‌که در سال ۲۰۱۰، John Vickers از ناسا از این فناوری برای شبیه‌سازی کپسول‌های فضایی استفاده کرد (Wikipedia). از آن‌زمان تا به امروز، این مفهوم به‌عنوان یکی از چشم‌اندازهای استراتژیک در فناوری شناخته‌شده و توسعه آن در مجموعه‌ای از برنامه‌ها و فرآیندهای صنعتی و مدیریت شهری ادامه دارد.

- توسعه یک همتای دیجیتال برای سیستم‌های آب شهری شامل ادغام شبکه‌های حسگر، تجزیه و تحلیل داده و مدل‌های محاسباتی ریاضی و هوش مصنوعی برای ایجاد یک شبیه‌سازی پویا و زمان واقعی از تمام فرایندهای هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و کیفیت آب است. این همتاهای دیجیتال فهم عمیقی از شرایط سیستم را فراهم می‌کنند و به بهره‌برداران امکان می‌دهند تا عملکرد سیستم را با جزئیات بیشتری نظارت و تجزیه و تحلیل کنند. این قابلیت در شناسایی ناکارآمدی‌ها، پیش‌بینی شکست‌ها و خطاهای سیستم و بهینه‌سازی تخصیص منابع در چرخه آب شهری بسیار ارزشمند است. هم‌چنین از دیگر مزایای توسعه همتاهای دیجیتال برای زیرساخت های آب شهری می‌توان به بهینه‌سازی بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، برنامه‌ریزی ارتقا و به‌روز رسانی مداوم سیستم، بهبود انعطاف‌پذیری، آسیب‌پذیری و اعتمادپذیری سیستم با کمک تحلیل‌های مبتنی بر داده‌های واقعی و شبیه‌سازی‌ها اشاره نمود. شکل ۱ مدل مفهومی یک همتای دیجیتال در یک سیستم آب شهری را نشان می دهد. در این شکل اجزای مختلف سیستم به‌صورت اجزای پازل تلاش می‌کنند تا واقعیت فیزیکی مسئله را بازنمایی کنند.



شکل ۱- مدل مفهومی یک همتای دیجیتال و اجزای پازل آن برای شبیه سازی سیستم آب شهری (Pedersen et al. 2021)

با این‌حال علی‌رغم رشد قابل‌توجه این فناوری و استفاده روزافزون آن در شهرهای پیشرفته جهان، هنوز مقدمات آن برای پیاده‌سازی در کشور ما چندان فراهم نیست. در حقیقت راهبرد توسعه فناوری همتاهای دیجیتال برای مدیریت آب شهری در ایران نیازمند یک سلسله اقدامات گسترده و هماهنگ است که در ادامه به اهم آن‌ها اشاره می‌شود:

- توسعه شبکه حسگرها و تجمیع داده‌ها؛
- توسعه مدل‌های محاسباتی پیشرفته برای شبیه‌سازی دقیق فرایندها در سیستم‌های آب شهری؛
- توسعه مدل‌های قابل‌اعتماد بهینه‌سازی، طبقه‌بندی و رگرسیون هوشمند مبتنی بر داده و مدل ریاضی؛
- توسعه مدل‌های پیش‌بینی بر مبنای داده‌های شهری، هواشناسی و آلودگی زمین و هوا برای تخمین مقدار و الگوی مصرف آب، آلاینده‌ها و سایر پارامترهای اثرگذار در سیستم‌های آب شهری؛
- تطبیق همتاهای دیجیتال با سیاست‌های ملی و محلی مدیریت آب؛
- ارتقای قانون‌ها و مقررات مربوط به حقوق آب و مدیریت آب شهری؛
- آموزش و فرهنگ‌سازی، ارتقای آموزش‌های فنی و علمی در زمینه توسعه و استفاده از همتاهای دیجیتال در دانشگاه‌ها و شرکت‌های آب و فاضلاب؛
- همکاری سیستماتیک میان صنایع، دولت و دانشگاه‌ها؛
- اتخاذ تدابیر امنیتی برای حفاظت از داده‌های حساس مرتبط با همتاهای دیجیتال و پیشگیری از حملات سایبری و دسترسی غیرمجاز به سیستم؛
- تخصیص منابع مالی مناسب برای توسعه و نگهداری همتاهای دیجیتال.

بدون تردید ایجاد این هماهنگی‌ها و پیش‌نیازها همکاری همه‌جانبه ارگان‌های مرتبط را می‌طلبد و در این‌میان شرکت‌های آب و فاضلاب و دانشگاه‌ها مهم‌ترین نقش را ایفا می‌کنند. در درجه اول لازم است آگاهی و احساس نیاز جدی به توسعه و به‌کارگیری همتاهای دیجیتال و فناوری‌های داده‌محور در مدیریت کلان منابع آب کشور ایجاد شود و سپس اراده و اهمیت آن همراه با حمایت‌های مالی و تشکیلاتی به بخش‌های اجرایی و تحقیقاتی مرتبط منعکس شود. با نگاه جزئی‌تر به اجزای همتاهای دیجیتال پی می‌بریم که هیچ‌کدام به تنهایی موضوع چندان جدیدی در کشور ما نیست و دانش فنی آن در دسترس است. موضوعاتی مانند توسعه مدل‌های شبیه‌سازی ریاضی، بهینه‌سازی، سیستم‌های تصمیم‌یار، هوشمندسازی ایستگاه‌های پمپاژ و مدیریت انرژی، مدل‌های هوش مصنوعی داده‌محور برای تعیین نشت و سایر اشکال آب‌های بدون‌درآمد، توسعه مدل‌های کنترل زمان واقعی در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب، داده‌کاوی و شناسایی الگوهای موجود در فرایندهای هیدرولوژی، هیدرولیک و کیفیت آب، همه موضوعاتی هستند که در دو دهه اخیر در کشور ما مطرح هستند و دست کم در سطح دانشگاه‌ها پیشرفت‌های قابل‌توجهی در این موضوعات شاهد هستیم. با این‌حال مفهوم همتای دیجیتال به‌عنوان یک فناوری یک‌پارچه‌سازی و بهره‌برداری سیستماتیک از این پیشرفت‌ها در عمل دیده نمی شود. توسعه و استقرار همتاهای دیجیتال جدا از منافع بی‌شماری که برای صنعت و مدیریت آب شهری دارد می‌تواند از پراکنده‌کاری، صرف هزینه‌های زیاد و اتلاف انرژی محققان و مهندسان مرتبط بکاهد و در عین‌حال سبب تشویق، ارتقای دانش و هم‌سویی و هم‌افزایی تحقیقات آن‌ها شود. این مهم به‌نوبه خود زمینه را برای حل مسائل پیچیده در مدیریت منابع آب کشور فراهم خواهد ساخت. در این راستا توجه به دستاوردها و تجربیات سایر کشورها بسیار رهگشا و آموزنده خواهد بود. در انتها به‌عنوان نمونه، چند کاربرد موفق از توسعه همتاهای دیجیتال در بخش‌های مختلف آب شهری در زیر ارائه می‌شود.

Henriksen, H.J., Schneider, R., Koch, J., Ondracek, M., Troldborg, L., Seidenfaden, I.K., Kragh, S.J., Bøgh, E., and Stisen, S.A., (2023), "New digital twin for climate change adaptation, water management, and disaster risk reduction (HIP digital twin)", *Water*, *15*, 25, https://doi.org/10.3390/w15010025.

Ramos, H.M., Kuriqi, A., Coronado-Hernández, O.E., López-Jiménez, P.A., and Pérez-Sánchez, M., (2023), "Are digital twins improving urban-water systems efficiency and sustainable development goals?", *Urban Water Journal*, https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2180396.

Pedersen, A.N., Borup, M., Brink-Kjær, A., Christiansen, L.E., and Mikkelsen, P.S., (2021), "Living and prototyping digital twins for urban water systems: Towards multi-purpose value creation using models and sensors", *Water*, *13*, 592. https://doi.org/10.3390/w13050592.

Pesantez, J.E., Alghamdi, F., Sabu, S., Mahinthakumar, G., and Zechman Berglund, E., (2022), "Using a digital twin to explore water infrastructure impacts during the COVID-19 pandemic", *Sustainable Cities and Society*, 77, 103520, https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103520.

Valverde-Pérez, B., Johnson, B., Wärff, C., Lumley, D., Torfs, E., Nopens, I., and Townley, L., (2021), "Digital water: Operational digital twins in the urban Water sector: Case studies", *IWA*, Available at: https://iwa-network.org/publications/operational-digital-twins-in-the-urban-water-sector-case-studies/

Walter, C., (2024), "Digital technologies for the future of the water sector? Examining the discourse on digital water", *Geoforum*, 148, 103918, https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2023.103918.

Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_twin

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 8, No. 3, PP. 4-12, Autumn 2023
DOI: 10.22112/JWWSE.2023.382425.1347

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال هشتم، شماره ۳، صفحات ۴-۱۲، پاییز ۱۴۰۲

Research Paper

Phosphate Drain Water Treatment Using Wheat Straw Bioreactors

Atena Nadery[1], Hadi Ramezani Etedali[2*], Abbas Kaviani[2], Mohammad Bijankhan[2] and Mojtaba Akram[3]
1- M.Sc., Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
2- Associate Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
3- Drainage Specialist, Tehran, Iran.
* Corresponding Author, Email: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir

Received: 21/01/2023
Revised: 07/03/2023
Accepted: 06/04/2023
© IWWA

Abstract

Proper plant nutrition plays a crucial role in enhancing the quality and quantity of agricultural products. Phosphorus, a vital nutritional element, is often in short supply, severely limiting plant growth. The growing population and the consequent demand for more food have led farmers to use phosphorus-based fertilizers to boost production. However, this practice results in an excess of phosphorus entering agricultural drains and contaminating groundwater sources. To address this issue, the use of biological reactors for treating agricultural drainage water and removing elements like phosphorus has been explored. In this study, wheat straw and stubble were chosen as the substrate and content of the bioreactor due to their cost-effectiveness and widespread availability across Iran. Three galvanized iron boxes, each 1 m in length, width, and height, were used to simulate farm conditions. Each box was equipped with an outlet and an inlet for injecting drainage water and three points for collecting wastewater. The collection points were set at depths of 1, 6 and 16 cm from the bottom of the box. The boxes were filled with compacted wheat stubble up to a height of 20 cm from the floor, weighing 39 kg. The study was conducted over 51 days with four replications, using an effluent containing approximately 14 mg of phosphate per liter. All measurements were taken on-site using a 7100 photometer. The results showed that phosphate concentration decreased over time, with a minimum reduction of 48% and a maximum reduction of 97%, indicating the bioreactor's satisfactory performance. Statistical tests such as the t-test and variance test revealed no difference in the reduction of element concentration (bioreactor performance) after 51 days of wheat straw and stubble life. The initial concentration was neutralized in this research due to the potential impact of temperature and initial concentration on the results. A covariance test was conducted to investigate the effect of temperature on the lifespan of straw and stubble, which showed no significant impact of temperature.

Keywords: Bioreactor, Phosphate Concentration, Wheat Straw and Stubble, Agricultural Drainwater.

مقاله پژوهشی

تصفیه فسفات زهاب‌های کشاورزی با استفاده از راکتور زیستی کاه و کلش گندم

آتنا نادری[۱]، هادی رمضانی اعتدالی[*۲]، عباس کاویانی[۲]، محمد بی‌جن‌خان[۲] و مجتبی اکرم[۳]
۱- کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
۳- کارشناس آزاد، متخصص زهکشی، تهران، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۷
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

تغذیه مناسب گیاه یکی از عوامل مهم در بهبود کمی و کیفی فرآورده‌های کشاورزی به‌شمار می‌رود. فسفر یکی از عناصر غذایی پر مصرف مهم است که کمبود آن رشد گیاه را به‌شدت محدود می‌کند. افزایش جمعیت و نیاز به مواد غذایی بیشتر باعث شده کشاورزان برای افزایش تولید از کودهای دارای فسفر استفاده کنند، که در نتیجه مقدار اضافی عنصر وارد زهاب‌های کشاورزی شده و منابع آب زیرزمینی را آلوده می‌کند. به‌همین منظور استفاده از راکتورهای زیستی برای تصفیه زهاب‌های کشاورزی و حذف عناصری مانند فسفر موردتوجه قرارگرفته است. در این مطالعه با توجه به هزینه‌ها و دردسترس بودن گندم در تمامی نقاط ایران، کاه و کلش گندم به‌عنوان بستر و محیط راکتور زیستی انتخاب شد. سه جعبه از جنس آهن گالوانیزه با طول، عرض و ارتفاع یک متر برای شبیه‌سازی شرایط مزرعه‌ای مورد استفاده قرارگرفت. جعبه‌ها دارای یک خروجی و یک ورودی برای تزریق پساب و سه نقطه برای برداشت پساب بودند؛ که عمق نقاط برداشت به‌ترتیب از کف جعبه ۱، ۶، ۱۶ سانتی‌متر درنظر گرفته شد. داخل جعبه‌ها با کلش گندم به‌صورت فشرده تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری از کف با وزن ۳۹ کیلوگرم پر شد. پژوهش موردنظر در مدت ۵۱ روز با چهار تکرار آزمایش با پسابی در حدود ۱۴ میلی‌گرم فسفات انجام شد. تمام اندازه‌گیری‌ها در محل آزمایش با دستگاه فتومتر ۷۱۰۰ انجام شد. نتایج این پژوهش نشان‌داد که میزان کاهش غلظت فسفات با گذشت زمان افزایش می‌یابد. میزان درصد کاهش حداقلی فسفات ۴۸ درصد بود. هم‌چنین میزان درصد کاهش حداکثری فسفات برابر ۹۷ درصد به‌دست آمد که این نتایج بیانگر عملکرد قابل‌قبول این بیوراکتور بود. نتایج حاصل از آزمون‌های آماری مانند آزمون t و آزمون واریانس بیانگر آن است که با گذشت ۵۱ روز از عمر کاه و کلش گندم هیچ تفاوتی در میزان کاهش غلظت عنصر (عملکرد راکتور زیستی) ایجاد نشده است. احتمال تاثیر دما و غلظت اولیه بر روی نتایج وجود داشت. به‌همین دلیل، در اولین گام غلظت اولیه را در این پژوهش بی اثر کرده و آزمون کوواریانس برای بررسی تاثیر دما بر طول عمر کاه و کلش انجام شد که بیانگر عدم تاثیر دما بود.

کلمات کلیدی: راکتور زیستی، غلظت فسفات، کاه و کلش گندم، زهاب کشاورزی.

۱- مقدمه

تغذیه مناسب گیاه یکی از عوامل مهم در بهبود کمی و کیفی فرآورده‌های کشاورزی به‌شمار می‌رود. در فرآیند تغذیه گیاه نه تنها هر عنصر باید به اندازه کافی در دسترس گیاه قرارگیرد بلکه ایجاد تعادل و تناسب میان همه عناصر غذایی از اهمیت زیادی برخوردار است. در دهه‌های اخیر توسعه کشورها منجر به مشکلات محیط‌زیستی در رابطه با آب از جمله کمبود منابع آب، آلودگی آب و عدم تعادل در اکولوژی آب شهری و روستایی شده است (Lopez-Ponnada et al., 2017). فسفر یکی از عناصر اصلی مورد نیاز گیاه است که در تولید محصول نقش مهمی دارد (همایی و ملکوتی، ۱۳۷۳). فسفر یکی از عناصر غذایی پر مصرف مهم است که کمبود آن رشد گیاه را به‌شدت محدود می‌کند. حلالیت فسفر در خاک کم بوده و لذا قسمت اعظم فسفر در خاک به فرم فسفات‌های نامحلول است (Rafiee and Asadi, 2010).

از طرف دیگر هنگام مصرف کودهای شیمیایی بخش قابل‌ملاحظه‌ای از فسفر به فرم ترکیب‌های نامحلول در خاک تثبیت می‌شود. لذا خاک‌های کشاورزی حاوی مقادیر زیادی از ذخایر فسفر نامحلول است. بنابراین آزادسازی فسفر از فرم‌های نامحلول و تثبیت شده موجود در خاک به‌منظور افزایش قابلیت جذب فسفر برای گیاهان زراعی از اهمیت خاصی برخوردار است. در این میان میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفات نقش بسیار مهمی در حلالیت ترکیبات نامحلول فسفر در خاک ایفا می‌کنند. انواع مختلفی از میکروارگانیسم‌های خاکزی هستند که ترکیبات نامحلول فسفر را به فرم محلول تبدیل می‌کنند. باکتری‌ها و قارچ‌ها عمده‌ترین میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفات در خاک را تشکیل می‌دهند. از انواع مهم قارچ‌های حل‌کننده فسفات نامحلول Aspergillus و Penicillium و Bacillus و Peseudomonas از انواع مهم باکتری‌های حل‌کننده فسفات هستند (Rafiee and Asadi, 2010).

حداکثر مقدار مجاز فسفات طبق موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران برای آب شرب ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر است و حداکثر مقدار مطلوب آن ۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر است. در کشاورزی اکثر کودها دارای فسفر و نیترات هستند از این‌رو تاثیر این دو بر محیط پیرامون دارای اهمیت بیشتری است (Eslami and Nemati, 2015). نیتروژن و فسفر از عناصر ضروری برای گیاهان و موجودات زنده به‌حساب می‌آیند. ورود فسفر و نیتروژن از زمین‌های کشاورزی و زهاب‌های کاملا تصفیه نشده به آب‌ها می‌تواند از منابع تهدید کننده کیفیت آب باشد (Chang et al., 2009).

فسفات از جمله ترکیبات حاوی مادهٔ مغذی فسفر است که ورود آن به محیط‌های آبی در اثر تخلیهٔ پساب‌های خام یا خوب تصفیه نشده، منجر به ایجاد مشکلات کیفیت آب از جمله پدیده تغذیه‌گرایی می‌شود. ازروش‌های مختلف حذف فسفات می‌توان به روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی اشاره کرد. در میان روش‌های شیمیایی، جذب و ترسیب شیمیایی از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و به‌صورت گسترده‌ای در زمینه حذف فسفات استفاده می‌شود.

پیش از این چنین پنداشته می‌شد که راکتورهای زیستی نقش چندانی در کاستن فسفر محلول ندارند؛ اما پژوهش‌های موسسه تحقیقاتی آب جنوب داکوتا نشان داد که در زمین‌های کشاورزی ذرات فسفر (Particulate P یا PP) نیز به‌وفور وجود دارند و خلل و فرج تراشه‌های چوب درون راکتور زیستی می‌تواند همانند مواد معلق دیگر، از عبور و وارد شدن آن‌ها به محیط آبی بکاهد. آن‌ها در مزرعه‌ای در جنوب انتاریو کانادا که به کشت سبزی اختصاص داشت و رواناب آن دارای مواد معلق زیادی بود، دست به آزمایش زدند. حوضچه رسوب‌گیر و راکتور زیستی به‌ترتیب دارای حجمی برابر ۱۲/۳ و ۱۶/۱ مترمکعب بودند. این تجهیزات در مدت هفت ماهی که کشاورزی با میانگین رواناب ۱۰/۸ مترمکعب در روز ادامه داشت، توانست ۷۱ درصد فسفر کل ورودی با میانگین ۸/۸ میلی‌گرم در لیتر و نیز ۹۹ درصد مواد معلق با غلظت ۵۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر را از میان بردارد. مقدار بسیار زیادی از این مواد در حوضچه ترسیب و مقدار کمی از آن (۶ تا ۱۶ درصد) در راکتور زیستی جذب شدند. ۰/۹۱ درصد فسفر جذب شده به صورت ذرات فسفر (PP) بود. از مقدار فسفر محلول درون رواناب که غلظت آن به ۱/۵ میلی‌گرم در لیتر می‌رسید چیزی کاسته نشد. از این‌رو می‌توان چنین نتیجه گرفت که ترکیبی از حوضچه ترسیب و راکتور زیستی می‌تواند در رواناب‌هایی که کدورت آن‌ها بالا است، نقش ارزنده‌ای در کاهش مواد معلق و ذرات فسفر چسبیده به آن داشته باشد. این پژوهش هم‌چنان نشان داد که حوضچه رسوب‌گیر نقشی بسیار بیشتر از بیوراکتور در از میان برداشتن فسفر دارد؛ زیرا بیشتر فسفر جامد به مواد معلق می‌چسبد و همراه آن جابجا می‌شود (South Dakota Water Research Institue, 2015).

Ashoori et al. (2019) کارآیی راکتور زیستی با هسته تراشه چوب را برای حذف نیترات، فلزات و مواد آلی از رواناب شهری مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که با کنترل دبی ورودی به راکتورهای زیستی می‌توان تا دهه‌ها، آلودگی‌های مختلفی را از

رواناب حذف نمود. Maxwell et al. (2020) حساسیت راکتور زیستی را به دما با افزایش عمر تراشه‌های چوب و دوره‌های خشک و مرطوب شدن راکتور را ارزیابی کردند که مشخص شد این حساسیت نسبت به متغیرهای مورد اشاره افزایش می‌یابد. مدل‌سازی و کاهش فسفر آزاد شده از پساب آبزی پروری با استفاده از راکتور زیستی توسط Sharrer et al. (2016) انجام شد. این محققین دریافتند که بدون درنظر گرفتن شرایط کیفی آب، بیشترین فسفر آزاد شده در ۲۴ ساعت ابتدایی اتفاق افتاده است.

Grenan et al. (2006) با ترکیب خاک و پوشال جو به‌عنوان فیلتر ۸۳/۵ درصد از نیترات را کاهش دادند. نتایج راکتور زیستی کاه و کلش گندم نتایج Greenan et al. (2006) را تایید می‌کند. تنها عاملی که ممکن است باعث تغییر در نتایج راکتور زیستی کاه و کلش گندم ایجاد کند زمان ماند است که در آزمایش Greenan طولانی‌تر است. هاشمی و همکاران (۱۳۹۰) با قراردادن خاک و باگاس نیشکر به‌عنوان فیلتر در کنار لوله‌های زهکش بیش از ۵۰ درصد (۶۲/۵) نیترات ورودی را کاهش دادند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در مدت ۵۱ روز هیچ تغییری بر روی کارایی کاه و کلش گندم ایجاد نشده است. تحقیقاتی که توسط Addy et al. (2016) انجام شده نشان می‌دهد در شرایطی که مقدار دما کمتر از ۳ درجه سانتی‌گراد باشد، لازم است سطح بستر بیشتری را در طراحی درنظر گرفت و بالعکس، اگر دمای بالاتر از ۱۶/۹ درجه سانتیگراد باشد بستر کوچکتری درنظر گرفته شود. احتمال اثرگذاری دما در طول آزمایش‌های اخیر نیز بررسی شد که نشان‌دهنده عدم تاثیر دما برروی کاهش فسفات است که مخالف نتایج پژوهش‌های دیگر است. چرا که متوسط دمای کمتر از ۱۶ درجه سانتیگراد را عاملی در کند شدن روند کاهش و عملکرد راکتور زیستی می‌دانستند که نتایج این پژوهش آن را رد می‌کند.

Hassanpour et al. (2017) یک بررسی سه ساله بین بیوراکتور با بستر خرده چوب و خرده چوب و بیوچار در ایالت نیویورک انجام دادند و به‌طور میانگین ۵۷ درصد نیترات را کاهش دادند. هدف از این مطالعه بررسی چگونگی عملکرد بیوراکتور در محیط بسته (بدون جریان) در مدت زمان ماند ۶ تا ۲۴ ساعت برای تصفیه نیترات با بستری از کاه وکلش گندم بود. در مطالعه Yanpeng et al. (2018)، راندمان حذف فسفر از فاضلاب مصنوعی با استفاده از بیوراکتورهای غشایی با افزودن نمک‌های مختلف آهن مورد بررسی قرارگرفت. نتایج نشان داد که پس از تثبیت پساب، آهن اضافه شده دو ظرفیتی کارآمدتر ازآهن سه ظرفیتی در حذف فسفر بود و برای تصفیه فاضلاب خانگی واقعی، غلظت خاصی از آهن دو ظرفیتی منجر به راندمان حذف فسفر بیش از ۹۹٪ شد.

در هرحال، بیوراکتورها می‌توانند دارای عوارض جانبی نیز باشند. چنان‌چه زهاب دارای سولفات بالا باشد، ممکن است گوگرد آن به سولفید هیدروژن تبدیل شود و بوی تخم مرغ گندیده ایجاد کند. در این‌صورت باید سطح آب در خروجی را پایین آورد تا آب با سرعت بیشتری گذر کند. یکی دیگر از این عوارض، این است که در چند هفته نخست، آب به رنگ چای در می‌آید. این موضوع اهمیت چندانی ندارد و به‌زودی برطرف می‌شود. چنان‌چه زهاب دارای جیوه باشد، می‌تواند به ماده متیل‌مرکوری تبدیل شود که سمّی است. این عمل تنها در موقعی روی می‌دهد که تمامی نیترات موجود در زهاب از دست رفته باشد و باکتری‌ها به این تبدیل کمک کنند. در این حالت باید زمان ماند را کاهش داد.

هدف از این تحقیق بررسی عملکرد راکتور زیستی در کاهش غلظت فسفر در زه‌آب‌های کشاورزی است. این بررسی در یک محیط بسته بدون جریان در مدت زمان ماند ۶ تا ۲۴ ساعت و در بستری از کاه و کلش گندم انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

این آزمایش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام شد. سه جعبه با جنس آهن‌گالوانیزه با طول، عرض و ارتفاع ۱ متر برای شبیه‌سازی شرایط مزرعه‌ای به آزمایشگاهی مورد استفاده قرارگرفت. جعبه‌ها دارای یک خروجی و یک ورودی برای تزریق پساب و سه نقطه برای برداشت پساب بودند؛ که عمق نقاط برداشت به‌ترتیب از کف جعبه ۱، ۶ ، ۱۶ سانتی‌متر درنظر گرفته شد.

بستر راکتور زیستی را می‌توان با مواد طبیعی گوناگونی از جمله تراشه‌های چوب، بلال ذرت، کلش گندم و جو، ذغال و کاغذ روزنامه و یا ترکیبی از آن‌ها پر کرد. هرچقدر سطح جانبی راکتور زیستی نسبت به حجم آن زیادتر باشد، باکتری‌های بیشتری می‌توانند بر روی آن زندگی کنند و کارآیی آن را افزایش دهند. از این میان کلش گندم به چند علت به عنوان بستر راکتور زیستی انتخاب شد. در دسترس بودن آن در تمام نقاط کشور و هم‌چنین قیمت ناچیز آن دو علت این انتخاب است. داخل جعبه‌ها با کلش گندم به‌صورت فشرده تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری از کف با وزن ۳۹ کیلوگرم پر شد. برای عدم ارتباط بستر راکتور زیستی با خاک روی سطح کلش‌های گندم با لایه‌ای پلاستیکی پوشانده شد و روی آن با خاکی به ارتفاع ۱۵ الی ۲۰ سانتی‌متر پر شد.

(الف) (ب)

شکل ۱- آماده سازی جعبه‌های آزمایش: الف) موقعیت مخازن تزریق زهاب؛ ب) پر کردن و متراکم کردن کاه و کلش گندم

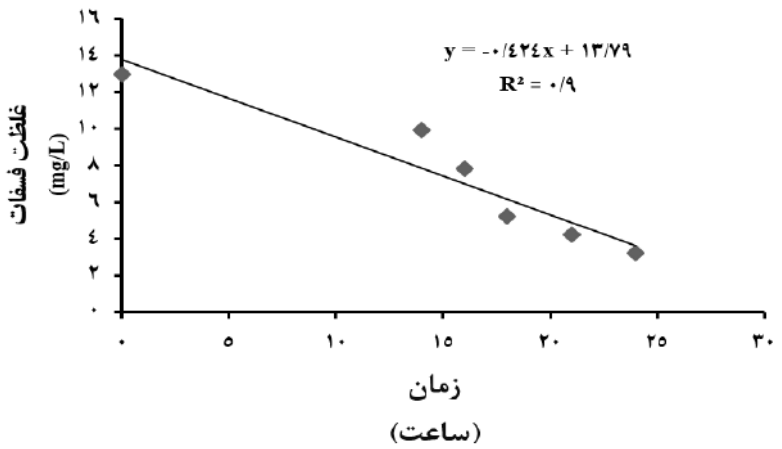
بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد غلظت فسفات در زه‌آب‌های کشاورزی بیش از ۲۰ میلی‌گرم در لیتر است. با توجه به غلظت‌های گزارش شده فسفات در گزارش‌های مختلف، با استفاده از کود کامل (NPK) پساب (مصنوعی فسفات) مورد نیاز با غلظت بیشتری برای آزمایش تهیه شد. هرکدام از جعبه‌های آزمایش به ۲۰۰ مترمکعب پساب برای پر شدن نیاز دارند. این حجم از پساب مصنوعی در دو مخزن ۳۰۰ لیتری برای تامین پساب مورد نیاز آماده شد. راکتورهای زیستی می‌توانند یکباره پُر و یک‌باره خالی شوند و یا این‌که در آن‌ها جریان دائمی وجود داشته باشد. به‌علت محدودیت اجرا، امکان ایجاد جریان ناچیز وجود نداشت. به‌همین علت در این مطالعه راکتورهای زیستی یکباره با پساب پر شدند. پساب از پایین جعبه‌ها به داخل آن تزریق شد. با استفاده از لوله‌های پیزومتری تعبیه شده عمق پساب داخل جعبه‌ها بررسی شد. آزمایش‌ها در چهار مرحله به‌ترتیب در تاریخ‌های ۱۸ شهریور، ۲۷ شهریور، ۳ آبان و آزمایش آخر در ۵ آبان ماه انجام شد.

در هر نوبت نمونه برداری دمای خاک سطحی راکتور زیستی و دمای پساب‌ها براساس درجه سانتی‌گراد با استفاده از دماسنج مدادی اندازه‌گیری شد. از این‌طریق تاثیر دما بر میزان عملکرد بیوراکتور بررسی شد. از هر جعبه آزمایش در هر روز آزمایش هر سه ساعت یک بار، یک نمونه برای اندازگیری فسفات برداشته شد. زمان‌های برداشت نمونه‌ها برای آزمایش اول ۱۴ و ۱۷ ساعت و آزمایش دوم ۶، ۱۰ و ۱۲ ساعت پس از اولین تزریق زهاب به سامانه بود. زمان‌های برداشت نمونه برای آزمایش سوم ۶، ۱۰ و ۱۲ ساعت و آزمایش چهارم ۱۵، ۱۸ و ۲۴ ساعت پس از اولین تزریق زهاب به سامانه بود. از بین داده‌های نمونه برداری شده با توجه به پژوهش‌های انجام شده و به‌صورت تصادفی از هر مرحله آزمایش چند ساعت برای بررسی انتخاب شد. مدت زمان تمام آزمایش‌ها از روز اول ۵۲ روز بود. برای اندازه‌گیری عناصر از روش فتومتری استفاده شد. دلیل انتخاب این روش ارزان‌تر و در دسترس‌تر بودن آن است.

آزمایش فسفات سطح بالا (HR) پالین تست[1] براساس روش وانادامولیبدات انجام می‌شود. مزیت عمده روش پالین تست جمع‌آوری تمام معرف‌های مورد نیاز به‌صورت یک قرص است. آزمایش به آسانی با افزودن یک قرص به نمونه آب انجام می‌شود. از قرص SR می‌توان برای حذف مزاحمت سیلیس استفاده نمود. در این روش فسفات در حضور آمونیوم وانادات با مولیبدن آمونیوم واکنش داده و ترکیب حاصله (phosphovanadomolybdate) به رنگ زرد است. شدت رنگ تولید شده با غلظت فسفات متناسب است و با فتومتر پالین تست اندازه‌گیری می‌شود. دستگاه فتومتر ۷۱۰۰ توانایی اندازه‌گیری بیش از ده نوع عنصر و ترکیب از جمله فسفات را دارد (Mokarram et al., 2013). با استفاده از دستگاه فتومتر ۷۱۰۰ فسفات پساب‌های خروجی از بیوراکتور اندازگیری شد. نتایج برداشت از سه جعبه در هر ساعت به‌طور میانگین ثبت شد.

۳- نتایج

آزمون واریانس برای مدت آزمایش‌های اول و دوم به‌عنوان داده مستقل و غلظت فسفات به‌عنوان داده وابسته انجام شد. مقدار معنی‌داری در واریانس فرض H_1 را تایید می‌کند که بیانگر اختلاف (تاثیر) بین دو فاکتور اندازه‌گیری شده است (جدول‌های ۱ و ۲). شکل‌های ۲ و ۳ تغییرات غلظت فسفات در طول آزمایش‌های اول و دوم را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده بیان می‌کند که رابطه معکوس بین مدت زمان و غلظت فسفات وجود دارد. هرچه زمان بیشتری از ابتدای آزمایش گذشته باشد، مقدار غلظت فسفات کاهش می‌یابد.

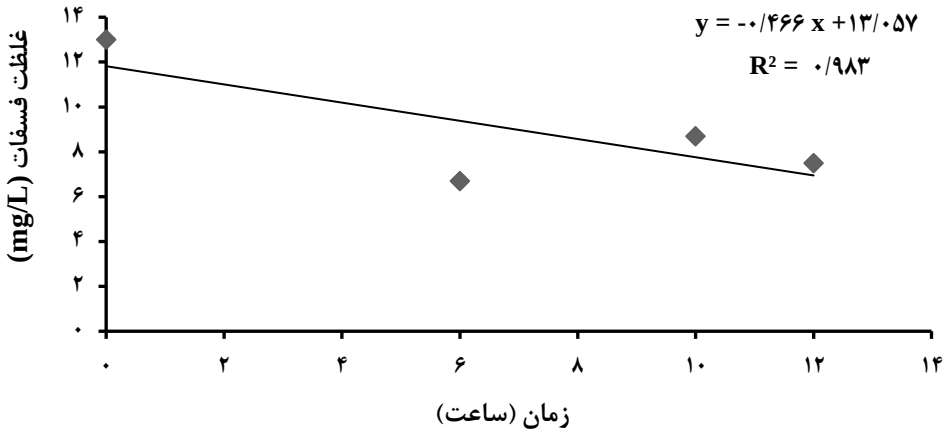


شکل ۲- غلظت فسفات (میلی‌گرم بر لیتر) درطول آزمایش اول نسبت به زمان (ساعت) از زمان تزریق پساب

جدول ۱- تحلیل واریانس برای تغییرات غلظت فسفات درطول مدت آزمایش اول

فسفات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
رگرسیون	۶۳/۲۸۸	۱	۶۳/۲۸۸	۳۶/۱۶۳^{ns}
ارقام	۷	۴	۱/۷۵	
کل	۷۰/۲۸۸	۵		

ns: عدم معناداری در تغییرات غلظت فسفات در آزمایش اول درسطح ۹۵ درصد



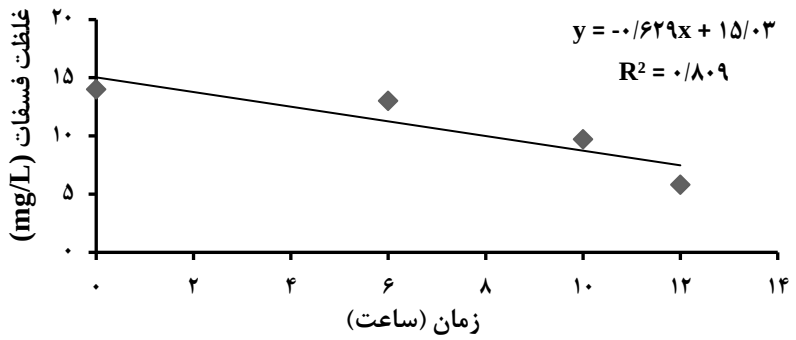
شکل ۳- غلظت فسفات (میلی‌گرم بر لیتر) درطول آزمایش دوم نسبت به زمان (ساعت) از زمان تزریق پساب

جدول ۲- تحلیل واریانس برای تغییرات غلظت فسفات در طول مدت آزمایش دوم

فسفات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
رگرسیون	۳۱/۵۷	۱	۳۱/۵۷	۵۶/۷۳^{ns}
ارقام	۱/۱۱۳	۲	۰/۵۶	
کل	۳۲/۶۹	۳		

ns: عدم معناداری در تغییرات غلظت فسفات در آزمایش دوم درسطح ۹۵ درصد

آزمون واریانس برای مدت آزمایش سوم به‌عنوان داده مستقل و غلظت فسفات به‌عنوان داده وابسته انجام شد. مقدار معنی‌داری در واریانس فرض H_0 را تایید می‌کند که بیانگر عدم اختلاف (تاثیر) بین دو فاکتور اندازه‌گیری شده است (جدول ۳). تغییرات غلظت فسفات در طول آزمایش سوم (شکل ۴) بیان می‌کند که هیچ رابطه‌ای بین مدت زمان و غلظت فسفات وجود ندارد. علت این نتیجه می‌تواند خطای اندازه‌گیری باشد که توسط اپراتور انجام شده است، یا تاثیر غلظت اولیه روی این آزمایش باشد یا تاثیر دما برروی نتایج است که با آزمون‌های بیشتر و آزمون‌های آماری دیگر می‌توان به‌علت آن پی‌برد.



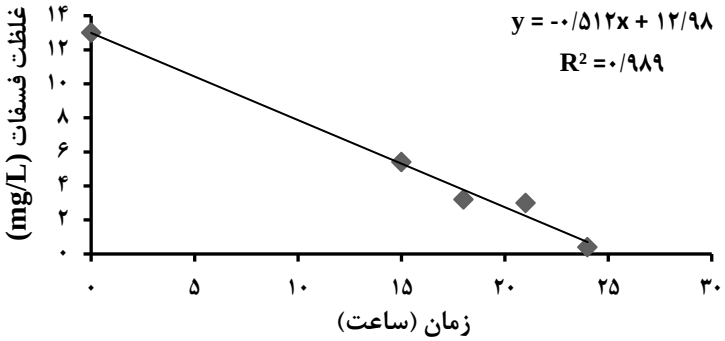
شکل ۴- غلظت فسفات n (میلی‌گرم بر لیتر) درطول آزمایش سوم نسبت به زمان (ساعت) از زمان تزریق پساب

جدول ۳- تحلیل واریانس برای تغییرات غلظت فسفات درطول مدت آزمایش سوم

فسفات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مریعات	F
رگرسیون	۳۳/۳۱۴	۱	۳۳/۳۱۴	۸/۴۸^{ns}
ارقام	۷/۸۵۳	۲	۳/۹۳	
کل	۴۱/۱۶۸	۳		

ns: عدم معناداری در تغییرات غلظت فسفات در آزمایش سوم درسطح ۹۵ درصد

در شکل ۵ مشاهد می‌شود که تغییرات غلظت فسفات در طول آزمایش چهارم همانند آزمایش‌های اول و دوم است و رابطه معکوس بین مدت زمان و غلظت فسفات را نشان می‌دهد. هرچه زمان بیشتری از ابتدای آزمایش گذشته باشد، مقدار غلظت فسفات کاهش می‌یابد. آزمون واریانس برای مدت آزمایش به‌عنوان داده مستقل و غلظت فسفات به‌عنوان داده وابسته انجام شد. مقدار معنی‌داری در واریانس فرض H_1 را تایید می‌کند که بیانگر اختلاف (تاثیر) بین دو فاکتور اندازه‌گیری شده است (جدول ۴).



شکل ۵- غلظت فسفات (میلی‌گرم بر لیتر) درطول آزمایش چهارم نسبت به زمان (ساعت) از زمان تزریق پساب

جدول ۴- تحلیل واریانس برای تغییرات غلظت فسفات درطول مدت آزمایش چهارم

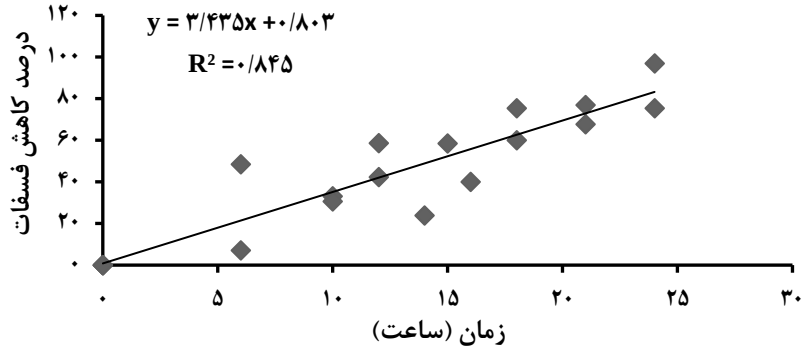
فسفات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مریعات	F
رگرسیون	۹۱/۵۵	۱	۹۱/۵۵	۲۷۲/۰۷۱^{ns}
ارقام	۱/۰۱	۳	۰/۳۳۶	
کل	۹۲/۵۶	۴		

ns: عدم معناداری در تغییرات غلظت فسفات در آزمایش چهارم درسطح ۹۵ درصد

برای بررسی عملکرد بیوراکتور (شکل۶) با محاسبه درصد حذف آلاینده‌های موردنظر در هر آزمایش و به‌علت داشتن کمی تفاوت در غلظت‌های اولیه، تاثیر غلظت اولیه حذف شد. در آزمایش اول ۷۵٪ فسفات، در تکرار دوم ۴۸٪ فسفات، در تکرار سوم ۵۸٪ فسفات و در تکرار چهارم ۹۷٪ فسفات تزریق شده به پساب به‌وسیله بیوراکتور تصفیه شد.

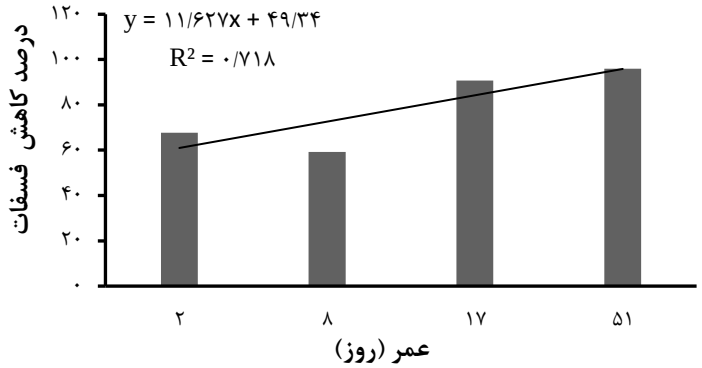
برای بررسی عمر کاه و کلش گندم در تصفیه پساب حاوی PO_4 از آزمون T زوجی یا آزمون T وابسته، یک بار روی نتایج

نمونه برداری‌ها و در مرحله بعد روی همان نتایج بدون درنظر گرفتن غلظت اولیه در هر آزمایش انجام شد. مقدار sig در آزمون t که برای نتایج مستقیم از نمونه‌برداری برابر ۰/۵۲۲، ۰/۴۸۷، ۰/۲۲ به‌دست آمد، بیانگر آن است که نتایج در سطح ۹۵٪ معنی‌دار نیست. نتایج کلی از مقدار sig آزمون t بیان می‌کند که با گذشت عمر کاه و کلش گندم تفاوتی در توانایی آن در حذف فسفات ایجاد نمی‌شود و یا این تفاوت بسیار ناچیز خواهد بود. برای بررسی بیشتر از آزمون تحلیل واریانس نیز استفاده شد. نتایج آزمون لوین[۲] حاکی از آن است که واریانس درون گروهی تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارد. لذا استفاده از آزمون تحلیل واریانس مجاز است. نتایج حاصل از آزمون تحلیل واریانس (جدول آنووا[۳]) نیز با مقدار معنی داری ۰/۳۴۶ و مقدار آماره F برابر ۱/۶۴ نتایج حاصل از آزمون t انجام شده را تایید می‌کند. با توجه به شکل ۷ می‌توان گفت افزایش عمر برروی کاهش درصد فسفات اثرگذار نبوده است.



شکل ۶- درصد کاهش غلظت فسفات در طول آزمایش‌ها

شکل ۸ داده‌های مربوط به ۲۴ ساعت پس از آزمایش هستند که با توجه به آن می‌توان گفت افزایش یا کاهش دما بر کاهش درصد فسفات اثرگذار نبوده است. به‌منظور اطمینان از این مسئله آزمون کوواریانس و واریانس برروی داده‌ها انجام شد. نتایج بیانگر تاثیر نداشتن طول عمر و دما بر روی کاهش درصد فسفات است. به‌طور کلی کاه و کلش در بازه ۵۱ روزی که از عمر آن می‌گذرد هیچ تفاوت قابل مشاهده‌ای در تصفیه فسفات نداشته است. این به معنای عدم تغییر توانایی بیوراکتور در زمان‌های طولانی‌تر نیست، بلکه فقط می‌توان برای بازه زمانی ۵۱ روز این آزمایش این نتایج را پذیرفت.

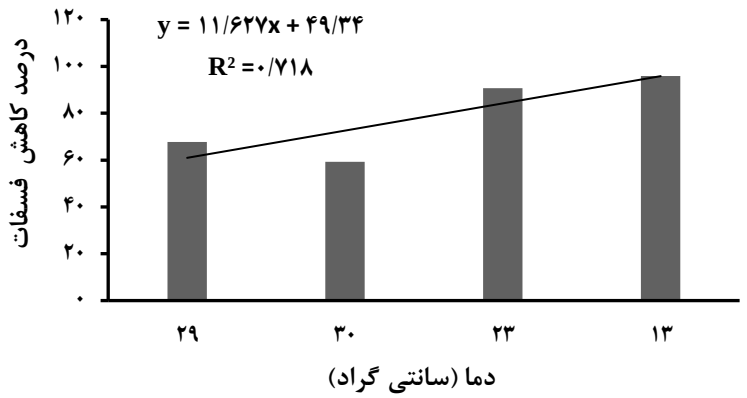


شکل ۷- درصد کاهش غلظت فسفات با گذشت عمر بیوراکتور در ۲۴ ساعت بعد از آزمایش

جدول ۵- تحلیل واریانس برای درصدکاهش غلظت فسفات با گذشت عمر بیوراکتور در ۲۴ ساعت بعد از آزمایش

فسفات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
رگرسیون	۶۰۱/۷۳۵	۱	۶۰۱/۷۳۵	۳/۵۵۳*
ارقام	۳۳۸/۷۰۲	۲	۱۶۹/۳۵۱	
کل	۹۴۰/۴۳۷	۳		

* عدم معناداری در تغییرات غلظت فسفات با گذشت عمر بیوراکتور در ۲۴ ساعت بعد از آزمایش درسطح ۹۵ درصد



شکل ۸- درصدکاهش غلظت فسفات با دما در ۲۴ ساعت بعد از آزمایش

جدول ۶- تحلیل واریانس برای درصد کاهش غلظت فسفات با دما در ۲۴ ساعت بعد از آزمایش

فسفات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
رگرسیون	۷۶۵/۹۲۷	۱	۷۶۵/۹۲۷	۸/۷۷۸*
ارقام	۱۷۴/۵۱۱	۲	۸۷/۲۵۵	
کل	۹۴۰/۴۳۷	۳		

* عدم معناداری در تغییرات غلظت فسفات با دما در ۲۴ ساعت بعد از آزمایش درسطح ۹۵ درصد

۴- نتیجه‌گیری

برای بررسی تاثیر و عملکرد راکتور زیستی در محیط آزمایشگاهی بدون جریان، چهار آزمایش در مدت ۵۱ روز انجام شد. آزمایش‌ها شامل اندازه‌گیری زهاب فسفات حاصل از راکتور زیستی با استفاده از دستگاه فتومتر موجود درآزمایشگاه آب گروه آب دانشکده فنی مهندسی انجام شد. هم‌چنین به‌طور هم‌زمان دما نیز با استفاده از دماسنج اندازه‌گیری شد. با توجه به آزمون‌های آماری انجام شده بر روی هریک از آزمایش‌ها به‌طور جداگانه برای حذف فسفات این نتیجه حاصل شد که با گذشت زمان از میزان غلظت اولیه فسفات کاسته می‌شود که بیانگر رابطه مستقیم میان درصد کاهش فسفات با زمان است. هرچه زمان از ابتدای آزمایش بگذرد میزان درصد کاهش فسفات افزایش می‌یابد. نکته مهم در مورد شیب، کاهش کم در شش ساعت اولیه از گذشت آزمایش است. حداکثر زمان توصیه شده برای ماند پساب با توجه به فعل و انفعالات درون محیط بی‌هوازی راکتور زیستی ۲۴ ساعت است که در تمام این آزمایش‌ها رعایت شده است.

مسئله بعدی که مورد توجه است تغییر اثر کاه و کلش گندم در تصفیه پساب‌ها پس از گذشت زمان است که در مراجع در بهترین حالت ۲۰ سال ذکر شده است. در پژوهش انجام شده توسط صادقی و همکاران (۱۴۰۱) بر روی زهاب طبیعی خروجی از زهکش‌های مزارع جنوب خوزستان با هدف بررسی استفاده از زئولیت کلینوپتیلولیت به‌عنوان جاذب در حذف آلاینده‌هایی از جمله نیترات و فسفات در شرایط pH برابر پنج، زمان ماند برابر ۹۰ دقیقه و دمای محیط برابر ۵۰ درجه سانتیگراد درنظر گرفته شده بود. بازدهی حذف نیترات و فسفات به‌ترتیب ۶۳ و ۳۹ درصد به‌دست آمد. نادری و همکاران (۱۳۹۹) از بیو راکتور برای حذف نیترات از زهاب کشاورزی استفاده کرده و مشاهده کردند که غلظت نیترات با گذشت زمان بین ۶ تا ۲۴ ساعت پس از تزریق زهاب بین ۵۴ تا ۱۰۰ درصد کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده بیان می‌کند که در طول ۶ الی ۲۴ ساعت در آزمایش اول ۷۵٪ فسفات، در تکرار دوم ۴۸٪ فسفات، در تکرار سوم ۵۸٪ فسفات و در تکرار چهارم ۹۷٪ فسفات تزریق شده به پساب به‌وسیله راکتور زیستی تصفیه شد. نتایج کلی حاصل بیان می‌کند که راکتور زیستی در طول ۶ الی ۲۴ ساعت حداقل ۴۸٪ و حداکثر ۹۷٪ از فسفات ورودی را کاهش داده است. این نتایج بیانگر عملکرد قابل‌قبول راکتور زیستی درحذف فسفات از پساب‌ها است. با توجه به تمامی نتایج حاصل می‌توان استفاده و بررسی‌های بیشتر در ارتباط با حذف دیگر عناصر را نیز در محیط آزمایشگاهی توصیه نمود. هم‌چنین انجام تمام این بررسی‌ها در محیط واقعی نیز می‌تواند نتایج بیشتری را در خصوص راکتورهای زیستی در اختیار محققین قرار دهند.

۵- پی‌نوشتها

1- palintest
2- Levene’s test
3- ANOVA

۶- مراجع

صادقی، س.، الباحی، م.، گلابی، م.، و برومند نسب، س.، (۱۴۰۱)، "بررسی استفاده از زئولیت طبیعی کلینوپتیلولیت اصلاح‌شده در حذف نیترات، فسفات و شوری از زهاب کشاورزی در مدل زهکشی آزمایشگاهی"، *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۵(۱)، ۱۳۱-۱۵۲، https://doi.org/10.22055/JISE.2021.35721.1935.

نادری، آ.، رمضانی اعتدالی، ه.، اکرم، م.، و بی‌جن خان، م.، (۱۳۹۹)، "تصفیه نیترات زهاب‌های کشاورزی با استفاده از بیوراکتور"، *محیط‌زیست طبیعی*، ۷۳(۳)، ۶۱۳-۶۲۴.

هاشمی، ا.، حیدرپور، م.، و مصطفی‌زاده، ب.، (۱۳۹۰)، "بررسی میزان حذف نیترات در دو حالت قرارگیری فیلترهای زیستی در سیستم‌های زه‌کشی زیرزمینی"، *مجله علوم و مهندسی آبیاری*. ۳۴(۲)، ۷۱-۸۲.

همایی، م.، و ملکوتی، م.، (۱۳۷۳)، "حاصل‌خیزی خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک، مشکلات و راه‌حل‌ها"، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، ۴۹۴ صفحه.

Addy, K., Gold, A.J., Christianson, L.E., David, M.B., Schipper, L.A., and Ratigan, N.A., (2016), "Denitrifying bioreactors for nitrate removal: A meta-analysis", *Journal of Environment Quality*, 45(3), 873-881, https://doi.org/10.2134/jeq2015.07.0399.

Ashoori, N., Teixido, M., Spahr, S., Lefebvre, G.H., Sedlak, D.L., and Luthy, R.G., (2019), "Evaluation of pilot-scale biochar-amended woodchip bioreactors to remove nitrate, metals, and trace organic contaminants from urban storm water runoff", *Water Research*, 154, 1-11, https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.040.

Chang, H., Yang, X., and Fang, H., (2006), "In situ nitrogen removal from the eutrophic water by microbial plant intergrated system", *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 7, 521-531.

Dixit, R., Malaviya, D., Pandiyan, K., Singh, U.B., Sahu, A., Shukla, R., and Paul, D., (2015), "Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: An overview of principles and criteria of fundamental processes", Sustainability, 7(2), 2189-2212, https://doi.org/10.3390/su7022189.

Eslami, A., and Nemati, R., (2015), "Removal of heavy metal from aqueous environments using bioremediation technology_review", *Journal of Health in the Field*, 2(3), 43-51.

Greenan, C.M., Moorman, T.B., Kaspar, T.C., Parkin, T.B., and Jaynes, D.B., (2006), "Comparing carbon substrates for denitrification of subsurface drainage water", *Journal of enviremental quality*, 35(3), 824-829, https://doi.org/10.2134/jeq2005.0247.

Hassanpour, B., Giri, S., Pluer, W., Steenhuis T., and Geohiring, L. (2017), "Seasonal performance of denitrifying bioreactors in the Northeastern United States: Field trials", *Journal of Environmental Management*, 202(1), 242-253, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.054.

Kellman, L.M., (2005), "A study of tile drain nitrate -15N values as a tool for assessing nitrate sources in an agricultural region", *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 71(2), 131-137.

Lopez-Ponnada, E.V., Lynn, T.J., Peterson, M., Ergas, S.J., and Mihelcic, J.R., (2017), "Application of denitrifying wood chip bioreactors for management of residential non-point sources of nitrogen", *Journal of Biological Engineering*, 11(1), 16, https://doi.org/10.1186/s13036-017-0057-4.

Maxwell, B.M., Díaz-García, C., Martinez-Sánchez, J.J., Brigand, F., and Álvarez-Rogel, J., (2020), "Temperature sensitivity of nitrate removal in woodchip bioreactors increases with woodchip age and following drying–rewetting cycles", *Environmental Science: Water Research and Technology*, 6(10), 2752-2765.

Mokarram, P., Jaberi, H., Khoshdel, Z., Miladpour, B., Ramezani, F., Fahmideh, M.A., and Movahedi, B., (2013), "Comparing the atomic absorption spectrophotometery and photometery", *Iranian Standardization Elements Congress of Kashan University of Medical Sciences*, 16, 705-706.

Rafiee, S., and Asadi Rahmani, H., (2010), "Isolation and identification of the different species of flavobacterium from the rhizosphere of wheat cultivated in the different regions of Iran", *Journal of Water and Soil*, 24(2), https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.3242.

Sharrer, K.L., Christianson, L.E., Lepine, C., and Summerfelt, S.T., (2016), "Modeling and mitigation of denitrification 'woodchip 'bioreactor phosphorus releases during treatment of aquaculture wastewater", *Ecological Engineering*, 93, 135-143, https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.05.019.

South Dakota Water Research Institute, (2015), *Annual Technical Report FY 2015*, The College of Agricultural and Biological Sciences at South Dakota State University, USA.

Yanpeng, M., Chao, X., Qinyan, Y., Wenlong, W., and Zhanlong, S., (2018), "Fate and distribution of phosphorus in laboratory-scale membrane bioreactors", *Chemical Engineering Research and Design*, 133(5), 204-209. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.03.011.

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. 8, No. 3, PP. 13-24, Autumn 2023
DOI: 10.22112/JWWSE.2023.350090.1320

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال هشتم، شماره ۳، صفحات ۱۳-۲۴، پاییز ۱۴۰۲

Research Paper

Calibration of Water Distribution Networks by Considering the Uncertainty of Nodal Pressure

Mehdi Dini[1]*, Gholamreza Abbaspoor[2] and Seyyedeh Atra Saghebian[2]
1- Associate Professor, Civil Engineering Department, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.
2- M.Sc., Faculty of Engineering, Shahid Madani University of Azerbaijan, Tabriz, Iran.
* Corresponding Author, Email: m.dini@azaruniv.ac.ir

Received: 04/07/2022
Revised: 09/12/2022
Accepted: 16/03/2023
© IWWA

Abstract

Given that, observational data have different uncertainties, the calibration of water distribution networks based on a definite value can affect the results of the calibrated model. In this research, the calibration of water distribution networks by considering the uncertainty of nodal pressure has been investigated. For this purpose, first, by generating a series of nodal pressure data using the Monte Carlo method, the Hazen-Williams coefficients of the network have been obtained. Then, by producing a series of Hazen-Williams coefficients, the nodal pressure values have been calculated and the results of the two pressures have been compared. The calibration model was performed using the particle swarm optimization algorithm by linking the EPANET simulator in MATLAB. The proposed method has been implemented on the two-loop sample network and real water distribution network of Sufian city. The results show that the application of node pressure uncertainty in network nodes leads to multiple sets of solutions for Hazen-Williams coefficients of pipes with different variation ranges and standard deviations, which according to the average absolute error of 4 and 3.8 percent between the average nodal pressure in the sample and the real network in the non-deterministic mode with the deterministic mode, the proposed method, can be a more accurate method for calibrating networks. However, it should be noted that there are challenges in the modeling and execution time of calibration models.

Keywords: Water Distribution Network, Hazen–Williams Coefficient, Calibration, Uncertainty, Nodal Pressure.

مقاله پژوهشی

کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب با درنظر گرفتن عدم‌قطعیت متغیر فشار در گره‌ها

مهدی دینی[1*]، غلامرضا عباس‌پور[2] و سیده عطری ثاقبیان[2]
۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.
۲- فارغ‌التحصیل کارشناسی‌ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: m.dini@azaruniv.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۳
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۱/۰۹/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۵
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

با توجه به این‌که داده‌های مشاهداتی دارای عدم‌قطعیت‌های مختلف هستند، کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب براساس یک مقدار قطعی می‌تواند، نتایج مدل کالیبره شده را تحت‌تاثیر قراردهد. در این تحقیق، کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب با درنظر گرفتن عدم‌قطعیت مقادیر فشار در گره‌های شبکه بررسی می‌شود. برای این‌منظور سری داده‌های فشار به‌روش مونت‌کارلو برای گره‌های شبکه تولید و ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه براساس این مقادیر به‌دست آمده و با تولید سری ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه، مقادیر فشار محاسباتی در گره‌های شبکه محاسبه و نتایج دو فشار مقایسه شده است. کالیبراسیون مدل شبکه با الگوریتم دسته ذرات در لینک با مدل EPANET در محیط MATLAB انجام شده است. روش پیشنهادی بر روی شبکه نمونه دوحلقه‌ای و شبکه توزیع آب شهر صوفیان پیاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اعمال عدم‌قطعیت فشارگرهی، منجر به مجموعه جواب‌های متعدد برای ضرایب هیزن-ویلیامز با دامنه تغییرات و انحراف معیار متفاوت می‌شود که با توجه به متوسط خطای مطلق ۴ و ۳/۸ درصدی بین میانگین فشار گرهی در شبکه نمونه و شبکه واقعی در حالت غیرقطعی با حالت قطعی، روش پیشنهادی می‌تواند روش دقیق‌تری برای کالیبراسیون شبکه‌ها باشد، با این وجود چالش‌هایی در مدل‌سازی و زمان اجرای مدل‌های کالیبراسیون وجود دارد.

کلمات کلیدی: شبکه توزیع آب، ضریب هیزن-ویلیامز، کالیبراسیون، عدم‌قطعیت، فشار گرهی.

۱- مقدمه

از موضوعات بسیار مهم در مدل‌سازی، تطبیق نتایج حاصل از مدل‌سازی با وضعیت واقعی سیستم است. برای دستیابی به این هدف لازم است مدل توسط داده‌های میدانی کالیبره شود. کالیبراسیون در تعریف، عبارت است از تنظیم پارامترهای مدل به‌گونه‌ای که مقادیر مشاهده‌ای با مقادیر محاسبه‌ای تا حد امکان تطابق داشته باشند. پارامترهای مدل شبکه توزیع آب شامل مشخصه‌های فیزیکی و بهره‌برداری مدل است که عمدتاً شامل ضرایب زبری لوله‌ها و نیاز آبی گره‌ها هستند. مقادیر مشاهده‌ای یا محاسبه‌ای نیز عمدتاً شامل فشار گرهی، تراز تانک‌ها و مقدار جریان در لوله‌ها است. برای کالیبراسیون دقیق یک مدل شبیه‌ساز دقت در مکان و زمان نمونه‌برداری و عدم‌قطعیت داده‌ها بسیار مهم است. در این ارتباط در برخی تحقیقات تنظیم پارامترهای مدل در چهار وضعیت، مصرف میانگین، حداکثر، حداقل و شرایط جریان آتش‌نشانی بررسی شده که در آن بهترین نتایج کالیبراسیون براساس شرایط جریان آتش‌نشانی به‌دست آمده است (Tabesh et al., 2010; 2011).

به‌طور کلی در مسائل واقعی برای تحلیل حالات خارج از عملکرد نرمال شبکه، لازم است رفتار این شبکه‌ها در بازه‌ای از حالات ممکن در زمان بهره‌برداری مورد مطالعه و بررسی قرارگیرد تا با توجه به نتایج، بتوان از سیستم به‌گونه‌ای بهره‌برداری کرد که ضمن برآورده کردن مطلوب نیازها، از ایجاد اثرات مخرب به‌هنگام وقوع برخی از حالات بحرانی جلوگیری کرد. در این ارتباط اعمال عدم‌قطعیت‌های موجود در داده‌ها و پارامترهای مدل شبکه در بررسی حالات ممکن بهره‌برداری موثر است. در رابطه با بررسی عدم‌قطعیت مدل‌ها تحقیقات زیادی انجام شده است.

سیف‌اللهی و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیقی که به‌روش مونت‌کارلو و با بررسی تاثیر توأم عدم‌قطعیت در نیاز گره‌ها و زبری لوله‌ها در یک شبکه آب دوحلقه‌ای انجام شد نشان دادند که چنین شبکه‌ای تنها در ۱۰ سال اول از ۳۰ سال دوره بهره‌برداری، قادر به ارائه سرویس و تامین تقاضا با فشار مورد نیاز است، درحالی‌که در حالت قطعی‌بودن متغیرهای فوق، در طول کل دوره بهره‌برداری، قادر به ارائه سرویس و تامین تقاضا بوده است. هم‌چنین با افزایش درصدی از عدم‌قطعیت در هر متغیر به‌طور جداگانه، کارایی شبکه با درصد بیشتری کاهش می‌یابد. دینی و تابش (۱۳۹۲) مسئله کالیبراسیون هیدرولیکی شبکه نمونه دوحلقه‌ای را در دو حالت، اعمال و بدون اعمال عدم‌قطعیت داده‌ها بررسی کردند. نتایج نشان‌داد که در کالیبراسیون یک مدل شبیه‌ساز با دقت یکسان، حداقل نقاط نمونه‌برداری از نظر مکانی و زمانی، بسیار وابسته به عدم‌قطعیت داده‌ها است و با اعمال عدم‌قطعیت داده‌ها، تعداد نقاط نمونه‌برداری موردنیاز، به‌شدت افزایش می‌یابد.

دینی و همکاران (۱۴۰۰) در تحقیقی، پهنه‌بندی احتمالاتی کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب با اعمال عدم‌قطعیت هم‌زمان چند پارامتر را بررسی کردند. برای این‌منظور ابتدا مقادیر قطعی پارامترها در سال‌های مختلف مدل‌سازی و سپس با استفاده از توزیع نرمال برای ضرایب هیزن-ویلیامز لوله‌ها، و مصارف گره‌ها و توزیع یکنواخت برای قطر لوله‌ها، مقادیر غیرقطعی آن‌ها را برآورد کردند. در نهایت، مقادیر غیرقطعی به مدل شبیه‌ساز شبکه اعمال شد. مدل‌سازی عدم‌قطعیت پارامترها با روش مونت‌کارلو در دو حالت ضریب تغییرات ۲۰ و ۴۰ درصد و کارایی هیدرولیکی شبکه با ارزیابی شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه انجام شد. روش پیشنهادی، بر روی شبکه توزیع آب کلیبر پیاده‌سازی شد که نتایج به‌دست آمده نشان‌داد که در هر دو حالت، بالاترین سطح عملکرد شبکه با احتمال وقوع زیاد در سال‌های اولیه دوره طرح در ساعت‌های حداکثر مصرف و در سال‌های انتهای دوره طرح در ساعت‌های متوسط مصرف اتفاق می‌افتد. هم‌چنین روند تغییرات سالانه سطوح عملکرد شبکه بیانگر این است که بهترین سرویس‌دهی شبکه با ضریب تغییرات ۱۰ درصد، در سال ۲۳ با احتمال ۵۵ درصد و با ضریب تغییرات ۲۰ درصد، در سال ۲۰ با احتمال ۴۶ درصد اتفاق می‌افتد.

Kang et al. (2009) روش مونت‌کارلو را برای پیش‌بینی عدم‌قطعیت مدل در شرایط تقاضاهای ناپایدار را بررسی کردند. هدف تحقیق، ارزیابی طرح‌های تقریبی جایگزین و بررسی توانایی آن‌ها در پیش‌بینی عدم‌قطعیت مدل با تلاش محاسباتی کم‌تر بود که در آن، از روش‌های تخمین نقطه‌ای، روش ممان دوم مرتبه اول و یک روش شبیه‌سازی، نمونه‌گیری به‌صورت مقایسه‌ای استفاده شده است. پارامترهای ورودی مدل شامل قطر و ضریب زبری لوله، تقاضای مکانی و زمانی گره‌ها و ضرایب زوال حجمی و دیواره لوله و متغیرهای خروجی مدل شامل فشار گرهی، سن آب و غلظت کلر هستند. برای بررسی تاثیر مقدار عدم‌قطعیت ورودی بر خروجی مدل، سه سطح عدم‌قطعیت ارزیابی شده و روش پیشنهادی در یک شبکه با ۱۱۶ لوله و ۹۰ گره مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مونت‌کارلو ابزاری مناسب برای تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت و قابلیت اطمینان برای سیستم‌های توزیع آب است. اگر تعداد شبیه‌سازی‌ها به اندازه کافی زیاد باشد، نتایج نیز قابل‌اعتمادتر خواهد بود.

Sumer and Lansey (2009) در تحقیقی تاثیر عدم‌قطعیت‌های موجود را بر روی پارامترهای مدل بررسی کرده و روشی را برای ارزیابی تأثیر عدم‌قطعیت‌ها در مقادیر زبری لوله‌ها ارائه دادند که در آن از روش ممان دوم مرتبه اول برای تحلیل پارامترهای غیرقطعی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تخمین دقیق میانگین پارامترها و تغییرات آن نقش مهمی در افزایش دقت و کاهش هزینه‌های مدل‌سازی دارد. Branisavljevic et al. (2009) کاهش عدم‌قطعیت مصارف گرهی در مدل شبکه‌های توزیع آب را با به‌کارگیری داده‌های جریان ورودی بررسی کردند. در این پژوهش، دبی ورودی در حالت‌های مختلف اندازه‌گیری شد و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، عدم‌قطعیت مصارف گرهی کمینه‌سازی شدند. به‌منظور مدل‌سازی عدم‌قطعیت مصارف گرهی از روش برش فازی و برای صحت‌سنجی مدل از شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است. نتایج نشان داد که با به‌کارگیری برخی از اطلاعات اضافی اندازه‌گیری شده، می‌توان عدم‌قطعیت‌ها را کاهش داد.

Pasha and Lansey (2010) تأثیر عدم‌قطعیت پارامترها بر کیفیت آب در یک سیستم توزیع آب تحت شرایط پایدار و ناپایدار را با استفاده از روش مونت‌کارلو مورد بررسی قرار دادند. منابع عدم‌قطعیت برای کیفیت آب شامل ضرایب زوال حجمی و دیواره، قطر و زبری لوله و تقاضای مصرف در گره‌ها بودند. نتایج نشان داد که بزرگترین عدم‌قطعیت‌ها زمانی ایجاد می‌شوند که الگوهای جریان تغییر کنند. هم‌چنین برای کالیبره‌کردن دقیق یک مدل شبیه‌ساز، توجه به مکان و زمان نمونه‌برداری و عدم‌قطعیت داده‌ها بسیار مهم هستند. Pérez et al. (2015) تاثیر عدم‌قطعیت‌های موجود در تقاضای گرهی را بر روی مقادیر فشارگرهی بررسی کردند. مدل‌سازی عدم‌قطعیت با استفاده از روش مونت‌کارلو در یک شبکه واقعی انجام شد. نتایج نشان داد که با استفاده از مدل قطعی تقاضای گرهی نمی‌توان عدم‌قطعیت‌های موجود در فشار گرهی شبکه را توجیه کرد. درحالی‌که با تحلیل اثر عدم‌قطعیت تقاضا بر عدم‌قطعیت فشار، به‌عبارت دیگر، با تغییر مدل تقاضا و با تولید تقاضای متناسب‌تر بین گره‌ها در یک شبکه، فشارهای پیش‌بینی‌شده به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر می‌شود و عدم‌قطعیت مقادیر فشار گرهی شبکه کاهش می‌یابد.

Sivakumar et al. (2016) با درنظر گرفتن زبری لوله به‌عنوان پارامتر دارای عدم‌قطعیت، دبی جریان در لوله‌ها و فشار در گره‌های شبکه را برآورد کردند. برای این‌منظور، روش مبتنی بر بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در هر برش α فازی استفاده شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی برای تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت پارامترها، به‌ویژه برای شبکه‌های مقیاس بزرگ یک روش مؤثر است. Geranmehr et al. (2019) تغییرات مقادیر فشارگرهی و سرعت جریان لوله‌ای در شبکه‌های توزیع آب براساس تغییرات عدم‌قطعیت در سه متغیر هد مخازن، مصارف گره‌ها و ضریب زبری لوله‌ها را بررسی کردند. در این پژوهش، از روش برش α فازی به‌منظور مدل‌سازی عدم‌قطعیت و از نرم‌افزار اپانت و الگوریتم ژنتیک برای مدل‌سازی تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار شبکه استفاده شد. نتایج نشان‌داد که سرعت جریان در لوله‌ها به‌مقدار زیادی تحت‌تأثیر عدم‌قطعیت پارامترهای فوق است، به‌طوری‌که تجمع عدم‌قطعیت‌های مختلف، عملکرد شبکه را به‌طور قابل‌توجهی تحت‌تاثیر قرار می‌دهد.

دینی و همکاران (۱۴۰۱) کارایی هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب را با اعمال عدم‌قطعیت پارامترهای قطر و زبری لوله‌ها و تقاضای گرهی بررسی کردند. برای این‌منظور، سری داده‌های احتمالاتی برای هریک از پارامترهای ذکر شده توسط شبیه‌سازی مونت‌کارلو تولید و از شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه برای ارزیابی کارایی شبکه استفاده شد. این روش بر روی یک شبکه نمونه و یک شبکه واقعی به‌کار برده شد. مقایسه نتایج در حالت قطعی و غیرقطعی نشان می‌دهد که روش غیرقطعی مزیت‌های بیشتری در پیش‌بینی نتایج نامطلوب مدل نسبت به روش قطعی دارا است.

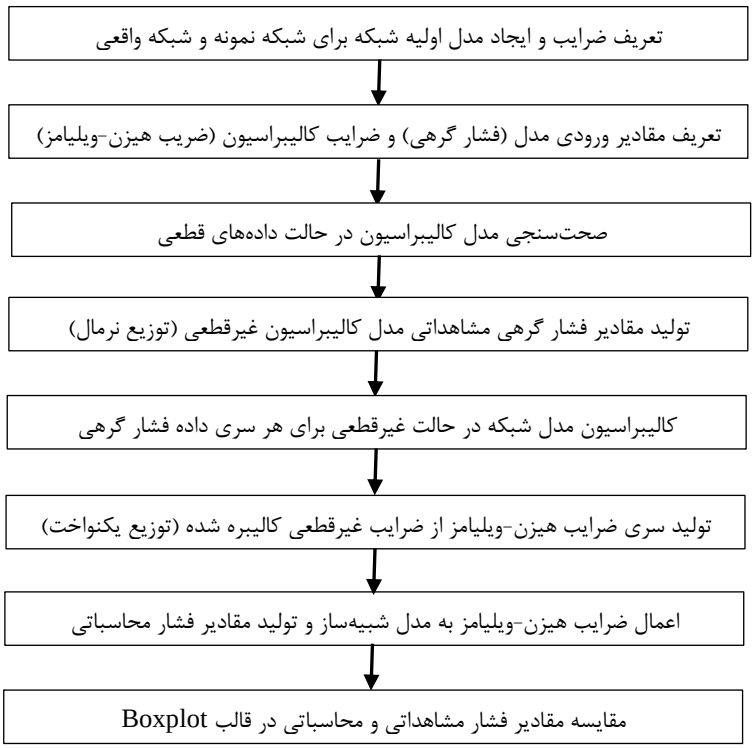
در تمامی تحقیقات انجام شده در مطالعات قبلی، بررسی عدم‌قطعیت مدل‌ها با اعمال عدم‌قطعیت برای تعدادی از پارامترها یا داده‌های مدل و ارزیابی خروجی مدل مانند فشار، کیفیت آب در گره‌ها و سرعت جریان در لوله‌ها انجام شده است. با توجه به ماهیت مدل‌سازی به‌صورت یک مدل شبیه‌ساز با حالت‌های مختلف ورودی، چالشی از نظر مدت زمان اجرای مدل و تعیین پارامترهای مدل بوجود نمی‌آید. این درحالی است که اگر این موضوع برعکس شود، یعنی مقادیر خروجی مدل مانند فشار در گره‌ها و سرعت جریان در لوله‌ها دارای عدم قطعیت باشند و براساس آن‌ها پارامترها و ضرایب مدل شبکه تنظیم شوند، مدل‌سازی در قالب یک مدل بهینه‌سازی کالیبراسیون خواهد بود و چالش بزرگی را از نظر تعیین ضرایب غیرقطعی و زمان اجرای مدل و شبیه‌سازی مدل شبکه ایجاد خواهد کرد که در این تحقیق این موضوع به‌عنوان نوآوری تحقیق موردتوجه قرار گرفته است. برای این‌منظور یک مدل بهینه‌سازی کالیبراسیون ایجاد شده که در آن با وارد کردن مقادیر غیرقطعی برای خروجی مدل، ضرایب غیرقطعی مدل محاسبه شده است. مدل‌سازی در محیط MATLAB و با به‌کارگیری الگوریتم جامعه مورچگان و تلفیق آن

با شبیه‌ساز EPANET انجام‌شده است. مزایای این روش با استفاده از یک شبکه نمونه و یک شبکه واقعی بررسی می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش تحقیق

در این تحقیق، به‌منظور کالیبراسیون شبکه توزیع آب با درنظر گرفتن عدم‌قطعیت داده‌های فشار گرهی شبکه، از دو شبکه نمونه و شبکه واقعی استفاده شده است، برای این منظور، ابتدا مدل کالیبراسیون بر روی شبکه دوحلقه‌ای در حالت داده‌های قطعی صحت‌سنجی شد و سپس در حالت داده‌های غیرقطعی، برای شبکه دوحلقه‌ای و شبکه توزیع آب صوفیان مورد استفاده قرارگرفت. برای این‌منظور، ابتدا داده‌های فشار گرهی به‌صورت قطعی برای شبکه دوحلقه‌ای از نرم‌افزار EPANET و داده‌های میدانی مربوط به شبکه صوفیان از داده‌های اندازه‌گیری شده شرکت آب و فاضلاب شهر صوفیان ، تهیه شده و با استفاده از توزیع نرمال، داده‌های غیرقطعی فشارگرهی مشاهداتی به‌دست آمدند. در مرحله بعدی برای هریک از سری داده‌های فشار غیرقطعی، ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه از طریق مدل کالیبراسیون به‌دست آمد. برای مقایسه نتایج، براساس مقادیر ضرایب هیزن-ویلیامز غیرقطعی کالیبره شده، سری داده‌های هیزن-ویلیامز شبکه با استفاده از توزیع یکنواخت تولید و به مدل شبیه‌ساز اعمال می‌شود تا مقادیر فشار محاسباتی به‌دست آید. نتایج دو فشار به‌صورت نمودارهای Boxplot با هم‌دیگر مقایسه شده است. روند انجام تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- روندنمای تحقیق

۲-۲- هیدرولیک شبکه

رابطه هیزن-ویلیامز یکی از معادلات افت فشار در شبکه‌های توزیع آب است. این فرمول برای لوله‌های صاف با قطرهای متوسط تا بزرگ خوب عمل می‌کند و با تغییر در ضریب هیزن-ویلیامز می‌تواند برای لوله‌های کهنه نیز به‌کار برده شود. رابطه هیزن-ویلیامز به صورت فرمول (۱) ارائه شده است.

$$h_f = \frac{10.68LQ^{1.852}}{C_{HW}^{1.852}D^{4.87}} \qquad (۱)$$

که Q: دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)، L: طول لوله (متر)، C_{HW}: ضریب هیزن-ویلیامز و D: قطر لوله (متر) هستند (تائبی و چمنی، ۱۳۹۳).

۲-۳- تابع هدف و بهینه سازی

تابع هدف مدل کالیبراسیون در این تحقیق به‌صورت رابطه (۲) است که در آن اختلاف مقادیر فشار گرهی مشاهداتی و محاسباتی غیرقطعی در هر اجرای مدل در گره‌های نمونه‌برداری

شبکه در طول ۲۴ ساعت دوره شبیه‌سازی حداقل می‌شود.

$$F = \sum_{j=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}\left(PO_{tj} - PS_{tj}\right)^2 \qquad (۲)$$

که N: تعداد گره‌های نمونه‌برداری از شبکه، T: دوره شبیه‌سازی مدل شبکه (ساعت)، PO_{tj}: فشار مشاهداتی، PS_{tj}: فشار محاسباتی در گره j ام در ساعت t، و F: مقدار توابع هدف است که باید حداقل شود.

در این تحقیق از الگوریتم دسته ذرات (PSO)[1] به‌دلیل سرعت بالای همگرایی آن به جواب بهینه برای بهینه‌سازی استفاده شده است. در ابتدا تعدادی مشخص از ذرات به‌صورت تصادفی، در فضای جستجوی مسئله پخش می‌شوند و برای هر ذره مقدار تابع هدف در موقعیتی از فضا که در آن قرارگرفته است، محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از اطلاعات محل فعلی و بهترین محلی قبلی ذرات و هم‌چنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود، موقعیت جدید ذرات تعیین می‌شود و یک تکرار از الگوریتم به پایان می‌رسد. این تکرارها تا رسیدن به جواب بهینه ادامه پیدا می‌کند.

در الگوریتم PSO هر جزء، دارای S بعد است که بیانگر تعداد متغیرهای مسئله است. مقادیر متغیرهای تصمیم، موقعیت یک پاسخ را در مسئله بهینه‌سازی تعیین می‌کنند. هر ذره i، توسط سه بردار: موقعیت کنونی $X_i=(x_{i1}, x_{i2}, \ldots, x_{is})$، بهترین موقعیت قبلی $B_i=(b_{i1}, b_{i2}, \ldots, b_{is})$ و سرعت حرکت ذره $V_i= (v_{i1}, v_{i2}, \ldots, v_{is})$ تعیین می‌شوند. در هر تکرار پس از تعیین شدن بهترین جواب عمومی (G)، مکان هر کدام از ذرات گروه تغییر می‌کند که این موقعیت با رابطه (۳) تعیین می‌شود (Kennedy and Elberhat, 1995).

$$X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t) \qquad (۳)$$

که $X_i(t)$ و $V_i(t)$: به‌ترتیب، مکان و سرعت جدید ذره هستند. سرعت جدید ذرات از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$V(t) = W \times V(t-1) + C_1 \times rand(B_i - X_i) + C_2 \times rand(G - X_I) \qquad (۴)$$

که C_1 و C_2: به‌ترتیب ضرایب یادگیری شخصی و اجتماعی و W: نیز ضریب اینرسی وزنی ذرات هستند. در این تحقیق برای بهینه‌سازی از پارامترهای الگوریتم دسته ذرات با مقادیر $C_1 = C_2 = 2$ و $W = 1$ استفاده شده است. هم‌چنین تعداد ذرات برابر ۵۰ و تعداد تکرار متناسب با خطای تابع هدف متغیر است (Kennedy and Elberhat, 1995).

۲-۴- عدم‌قطعیت پارامترها

برای تولید عدم‌قطعیت مقادیر فشار گرهی شبکه از روش مونت‌کارلو و توزیع نرمال یا توزیع یکنواخت استفاده شده است. تابع چگالی احتمال توزیع نرمال به‌صورت رابطه (۵) و تابع چگالی احتمال توزیع یکنواخت به‌صورت رابطه (۶) هستند.

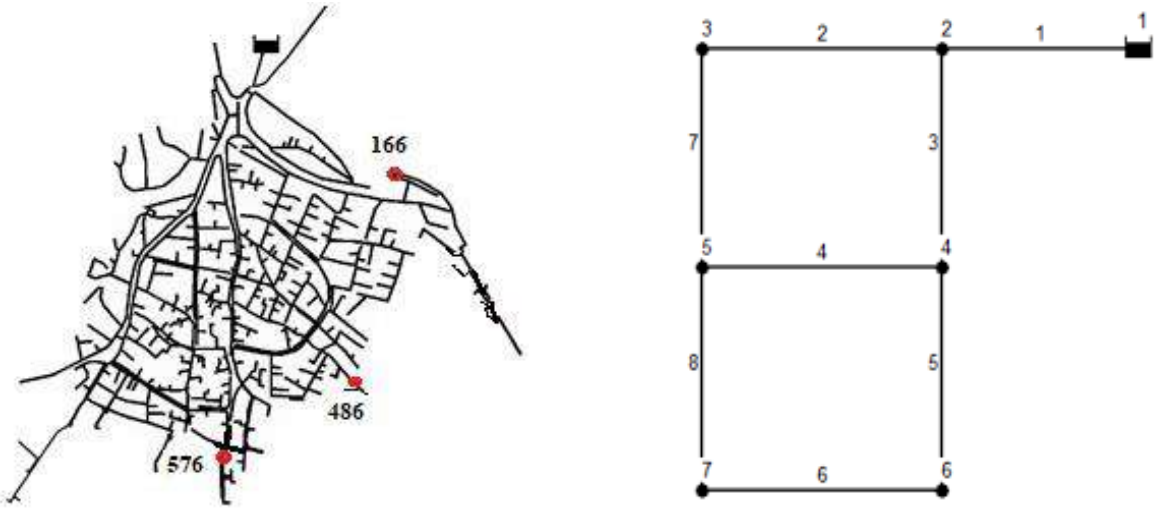
$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right] \qquad (۵)$$

$$f_x(x) = \frac{1}{b-a} \qquad a < x < b \qquad (۶)$$

که μ_x: میانگین متغیر x، σ_x: انحراف معیار استاندارد متغیر x، $f_x(x)$: تابع چگالی احتمال متغیر x و a و b: کران پایین و بالای تابع چگالی احتمال یکنواخت هستند (Seifollahi -Aghmiuni et al. 2013).

۳- مطالعه موردی

برای تشریح روش پیشنهادی از دو شبکه توزیع آب استفاده شده است. ساختار شماتیک دو شبکه در شکل ۲ نشان داده شده است. شبکه اول، شبکه نمونه دوحلقه‌ای Alperovits and Shamir (1977) است که دارای ۹ لوله، ۸ گره و یک مخزن است. شبکه دوم، شبکه توزیع آب شهر صوفیان است. این شهر در استان آذربایجان شرقی و در شهرستان شبستر واقع شده است. براساس سرشماری سال ۱۳۹۵ دارای حدود ۹۹۰۰ نفر جمعیت بوده است. سرانه مصرف در این شهر در حدود ۱۸۰ لیتر برای هر نفر در روز است. توزیع آب شهر به‌صورت ثقلی از تنها مخزن شهر با تراز ارتفاعی ۱۴۲۸ متر از سطح دریا و در قالب ۶۰۸ لوله و ۵۹۵ گره اتفاق می‌افتد. بلندترین نقطه شهر دارای تراز ارتفاعی ۱۴۰۷ متر در نزدیکی مخزن و پست‌ترین نقطه دارای تراز ارتفاعی ۱۳۵۵ متر است. مجموع طول لوله‌های شبکه ۵۱/۵ کیلومتر است که ۱۸/۵ کیلومتر آن آزبست سیمان با قطر حداکثر و حداقل به ترتیب ۳۰۰ و ۸۰ میلی‌متر و ۳۲/۷ کیلومتر آن پلی‌اتیلن با قطر حداکثر و حداقل به‌ترتیب ۱۱۰ و ۲۵ میلی‌متر و ۰/۳ کیلومتر آن آهن گالوانیزه با قطر برابر ۲۰۰ میلی‌متر است. در شبکه توزیع آب صوفیان، گره‌های نشان‌دار شده، به‌عنوان گره‌های نمونه برای تحلیل نتایج شبکه مورد استفاده قرار گرفته است.



(الف) (ب)

شکل ۲- ساختار شماتیک شبکه‌های مورد مطالعه: الف) شبکه دوحلقه‌ای؛ ب) شبکه توزیع آب صوفیان

۴- نتایج و بحث

در این بخش نتایج استفاده از روش پیشنهادی برای تنظیم ضرایب هیزن-ویلیامز بر روی دو شبکه نمونه و واقعی ارائه و بررسی می‌شود.

۴-۱- شبکه نمونه دوحلقه‌ای

در این بخش، ابتدا با فرض معلوم بودن ضرایب هیزن-ویلیامز، مقادیر قطعی فشار در گره‌های شبکه دوحلقه‌ای با استفاده از مدل شبیه‌ساز شبکه EPANET تعیین شد. برای صحت‌سنجی مدل پیشنهادی با عوض‌کردن جای مقادیر ورودی و خروجی، مقادیر فشار به‌عنوان ورودی مدل کالیبراسیون وارد مدل شده و ضرایب هیزن-ویلیامز تعیین شد. نتایج ۱۰ اجرای متوالی مدل در جدول ۱ آورده شده است. در این مرحله برای ۱۰ بار اجرای مدل کالیبراسیون، در بیش از ۷۰ درصد موارد، مدل پیشنهادی پاسخ قطعی ضرایب هیزن-ویلیامز را پیدا کرد و در بقیه موارد جواب‌های بسیار نزدیک به جواب واقعی را پیدا کرده است. به‌طور مثال در اجرای پنجم که مدل کالیبراسیون، جواب قطعی را پیدا نکرده است، مقادیر ضرایب هیزن-ویلیامز به‌دست آمده برای لوله‌ها، بسیار نزدیک به مقادیر واقعی است که با دقت‌های مهندسی می‌توان آن را معادل جواب واقعی درنظر گرفت. در مجموع مقایسه نتایج در شرایط داده‌های قطعی نشان‌دهنده عملکرد مطلوب مدل پیشنهادی در کالیبراسیون ضرایب مدل شبکه را دارد.

در ادامه با استفاده از روش مونت‌کارلو به تعداد مشخص، سری داده‌های فشار برای گره‌های شبکه تولید شد. در این مرحله از توزیع نرمال برای تولید سری داده‌های فشار استفاده شده است. هرکدام از سری داده‌های فشار به‌صورت مجزا به مدل کالیبراسیون اعمال شدند و سری پارامترهای هیزن-ویلیامز معادل آن‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات به‌دست آمدند. برای تحلیل نتایج، سری داده‌های فشار اولیه که با استفاده از توزیع نرمال و بر پایه داده‌های فشار قطعی در گره‌های شبکه تولید شده است، به‌عنوان داده‌های مشاهداتی درنظر گرفته شد. سپس با تولید سری داده‌های هیزن-ویلیامز شبکه با استفاده از توزیع یکنواخت از محدوده جواب غیرقطعی کالیبره شده و اعمال آن به شبیه‌ساز شبکه، داده‌های محاسباتی فشار گرهی به‌دست آمد و نتایج با هم مقایسه شدند. در این مرحله ۱۰۰ سری داده فشار گرهی مشاهداتی برای کالیبراسیون در نظر گرفته شد و برای تولید داده‌های محاسباتی براساس ضرایب غیرقطعی هیزن-ویلیامز به‌دست آمده از مدل کالیبراسیون، ۱۰۰۰ داده فشار گرهی محاسباتی با استفاده از مدل شبیه‌ساز شبکه تولید شد.

برای کالیبراسیون شبکه دوحلقه‌ای، ۱۰۰ سری داده‌های فشار گرهی با استفاده از توزیع نرمال تولید و به مدل کالیبراسیون اعمال و ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه تعیین شدند. در جدول ۲ ضرایب هیزن-ویلیامز لوله‌های شبکه در حالت قطعی و غیرقطعی به‌صورت میانگین، میانه ضرایب، دامنه تغییرات و انحراف معیار آن‌ها برای لوله‌های مختلف آورده شده است. همان‌طور که از نتایج جدول ۲ مشخص است، مقادیر میانگین و میانه در کالیبراسیون غیرقطعی با اختلاف کمی نزدیک مقادیر قطعی داده‌ها است، ولی با این‌وجود، اختلاف موجود می‌تواند در مقادیر خروجی شبکه تغییرات قابل‌توجهی ایجاد کند که لزوم توجه به عدم‌قطعیت‌ها در مدل‌سازی و تنظیم ضرایب مدل‌ها را بهتر نشان می‌دهد. در

بین لوله‌های شبکه نمونه دوحلقه‌ای، لوله ۲ کمترین دامنه تغییرات و انحراف معیار و لوله ۵ بیشترین دامنه تغییرات و انحراف معیار را دارد. در مجموع با چشم‌پوشی از برخی حالت‌های خاص در بین لوله‌ها، با دور شدن از مخزن شبکه، دامنه تغییرات و انحراف معیار ضرایب لوله‌ها بیشتر شده است.

جدول ۱- ضرایب هیزن-ویلیامز لوله‌های شبکه دوحلقه‌ای برای ده اجرای متوالی مدل کالیبراسیون

شماره اجرا	لوله ۱	لوله ۲	لوله ۳	لوله ۴	لوله ۵	لوله ۶	لوله ۷	لوله ۸	F
جواب قطعی	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۶
اجرای ۱	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۶
اجرای ۲	۱۳۰	۷۴	۱۳۰	۱۲۹	۱۱۰	۷۶	۹۳	۷۰	۰/۶۴۳۳۶
اجرای ۳	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۶
اجرای ۴	۱۳۰	۷۱	۱۳۰	۱۳۰	۱۱۴	۹۳	۹۴	۷۰	۱/۷۳۳۴۳
اجرای ۵	۱۳۰	۸۰	۱۲۹	۷۳	۱۰۰	۷۲	۱۰۰	۷۱	۰/۰۰۸۰۸
اجرای ۶	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۶
اجرای ۷	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۶
اجرای ۸	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۶
اجرای ۹	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۶
اجرای ۱۰	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۶

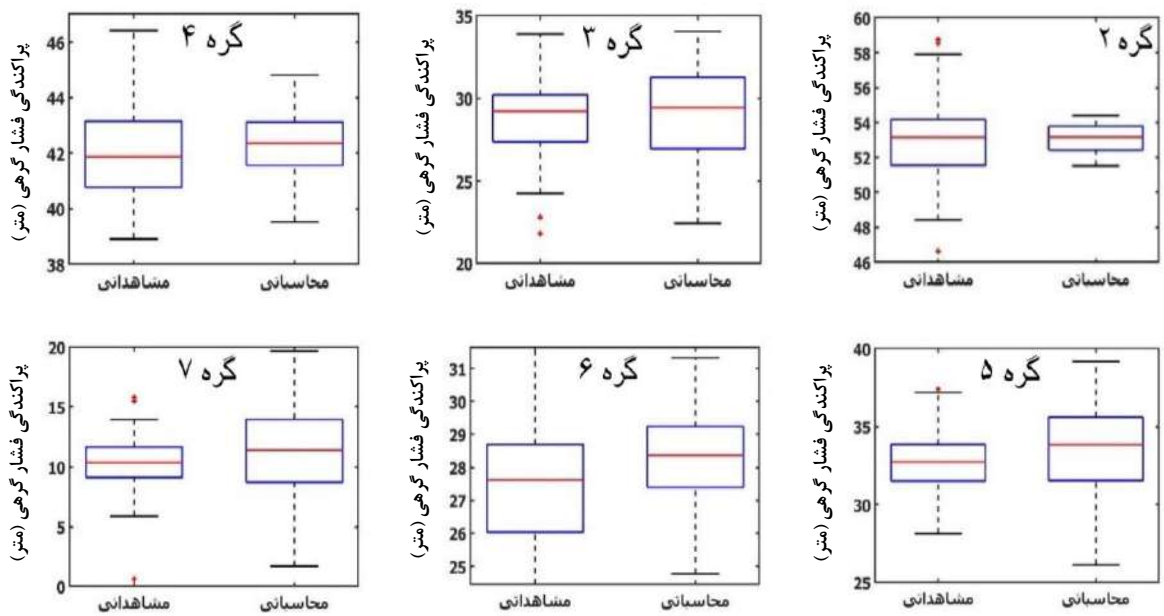
جدول ۲- ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه دوحلقه‌ای در حالت قطعی و غیرقطعی

لوله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
مقادیر قطعی	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰
میانگین	۱۳۳/۰۷	۸۱/۵۸	۱۳۲/۸۱	۷۲/۴۵	۱۰۷/۵۳	۷۳/۵۸	۱۰۰/۹۶	۷۳/۹۶
میانه	۱۳۴/۸۶	۸۱/۱۰	۱۳۷/۵۹	۶۷/۹۶	۱۰۲/۹۱	۷۴/۴۳	۹۵/۰۵	۷۱/۲۰
دامنه تغییرات	۲۲/۳۷	۱۷/۴۵	۲۷/۶۳	۳۲/۸۹	۴۴/۲۱	۴۱/۳۲	۴۳/۱۶	۲۱/۵۸
انحراف معیار	۱۲/۶۱	۷/۹۸	۱۷/۱۲	۲۳/۳۵	۲۵/۹۳	۲۱/۲۴	۲۳/۵۷	۱۰/۴۳

بعد از تعیین ضرایب هیزن-ویلیامز لوله‌های شبکه مطابق جدول ۲، با تولید ۱۰۰۰ سری ضرایب هیزن-ویلیامز از مقادیر غیرقطعی با استفاده از توزیع یکنواخت و اعمال آن به مدل شبیه‌ساز شبکه، سری مقادیر فشار گرهی محاسباتی به‌دست آمد. مدت زمان اجرای مدل کالیبراسیون با ۱۰۰ سری داده مشاهداتی و ۵ تکرار آن برای هر حالت، برای انتخاب بهترین از بین ۵ تکرار، بسیار بالا و در حدود بیش از ۴۰ ساعت است، که یکی از دلایل آن استفاده از تعداد سری داده‌های کم برای کالیبراسیون در مقابل انتخاب ۱۰۰۰ داده برای تولید داده‌های مشاهداتی است. چرا که در تولید داده‌های محاسباتی از مدل شبیه‌ساز شبکه به تنهایی استفاده می‌شود و زمان اجرای مدل کوتاه است، درحالی‌که در مدل کالیبراسیون، مدل شبیه‌ساز شبکه در فرایند بهینه‌سازی صدها بار فراخوانی و اجرا می‌شود. همین مسئله باعث بالا رفتن زمان اجرای مدل‌های کالیبراسیون می‌شود. مقادیر میانه، میانگین، دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی برای این حالت در جدول ۳ آورده شده است. در شکل ۳ پراکندگی داده‌های فشار مشاهداتی و محاسباتی در گره‌های شبکه دوحلقه‌ای به‌ترتیب برای گره‌های ۲ تا ۷ نشان داده شده است.

جدول ۳- مقادیر میانه، میانگین، دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی مشاهداتی و محاسباتی در شبکه دوحلقه‌ای

شماره گره	۲		۳		۴		۵		۶		۷	
شاخص‌ها	مشاهداتی	محاسباتی	مشاهداتی	محاسباتی	مشاهداتی	محاسباتی	مشاهداتی	محاسباتی	مشاهداتی	محاسباتی	مشاهداتی	محاسباتی
میانگین (متر)	۵۳/۱۰	۵۳/۱۱	۲۸/۸۳	۲۹/۰۵	۴۲/۰۲	۴۲/۳۴	۳۲/۸۱	۳۳/۵۱	۲۷/۳۹	۲۸/۳۲	۱۰/۴۰	۱۱/۱۵
میانه (متر)	۵۳/۱۶	۵۳/۱۸	۲۹/۲۲	۲۹/۴۴	۴۱/۸۸	۴۲/۳۷	۳۲/۷۵	۳۳/۸۵	۲۷/۶۱	۲۸/۳۶	۱۰/۳۶	۱۱/۳۷
دامنه تغییرات (متر)	۹/۴۱	۲/۸۷	۹/۶۴	۱۱/۶۲	۷/۵۶	۵/۲۹	۸/۹۴	۱۳/۰۴	۸/۰۰	۶/۵۵	۸/۶۷	۱۹/۰۷
انحراف معیار (متر)	۲/۲۰	۰/۸۲	۱/۹۹	۲/۶۸	۱/۶۶	۱/۰۹	۱/۸۶	۲/۶۲	۲/۰۳	۱/۲۶	۱/۹۹	۳/۶۰



شکل ۳- پراکندگی فشار گرهی مشاهداتی و محاسباتی (متر) برای گره‌های مختلف شبکه دوحلقه‌ای

برای بررسی بهتر نتایج، دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و محاسباتی در کنار شاخص‌های هندسی و هیدرولیکی شبکه نمونه مورد بررسی قرارگرفته است تا تاثیرپذیری دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌ها از شاخص‌ها بررسی شود. شاخص‌های هندسی و هیدرولیکی مورد بررسی شامل متوسط قطر دسترسی به مخزن (درصورتی‌که چند مسیر وجود داشته باشد، مسیر با بزرگترین متوسط قطر انتخاب می‌شود) (D_a)، کوتاه‌ترین فاصله از مخزن (L)، متوسط ضریب هیزن-ویلیامز دسترسی به مخزن در مسیر بزرگترین متوسط قطر (C_{HWa})، مصرف گرهی (q)، هد گرهی (H)، انرژی در دسترس ($E = 9810QH$) و حاصل‌ضرب متوسط قطر در متوسط ضریب هیزن-ویلیامز ($D_a \times C_{HWa}$) است. در جدول ۴ ضریب همبستگی بین دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌ها با شاخص‌های هندسی و هیدرولیکی شبکه دوحلقه‌ای آورده شده است.

همان‌طور که از نتایج جدول ۴ مشخص است، با توجه به این‌که مقادیر داده‌های مشاهداتی به‌صورت احتمالاتی براساس توزیع نرمال و در اطراف میانگین مقادیر فشار در هر گره تولید شده است، لذا همبستگی خاصی بین شاخص‌های هندسی و هیدرولیکی شبکه با آن‌ها وجود ندارد یا درصورت وجود کمتر از ۰/۵ و ضعیف است. این درحالی است که برای داده‌های محاسباتی، با توجه به این‌که هر یک از مقادیر فشار محاسباتی براساس بازتولید سری ضرایب هیزن-ویلیامز از ضرایب غیرقطعی به‌روش توزیع یکنواخت به‌دست می‌آیند و به‌طورکامل تحت‌تاثیر شاخص‌های هندسی و هیدرولیکی شبکه هستند، همبستگی خوبی بین این شاخص‌ها با دامنه تغییرات و انحراف معیار مقادیر فشار در گره‌ها برقرار است. به‌طوری‌که بیشترین ضریب همبستگی مربوط به دامنه تغییرات با هد گرهی، متوسط ضریب هیزن-ویلیامز لوله‌ها و حاصل‌ضرب متوسط قطر و متوسط هیزن-ویلیامز است که در تمامی آن‌ها مقدار ضریب از ۰/۹۶- بیشتر است و نشان می‌دهد که بین دامنه تغییرات فشار با این شاخص‌ها همبستگی منفی قوی وجود دارد. این مقادیر برای انحراف معیار داده‌های فشار با شاخص‌های فوق بیش از ۰/۹۴- است که با توجه به مقادیر ضرایب همبستگی بین شاخص‌های شبکه و دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی در گره‌های شبکه، می‌توان نتیجه گرفت که نوسان مقادیر فشار گرهی در گره‌های شبکه در برابر عدم‌قطعیت داده‌ها، با فاصله هر گره از مخزن رابطه مستقیم (ضریب همبستگی مثبت) و با مقادیر هد گرهی، متوسط قطر و ضریب هیزن-ویلیامز و حاصل‌ضرب قطر و ضریب هیزن-ویلیامز، رابطه عکس (بیشترین مقادیر منفی) را دارد که براساس رابطه هیزن-ویلیامز و ارتباط بین متغیرهای دخیل در آن نیز قابل تفسیر خواهد بود. به‌طور کلی گره‌هایی که این خصوصیات را دارند، سبب ایجاد نوسان در شبکه شده و از حساسیت بالایی برخوردار هستند. در شبکه دوحلقه‌ای، گره ۷ با بیشترین فاصله از مخزن و کمترین مقادیر هد، قطر و ضریب هیزن-ویلیامز بیشترین نوسان فشار را در بین ۶ گره به خود اختصاص داده است. در مقابل گره ۲ با کمترین فاصله از مخزن و با بیشترین هد گرهی، قطر و ضریب هیزن-ویلیامز، کمترین نوسان فشار را دارا است.

جدول ۴- ضریب همبستگی بین دامنه تغییرات و انحراف معیار با شاخص‌ها

	فشار گرهی	D_a	L	CHW_a	Q	H	E	$D_a \times CHW_a$
دامنه تغییرات	مشاهداتی	۰/۳۴	-۰/۲۹	-۰/۳۶	-۰/۳۹	-۰/۰۵	-۰/۴۲	-۰/۰۸
	محاسباتی	-۰/۸۳	۰/۸۲	-۰/۹۷	۰/۲۶	-۰/۹۸	۰/۱۵	-۰/۹۶
انحراف معیار	مشاهداتی	-۰/۳۶	-۰/۲۱	-۰/۰۲	-۰/۰۷	-۰/۱۲	-۰/۰۶	۰/۱۶
	محاسباتی	-۰/۷۴	۰/۷۲	-۰/۹۸	۰/۱۵	-۰/۹۴	۰/۰۵	-۰/۹۴

۴-۲- شبکه توزیع آب صوفیان

در این بخش، کالیبراسیون شبکه توزیع آب صوفیان مورد بررسی قرار می‌گیرد. مراحل کار مشابه شبکه دوحلقه‌ای است که در آن، کالیبراسیون شبکه برای مدل استاتیک شبکه در حالت متوسط مصرف از شبکه با ضریب الگوی مصرف برابر یک انجام می‌شود. علت استفاده از مدل استاتیک به‌جای مدل دینامیک زمان بسیار بالای اجرای مدل در حالت دینامیک است که با توجه به تعداد ۱۰۰ سری داده فشار مشاهداتی و ۵ تکرار مدل کالیبراسیون برای هر سری داده فشار مشاهداتی برای انتخاب بهترین حالت از بین ۵ تکرار، مدل کالیبراسیون ۵۰۰ بار اجرا می‌شود و این‌کار زمانبر خواهد بود. برای کالیبراسیون شبکه صوفیان ابتدا ۱۰۰ سری داده فشار مشاهداتی از گره‌های شبکه انتخاب و با ۵ اجرای متوالی مدل کالیبراسیون، ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه تعیین شد. با توجه تعداد زیاد لوله‌ها در شبکه توزیع آب صوفیان (۶۰۸ لوله)، تعیین ضرایب برای همه لوله‌ها به‌صورت غیرقطعی، امکان همگرایی مدل به جواب بهینه را پیچیده می‌کرد. از این‌رو، براساس سرعت جریان در لوله‌ها، لوله‌های با حساسیت بالا از سایر لوله‌ها جدا شدند، ضرایب لوله‌های با حساسیت کم به‌صورت ثابت و حالت قطعی نگه‌داشته شده و ضرایب لوله‌های با حساسیت بالا به‌صورت غیرقطعی تنظیم شد. از مجموع ۶۰۸ لوله موجود در شبکه توزیع آب صوفیان حدود ۴۵ لوله دارای سرعت جریان بیش از ۰/۳ متر برثانیه است که تنظیم ضرایب به‌صورت غیرقطعی برای آن‌ها انجام شده ولی ضرایب برای ۱۰ لوله با حساسیت خیلی بالا ارائه شده است.

در جدول ۵ مقادیر میانگین، میانه و دامنه تغییرات و انحراف معیار ضرایب هیزن-ویلیامز برای لوله‌های انتخابی شبکه توزیع آب صوفیان ارائه شده است. براساس نتایج جدول ۵، دامنه تغییرات و انحراف معیار ضرایب هیزن-ویلیامز لوله‌های انتخابی شبکه توزیع آب صوفیان بسیار بالا است، به‌طوری‌که برای لوله ۱۸۴ با میانگین ضریب هیزن-ویلیامز ۱۳۹/۱۰ دامنه تغییرات ضریب برابر ۵۰/۵۹ است. این مقدار نشان می‌دهد محدوده تغییرات ضریب هیزن-ویلیامز می‌تواند بسیار بزرگ باشد، به‌خصوص وقتی شبکه بزرگ و تعداد ضرایب قابل‌تنظیم زیاد بوده و مقادیر فشار گرهی نیز دارای عدم قطعیت باشند، بی‌نهایت ترکیب بین ضرایب لوله‌ها وجود خواهد داشت که بتوانند با آن ترکیب، مقادیر نزدیک به فشار گره‌های شبکه در حالت غیرقطعی را تولید کنند. این امر با بالا یا پایین شدن ضرایب لوله‌ها اتفاق خواهد افتاد. به‌طور مثال اگر دو لوله متوالی با طول یکسان دارای ضریب هیزن-ویلیامز به‌ترتیب برابر ۱۳۵ و ۱۲۵ باشند که متوسط ضریب هیزن-ویلیامز آن‌ها برابر ۱۳۰ است، در حالت تنظیم ضرایب با مقادیر ضرایب ۱۴۵ و ۱۱۵ و میانگین ضریب برابر ۱۳۰ نیز تقریبا مشابه همان رفتار را خواهد داشت. این مورد، زمانی‌که تعداد لوله‌ها و تعداد ترکیب‌ها زیاد می‌شود، دامنه تغییرات ضرایب و انحراف معیار آن‌ها را بزرگتر می‌کند.

جدول ۵- ضرایب هیزن-ویلیامز لوله‌های منتخب شبکه صوفیان

شماره لوله	مقادیر قطعی	میانگین	میانه	دامنه تغییرات	انحراف معیار
۲۰۶	۱۴۲/۴	۱۴۲/۵۹	۱۴۱/۹۰	۵۰/۱۰	۱۶/۲۸
۲۰۴	۱۴۰/۴	۱۴۵/۲۳	۱۴۴/۰۵	۵۰/۱۵	۱۲/۵۷
۲۰۰	۱۳۱/۸	۱۳۵/۵۵	۱۳۸/۳۰	۴۴/۱۰	۱۴/۹۵
۱۹۹	۱۴۳/۶	۱۳۷/۱۳	۱۳۴/۲۶	۴۹/۴	۱۶/۳۰
۱۹۶	۱۴۲/۵	۱۳۰/۳۹	۱۲۴/۲۷	۴۹/۸	۲۱/۳۸
۱۸۶	۱۳۹/۳	۱۴۸/۰۵	۱۵۹/۲۸	۴۹/۴۳	۱۶/۷۱
۱۸۴	۱۴۱/۵	۱۳۹/۱۰	۱۴۲/۲۵	۵۰/۵۹	۱۷/۶۹
۱۸۲	۱۳۳/۸	۱۴۶/۰۶	۱۵۱/۴۰	۴۸/۸۲	۱۵/۳۹
۱۶۷	۱۳۸/۷	۱۳۸/۹۲	۱۴۲/۵۰	۳۴/۱۱	۱۹/۴۱
۲۰۱	۱۳۸/۲	۱۳۹/۷۵	۱۴۴/۲۷	۳۹/۴۱	۱۸/۲۸

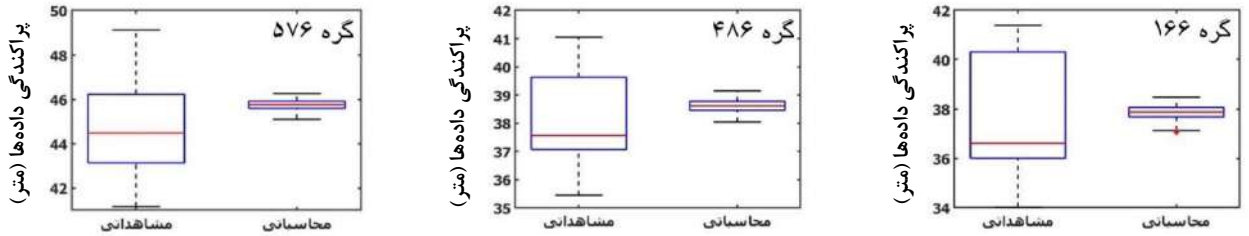
برای مقایسه بهتر نتایج، مقادیر مشاهداتی و محاسباتی فشار گرهی در سه گره انتخابی شبکه به‌همراه فاصله از مخزن و هد گرهی آن‌ها در جدول ۶ آورده شده است. در شکل ۴ نیز Boxplot مربوط به مقادیر فشار مشاهداتی و محاسباتی گره‌های انتخابی نشان داده شده است.

هم‌چنین در شکل ۵-الف برای داده‌های فشار محاسباتی و در شکل ۵-ب برای داده‌های فشار مشاهداتی، هیستوگرام دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌ها در کنار فاصله از مخزن و هد گرهی آورده شده است. به‌طورکلی در شبکه توزیع آب شهر صوفیان نیز بین دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی با فاصله از مخزن همبستگی مثبت و بین دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی با هد گرهی همبستگی منفی وجود دارد، به‌طوری‌که در گره ۵۷۶، با بیشترین طول و کمترین هد، دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌ها زیاد و در گره ۴۸۶ با طول متوسط و بیشترین هد، دامنه تعییرات و انحراف معیار داده‌ها کم است.

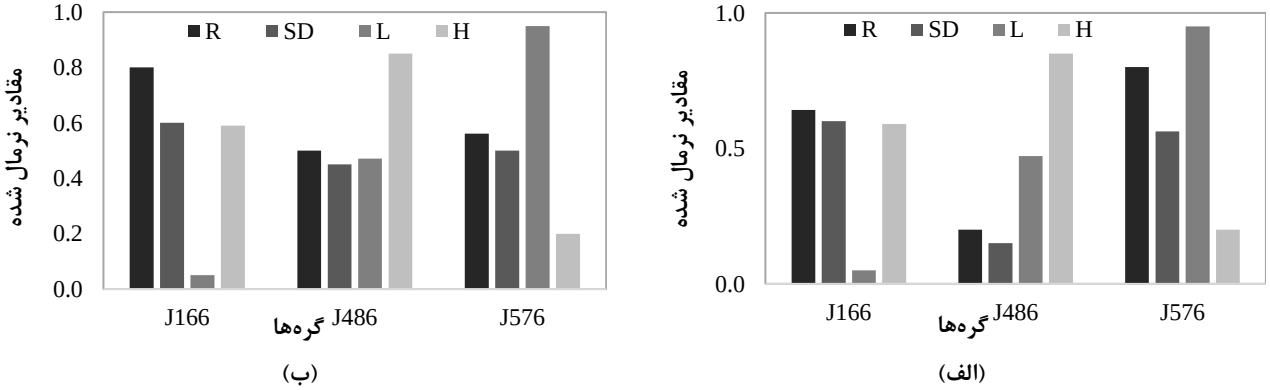
نکته دیگری که در جدول ۶ و شکل ۴ به وضوح قابل مشاهده است، مربوط به دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و محاسباتی در گره‌های منتخب است که در داده‌های مشاهداتی همواره بزرگتر از داده‌های محاسباتی است. دلیل این موضوع مربوط به این است که داده‌های مشاهداتی با استفاده از توزیع نرمال و براساس مقادیر فشار گرهی در مدل استاتیک شبکه برای ۱۰۰ سری داده‌های مشاهداتی ساخته شده است که در آن توزیع نرمال بدون دخالت شاخص‌های هندسی و هیدرولیکی شبکه، مقادیر فشار گرهی را تولید کرده است. به‌همین دلیل دامنه تغییرات و انحراف معیار آن‌ها بزرگتر شده است. این درحالی است که در داده‌های محاسباتی مقادیر فشار گرهی براساس ضرایب هیزن-ویلیامز تنظیم شده در شبکه به‌دست آمده‌اند و در فرایند محاسبات تحت‌تاثیر محدودیت‌های هندسی و هیدرولیکی شبکه بوده‌اند. لذا ناشی از این محدودیت‌ها، نوسان کوچکتری دارند و دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی در آن پایین است

جدول ۶- مقادیر میانه، میانگین، دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی در گره‌های انتخابی شبکه صوفیان

گره	۱۶۶		۴۸۶		۵۷۶	
فشار گرهی	مشاهداتی	محاسباتی	مشاهداتی	محاسباتی	مشاهداتی	محاسباتی
میانگین (متر)	۳۷/۸۵	۳۷/۸۸	۳۸/۰۰	۳۸/۶۲	۴۴/۹۰	۴۵/۷۶
میانه (متر)	۳۶/۶۲	۳۷/۸۸	۳۷/۵۶	۳۸/۶۱	۴۴/۴۷	۴۵/۷۶
دامنه تغییرات (متر)	۷/۴۶	۱/۴۴	۵/۶۲	۱/۱۰	۸/۱۲	۱/۱۷
انحراف معیار (متر)	۲/۴۰	۰/۲۳	۱/۶۸	۰/۲۰	۲/۴۳	۰/۲۱
فاصله (متر)	۷۵۸		۱۳۹۴		۱۹۷۲	
H (متر)	۱۴۲۳/۱		۱۴۲۴/۱		۱۴۲۱/۶	



شکل ۴- پراکندگی داده‌های محاسباتی و مشاهداتی برای گره‌های انتخابی شبکه توزیع آب صوفیان



شکل ۵- نوسان دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی در مقابل فاصله از مخزن و هد گرهی: الف) داده‌های مشاهداتی؛ ب) داده‌های محاسباتی

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب با درنظر گرفتن عدم‌قطعیت متغیر فشار در گره‌های شبکه بررسی شد. روش پیشنهادی، بر روی شبکه نمونه دوحلقه‌ای و شبکه توزیع آب صوفیان پیاده شد. برای صحت‌سنجی روش پیشنهادی، در شبکه دوحلقه‌ای، ابتدا با فرض معلوم بودن ضرایب هیزن-ویلیامز، مقادیر قطعی فشار گرهی تعیین شد. سپس با تعریف مقادیر فشار به‌عنوان ورودی مدل کالیبراسیون، ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه تنظیم شد. مقایسه مقادیر قطعی و به‌دست آمده از مدل کالیبراسیون نشان‌دهنده صحت عملکرد مدل کالیبراسیون شبکه بود. در ادامه کالیبراسیون هر دو شبکه در حالت غیرقطعی بررسی شد. برای این‌منظور با استفاده از داده‌های غیرقطعی فشار گرهی که به‌روش مونت‌کارلو و توزیع یکنواخت و نرمال تولید شده بود، ضرایب غیرقطعی هیزن-ویلیامز شبکه با استفاده از مدل کالیبراسیون محاسبه شد. در ادامه با ضرایب غیرقطعی هیزن-ویلیامز شبکه و با استفاده از مدل شبیه‌ساز شبکه، مقادیر غیرقطعی فشار گرهی محاسبه شد.

برای بررسی عملکرد مدل کالیبراسیون، داده های فشار مشاهداتی (اولیه) با داده‌های فشار محاسباتی به‌صورت غیرقطعی مقایسه شد که نشان دهنده هم‌خوانی مناسب بین آن‌ها در هر دو شبکه بوده و عملکرد مناسب مدل کالیبراسیون شبکه در حالت غیرقطعی را تایید می‌کند. هم‌چنین برای بررسی بیشتر تغییرات فشار گرهی در حالت غیرقطعی، روند تغییرات این مقادیر با شاخص‌های هندسی و هیدرولیکی شبکه بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد بین دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی با فاصله از مخزن همبستگی قوی مثبت و با هد گرهی همبستگی قوی منفی وجود دارد. به‌عبارت دیگر با افزایش فاصله از مخزن و کاهش هد گرهی، نوسانات فشار گرهی تشدید می‌شود.

۶- پی‌نوشت‌ها

1- Particle Swarm Optimization (PSO)

۷- مراجع

تائبی، ا.، و چمنی، م.ر.، (۱۳۹۷)، *شبکه‌های توزیع آب شهری*، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ۶۰۴ ص.

تابش، م.، جاماسب، م.، و معینی، ر.، (۱۳۸۸)، "کالیبره‌سازی مدل تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب با درنظر گرفتن انواع متغیرهای تنظیم و شرایط مصرف"، *نشریه هیدرولیک*، ۴(۳)، ۶۹-۷۸.

دینی، م.، و تابش، م.، (۱۳۹۲)، "کالیبراسیون هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب با درنظر گرفتن عدم‌قطعیت داده‌ها"، *دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران*، ۷ آبان، کرج، ایران.

دینی، م.، و تابش، م.، (۱۳۹۵)، "مدل‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری با درنظر گرفتن تاثیر جنس، قطر و سن لوله‌ها در تنظیم ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه"، *نهمین کنگره ملی مهندسی عمران*، ۲۱ و ۲۲ اردیبهشت، مشهد، ایران.

دینی، م.، محمدی‌کلیبر، ا.، نورانی، و.، و هاشمی، س.، (۱۴۰۰)، "پهنه‌بندی احتمالاتی کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب با اعمال عدم‌قطعیت پارامترهای کلیدی"، *نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست دانشگاه تبریز*، ۵۳(۲)، ۵۰-۶۰، https://doi.org/10.22034/JCEE.2021.44669.2007.

Branisavljevic, N., Prodanovic, D., and Ivetic, M., (2009), "Uncertainty reduction in water distribution network modelling using system inflow data", *Urban Water Journal*, 6(1), 69-79, https://doi.org/10.1080/15730620802600916.

Dini, M., Mohammadikaleibar, A., Hashemi, S., and Nourani, V., (2022), "Stochastic long-term reliability of water distribution networks using Monte Carlo simulation", *Urban Water Journal*, 19(2), 151-160, https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.1971264.

Geranmehr M., Asghari K., and Chamani M.R., (2019), "Uncertainty analysis of water distribution networks using type-2 fuzzy sets and parallel genetic algorithm", *Urban Water Journal*, 16(3), 193-204, https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1648527.

Kang, D.S., Pasha, M.F.K., and Lansey, K., (2009), "Approximate methods for uncertainty analysis of water distribution systems", *Urban Water Journal*, 6(3), 233-249, https://doi.org/10.1080/15730620802566844.

Kennedy, J., and Elberhart, R., (1995), "Particle swarm optimization", *Proceedings of IEEE International Conference on Nerural Networks*, 4, 1942-1948.

Pasha, M.F.K., and Lansey, K., (2010), "Effect of parameter uncertainty on water quality predictions in distribution systems-case study", *Journal of Hydroinformatics*, 12(1), 1-21, https://doi.org/10.1080/15730620802566844.

Tabesh, M., Jamasb, B., and Moeini, R., (2011), "Calibration of water distribution hydraulic models: A comparison between pressure dependent and demand driven analyses", *Urban Water Journal*, 8(2), 93-102, https://doi.org/10.2166/hydro.2010.053.

Sumer, D., and Lansey, K., (2009), "Effect of uncertainty on water distribution system model design decisions", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(1), 38-47, https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-

9496(2009)135:1(38).

Sivakumar, P., Prasad, R.K., and Chandramouli, S., (2016), "Uncertainty analysis of looped water distribution networks using linked EPANET-GA method", *Water Resources Management*, 30(1), 331-358, https://doi.org/10.1007/s11269-015-1165-x.

Seifollahi-Aghmiuni, S., Haddad, O.B., and Mariño, M.A., (2015), "Water distribution network risk analysis under simultaneous consumption and roughness uncertainties", *Water Resources Management*, 27(7), 2595-2610, https://doi.org/10.1007/s11269-013-0305-4.

Pérez, R., Sanz, G., Cugueró, M.À., Blesa, J., and Cugueró, J., (2015), "Parameter uncertainty modelling in water distribution network models", *Procedia Engineering*, 119, 583-592, https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.911.

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. 8, No. 3, PP. 25-34, Autumn 2023
DOI: 10.22112/JWWSE.2023.360223.1326

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال هشتم، شماره ۳، صفحات ۲۵-۳۴، پاییز ۱۴۰۲

Research Paper

Investigating the Performance of the Combined Dagging Method with the Hoeffding Tree Base Algorithm in the Qualitative Classification of Drinking Water

Mohammad Taghi Sattari[1*] and Sahar Javidan[2]
1- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2- M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
* Corresponding Author, Email: mtsattar@tabrizu.ac.ir

Received: 11/09/2022
Revised: 11/04/2023
Accepted: 26/04/2023
© IWWA

Abstract

For the effective qualitative management of drinking water, it is necessary to estimate the level of water pollution. In this research, to calculate the quality index of drinking water from the chemical parameters of Total Hardness, Alkalinity, Electrical Conductivity, Total Dissolved Solids, Calcium, Sodium, Magnesium, Potassium, Chlorine, Carbonate, Bicarbonate, and Sulfate in the hydrometric station of Bagh Kelayeh, Qazvin province used in the statistical period of 23 years (1998-2020). According to the calculated numerical values and existing standards, water quality classified into two classes, good and excellent. To predict the quality class of drinking water based on chemical parameters, different combinations of parameters were considered in the form of several scenarios. In this regard, correlation and relief algorithms were used to select different scenarios. Hoeffding tree was used as a basic model for classifying water quality based on different combinations of parameters. Also, the performance of the combined Dagging approach in improving the results was evaluated. The results showed that the combined Dagging improves the water quality classification results. Scenario 6 Dagging with Hoeffding tree base algorithm, including HCO_3, Ca, SO_3, TDS, EC and TH parameters, with Kappa = 1, was introduced as the best method which is able to classify test samples correctly.

Keywords: Drinking Water Quality Index, Hoeffding Tree, Kappa Statistic, Rock Curve.

مقاله پژوهشی

بررسی عملکرد روش ترکیبی دگینگ با الگوریتم پایه درخت هوفدینگ در طبقه‌بندی کیفی آب شرب

محمدتقی ستاری[۱*] و سحر جاویدان[۲]
۱- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: mtsattar@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۰
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۱/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۶
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

برای مدیریت مؤثر کیفی آب شرب، برآورد سطح آلودگی آب‌های سطحی ضروری است. در پژوهش حاضر، برای محاسبه شاخص کیفی آب شرب از پارامترهای شیمیایی سختی کل، قلیائیت، هدایت الکتریکی، کل مواد جامد محلول، کلسیم، سدیم، منیزیم، پتاسیم، کلر، کربنات، بی‌کربنات و سولفات ایستگاه هیدرومتری باغ کلایه استان قزوین، در دوره آماری ۲۳ ساله (۱۹۹۸-۲۰۲۰) استفاده شد. با توجه به مقادیر عددی محاسبه شده و استانداردهای موجود، کیفیت آب در دو کلاس خوب و عالی طبقه‌بندی شد. برای طبقه‌بندی کلاس کیفی آب شرب براساس پارامترهای شیمیایی، ترکیب‌های مختلفی از پارامترها در قالب چندین سناریو درنظر گرفته شد. در این راستا، برای انتخاب سناریوهای مختلف، از دو روش همبستگی و الگوریتم رلیف استفاده شد. درخت هوفدینگ به‌عنوان مدل پایه برای طبقه‌بندی کلاس کیفی آب براساس ترکیب‌های مختلفی از پارامترهای شیمیایی به‌کار برده شد. هم‌چنین عملکرد روش ترکیبی Dagging در بهبود نتایج، مورد ارزیابی قرارگرفت. نتایج نشان داد که روش ترکیبی Dagging باعث بهبود نتایج طبقه‌بندی کلاس کیفی آب می‌شود. سناریوی ۶ روش Dagging با الگوریتم پایه درخت هوفدینگ، شامل پارامترهای HCO_3، Ca، SO3، TDS، EC و TH، با Kappa = 1، به‌عنوان بهترین روش معرفی شد. این روش توانست تمام نمونه‌های آزمایشی را به‌صورت صحیح، طبقه‌بندی کند.

کلمات کلیدی: آماره کاپا، روش ترکیبی Dagging، درخت هوفدینگ، شاخص کیفی آب شرب، منحنی راک.

۱- مقدمه

با توجه به این‌که نیازهای کشاورزی، صنعتی و خانگی افزایش یافته، در نتیجه رقابت فزاینده‌ای برای تأمین آب پاک نیز به‌وجود آمده است. سیستم‌های آب سطحی به‌دلیل افزایش فشارهای ناشی از گسترش شهری و تغییر کاربری اراضی شهری با اختلالات قابل‌توجهی از طریق احیا، تغییر و آلودگی مواجه هستند. به‌هر طریقی، بسیاری از مشکلات مربوط به آب (مانند سیل یا خشکسالی و آلودگی جدی آب) نتیجه توسعه نامنظم یا نادرست کاربری زمین است (Kavita and Jagdish, 2012). در دو دهه اخیر، آلودگی رودخانه‌های آب به‌عنوان یکی از دغدغه‌های جهانی جوامع، مطرح شده است که توجه کامل محققان محیط‌زیست را می‌طلبد (Kotti et al., 2005). مطالعات بسیاری در زمینه برآورد کیفیت آب سطحی انجام شده است. بگینگ، تقویت و دگینگ، روش‌های نمونه‌گیری مجدد شناخته شده‌ای هستند که با استفاده از الگوریتم یادگیری یکسان برای طبقه‌بندی‌کننده‌های پایه، تنوعی از طبقه‌بندی‌کننده‌ها را مخصوصاً در شرایطی که داده‌ها دارای نویز هستند، تولید و ترکیب می‌کنند (Kotsianti and Kanellopoulos, 2007).

Kotsianti and Kanellopoulos (2007) بر روی یک سری از داده‌های معیار استاندار با استفاده از روش رأی‌گیری از گروه‌های بگینگ، تقویت و دگینگ با ۸ طبقه‌بندی فرعی مدل را پیاده نمودند. در مقایسه‌ای که با گروه‌های بسته‌بندی، تقویت‌کننده و دگینگ ساده با ۲۵ طبقه‌بندی فرعی و همچنین سایر روش‌های ترکیبی معروف، بر روی مجموعه داده‌های معیار استاندارد انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که الگوریتم پیشنهادی در اکثر موارد از دقت بیشتری برخوردار بوده است. Babar and Babar (2017) شاخص کیفیت آب رودخانه یامونا را با استفاده از تکنیک‌های داده‌کاوی[۱]، پیش‌بینی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که طبقه‌بندی‌کننده‌های درخت تصمیم[۲] و ماشین‌های بردار پشتیبان[۳]، بهترین مدل‌های پیش‌گوینده با نرخ خطای ۰٪، در طول استخراج خودکار کلاس کیفیت آب هستند. در صورتی‌که داده‌های ارائه‌شده نمایشی واقعی از دانش حوزه باشند، تکنیک‌های داده‌کاوی پتانسیل پیش‌بینی سریع کلاس کیفیت آب را خواهند داشت.

ستاری و همکاران (۱۳۹۶) از روش‌های داده‌کاوی برای پیش‌بینی کیفیت آب‌های سطحی رودخانه‌های دامنه شمالی سهند استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مدل تصمیم‌گیری درختی با استفاده از چهار پارامتر هدایت الکتریکی[۴]، PH، نسبت جذب سدیم[۵] و سدیم قادر است با دقت زیادی کیفیت آب را طبقه‌بندی کند. دزفولی و همکاران (۱۳۹۶) طبقه‌بندی کیفی آب رودخانه کارون را براساس حداقل پارامترهای کیفی انجام دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که روش شبکه عصبی احتمالی[۶] با استفاده از پارامترهای کیفی کدورت، کلی‌فرم مدفوعی و کل مواد جامد با دقت ۹۰/۷۸ می‌تواند به طبقه‌بندی کیفی آب بپردازد. Gakii and Jepkoech (2019) با استفاده از مدل درخت تصمیم کیفیت آب در کنیا را طبقه‌بندی و تجزیه و تحلیل کردند. آن‌ها درخت تصمیم J48 و Decision Stump را به‌ترتیب به‌عنوان مدلی با بیشترین و کمترین دقت معرفی کردند. آن‌ها دریافتند که تجزیه و تحلیل قلیائیت آب، سطح pH و هدایت الکتریکی می‌تواند نقش مهمی در ارزیابی کیفیت آب داشته باشد.

Meddouri et al. (2021) با استفاده از مجموعه داده‌های شناخته شده از مخزن یادگیری ماشین UCI عملکرد الگوریتم دگینگ را ارزیابی کردند. برای هر مجموعه داده، به‌ترتیب تعداد نمونه‌ها، تعداد ویژگی‌های عددی (قبل از گسسته‌سازی)، تعداد ویژگی‌های اسمی (پس از گسسته‌سازی)، تعداد کلاس‌ها و تنوع داده‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد به‌علت این‌که روش‌های دگینگ از اکثریت رأی برای ترکیب طبقه‌بندی‌کننده استفاده می‌کنند، بنابراین از دقت بیشتری برخوردار هستند. ایشان پیشنهاد نمودند که استفاده از الگوریتم دگینگ می‌تواند برای بهبود عملکرد طبقه‌بندی مجموعه داده مفید باشد. Islam Khan et al. (2021) براساس رگرسیون مؤلفه اصلی[۷] و رویکرد طبقه‌بندی‌کننده تقویت گرادیان[۸]، کیفیت آب را طبقه‌بندی و پیش‌بینی نمودند. آن‌ها رویکرد طبقه‌بندی‌کننده تقویت گرادیان را با دقت طبقه‌بندی ۱۰۰ درصد، به‌عنوان روش برتر معرفی کردند. همچنین دریافتند که این روش، در مقایسه با مدل‌های پیشرفته، عملکرد مطلوبی داشته است.

Sattari et al. (2021) کیفیت آب رودخانه آلاداغ در ترکیه را به‌منظور مصارف آبیاری و کشاورزی طبقه‌بندی کردند. پس از ارزیابی روش‌های داده‌کاوی، نتیجه گرفتند که این روش‌ها، دقت و عملکرد خوبی در طبقه‌بندی کیفیت آب داشتند. هم‌چنین، به‌طور کلی دریافتند که از میان هسته‌های مورد استفاده برای طبقه‌بندی در روش بردار پشتیبان، هسته جهانی پیرسون و از درخت‌های تصمیم، درخت REP[۹] بهترین نتایج را برای طبقه‌بندی کیفیت آب رودخانه آلاداغ داشت. آن‌ها روش درخت هوفدینگ را هم به‌کار بردند که نتایج مطلوبی را به‌دنبال نداشت. Yusri et al. (2022) طبقه‌بندی کیفیت آب را با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان و افزایش گرادیان شدید[۱۰] (XGBoost) انجام دادند.

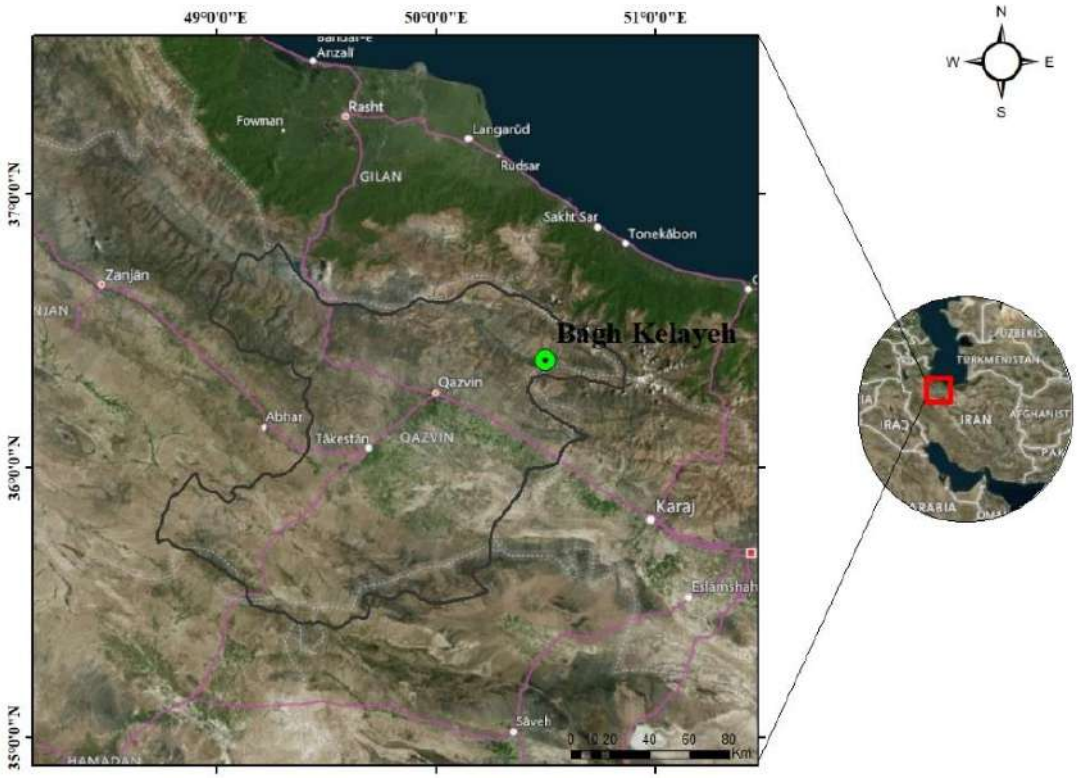
نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مدل XGBoost با دقت ۹۴ درصد، بهتر از مدل SVM عمل کرده و تنها ۶ درصد خطا در طبقه‌بندی کیفیت آب داشته است.

با توجه به هزینه‌های سرسام‌آور منیتورینگ و نمونه‌برداری از رودخانه‌ها برای تعیین کیفیت آب شرب، ارائه مدل‌هایی که بتواند با حداقل تعداد پارامتر هیدروشیمیایی با دقت نسبتاً قابل‌قبولی کلاس کیفی آب را مشخص کند، یکی از اولویت‌های مدیران کیفی آب است. در این راستا هدف پژوهش حاضر، طبقه‌بندی کلاس کیفی آب شرب، با استفاده از مدل‌های داده‌کاوی براساس داده‌های مشاهداتی مربوط به پارامترهای کیفی آب ایستگاه هیدرومتری باغ کلایه در استان قزوین است. با توجه به این‌که تاکنون از روش دگینگ در زمینه مدل سازی کیفی آب استفاده نشده است، بررسی تأثیر استفاده از این روش در بهبود نتایج، یکی از نوآوری‌های پژوهش حاضر است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

باغ کلایه، روستایی از توابع بخش رودبار الموت شهرستان قزوین در استان قزوین است. ایستگاه هیدرومتری باغ کلایه دارای عرض جغرافیایی ″۳۸ ′۲۳ °۳۶، طول جغرافیایی ″۵۱ ′۲۹ °۵۰ بوده و در ارتفاع ۱۲۸۷ متر از سطح دریا واقع شده است. استان قزوین در بخش شمال غربی کشور ایران واقع شده و مساحت آن حدود km^2 ۱۵۸۲۰۰ است. میانگین بارش سالانه در ۲۰ سال اخیر mm ۳۰۲/۵۱ و متوسط دمای سالانه °C ۱۵/۲۱ بوده که براساس طبقه‌بندی دومارتن دارای اقلیم نیمه‌خشک و براساس اقلیم‌نمای آمبروژه دارای اقلیم خشک سرد است (جاویدان و همکاران، ۱۴۰۱). شکل ۱ موقعیت مکانی ایستگاه موردمطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت مکانی ایستگاه هیدرومتری باغ کلایه

در پژوهش حاضر برای محاسبه شاخص کیفی آب[11] (WQI) و طبقه‌بندی کلاس کیفی آب شرب ایستگاه هیدرومتری باغ کلایه، از پارامترهای کیفی شامل سختی کل (TH)، قلیائیت (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، کل مواد جامد محلول[12] (TDS)، کلسیم (Ca)، سدیم (Na)، منیزیم (Mg)، پتاسیم (K)، کلر (Cl)، کربنات (CO_3)، بی‌کربنات (HCO_3) و سولفات (SO_4) استفاده شد. کلاس کیفی به‌دست آمده از این‌روش، به‌عنوان خروجی‌های هدف در فرآیند مدل‌سازی مورد استفاده قرارگرفتند. دوره آماری در مطالعه حاضر، ۲۳ ساله (۱۹۹۸-۲۰۲۰) درنظر گرفته شد. مشخصات آماری متغیرهای مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات آماری پارامترهای مورد استفاده

Statistic	حداقل	حداکثر	میانگین	واریانس
سختی کل (میلی‌گرم بر لیتر)	۹۵/۰۰	۴۸۱/۵۰	۲۷۸/۱۵	۳۴۰۷/۳۸
قلیاییت	۴/۵۰	۸/۴۰	۷/۸۳	۰/۱۱
هدایت الکتریکی (میکروموس بر سانتی‌متر)	۲۷۹/۰۰	۱۰۴۸/۰۰	۶۲۷/۹۴	۱۷۴۸۰/۸۷
کل مواد جامد محلول (میلی‌گرم بر لیتر)	۱۸۶/۰۰	۶۶۳/۰۰	۳۸۸/۰۵	۵۹۸۳/۸۱
کلسیم (میلی اکی‌والان بر لیتر)	۰/۰۰	۱۵۹/۸۰	۷۳/۹۴	۳۸۰/۲۴
سدیم (میلی اکی‌والان بر لیتر)	۰/۴۶	۶۰/۴۹	۱۷/۲۶	۸۲/۹۸
منیزیم (میلی اکی‌والان بر لیتر)	۲/۷۶	۵۸/۲۰	۲۲/۱۸	۰/۹۳۷۰
پتاسیم (میلی اکی‌والان بر لیتر)	۰/۳۹	۱۹/۵۰	۱/۹۹	۲/۷۹
کلر (میلی اکی‌والان بر لیتر)	۰/۰۰	۸۹/۶۰	۲۷/۳۶	۱۹۸/۶۱
کربنات (میلی اکی‌والان بر لیتر)	۰/۰۰	۳۳/۰۰	۰/۲۱	۴/۱۷
سولفات (میلی اکی‌والان بر لیتر)	۲۲/۰۸	۳۷۴/۸۸	۱۴۰/۲۱	۲۱۲۹/۱۹
بی کربنات (میلی اکی‌والان بر لیتر)	۵۰/۰۲	۳۹۱/۶۲	۱۶۳/۶۰	۱۵۶۵/۲۱

۲-۲- سناریوهای مورد استفاده

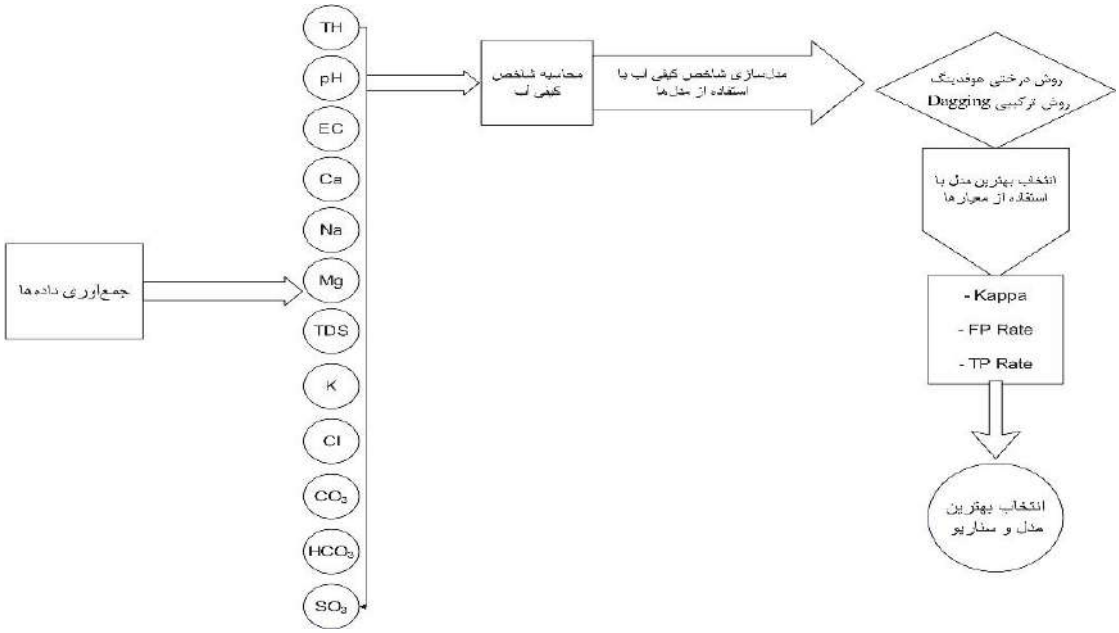
در این پژوهش برای انجام مدل‌سازی با روش‌های داده‌کاوی از سناریوهای مختلفی استفاده شد تا بهترین ترکیب ورودی مشخص شود و تأثیر انتخاب پارامترهای شیمیایی مختلف مورد بررسی قرارگیرد. براین اساس سناریوهای استفاده شده در پژوهش حاضر در جدول ۲ ارائه شده است. انتخاب ترکیب‌های ورودی مختلف، با استفاده از روش همبستگی و الگوریتم رلیف[۱۳] انجام شد. استفاده از الگوریتم رلیف که برای کاهش ابعاد مسئله مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ توسط Kira and Rendell (1992) پیشنهاد شده است. مزیت‌های استفاده از این روش، ساده بودن اصول و عدم پیچیدگی آن، قابل‌حل بودن با توابع چندجمله‌ای مرتبه پایین، قابل استفاده بودن برای داده‌های پیوسته و نیاز به تعداد کم داده‌های آموزشی درنظر گرفته می‌شود. در یک مجموعه داده با تعداد N نمونه (داده مشاهداتی) و تعداد P ویژگی که مربوط به دو طبقه مختلف هستند، هر ویژگی باید در بازه (۱،۰) قرارگیرد. الگوریتم مذکور، m بار تکرار شده و در هر مرتبه از یک بردار وزنی متفاوت که از صفر شروع می‌شود، استفاده می‌کند. در هر تکرار، الگوریتم مذکور بردار ویژگی X را که متعلق به یک نمونه تصادفی است و بردارهای ویژگی نزدیک‌ترین نمونه به نمونه X در طبقه موردنظر را توسط تابع فاصله اقلیدسی انتخاب می‌کند. پس از m تکرار، هر یک از عناصر بردار وزن توسط m تقسیم‌بندی می‌شوند. نتیجه این عمل این است که یک بردار مرتبط به‌دست می‌آید. چنان‌چه مقدار بردار مرتبط یک ویژگی، از آستانه تعریف شده بیشتر شود، آن ویژگی انتخاب می‌شود. این الگوریتم نه به‌عنوان یک روش پیش‌پردازش است نه روش طبقه‌بندی.

الگوریتم رلیف به‌منظور مشخص نمودن تأثیر متغیرهای مستقل بر روی متغیر پاسخ و یا هدف به‌کار می‌رود. الگوریتم رلیف ترکیب‌های متفاوتی از متغیرهای ورودی در راستای ایجاد سناریوهای مختلف مدل‌سازی را ارائه می‌کند (Kira and Rendell, 1992). انتخاب ویژگی بر اساس همبستگی، یک روش معمول و پرکاربرد برای انتخاب متغیرهای ورودی و کاهش ابعاد مسئله است. روش همبستگی به زیرمجموعه‌هایی که دارای ویژگی‌هایی با بیشترین ضریب همبستگی با کلاس نمونه مورد نظر هستند، امتیاز می‌دهد و متغیرهایی که بیشترین امتیاز را دارا باشند، به‌عنوان متغیر اصلی درنظر می‌گیرد. این الگوریتم توانایی بالایی در تشخیص سریع داده‌های نامربوط، اضافی و دارای خطا دارد که عموماً منجر به حذف نیمی از داده‌ها می‌شود. این ویژگی با کاهش ابعاد مسئله سبب افزایش بهره‌وری مدل‌ها می‌شود (Hall, 1999). از بین داده‌های مورد مطالعه، ۷۰٪ برای واسنجی و ۳۰٪ برای صحت‌سنجی انتخاب شدند. برای طبقه‌بندی کلاس کیفی آب شرب، از روش درخت هوفدینگ[۹] استفاده شد و عملکرد روش Dagging با الگوریتم پایه درخت هوفدینگ مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۳- روش‌های مورد مطالعه

در این پژوهش برای تعیین کیفیت آب از دیدگاه شرب، ابتدا شاخص کیفی آب به‌عنوان یک شاخص عددی با استفاده از پارامترهای شیمیایی مؤثر در کیفیت آب محاسبه شد. سپس با استفاده از استانداردهای موجود کلاس و طبقه کیفی آب از نقطه‌نظر مساعد بودن و یا نبودن برای شرب تعیین شد. از آن‌جایی که نمونه‌برداری از منبع آب برای تعیین کیفیت آب زمان‌بر و هزینه‌بر است، لذا به‌کمک روش‌های داده‌کاوی سعی شد با استفاده از حداقل تعداد پارامتر شیمیایی شاخص کیفی آب و به‌تبع آن کلاس کیفی آب مدل‌سازی شود. در همین راستا

ترکیب‌های مختلفی از پارامترهای شیمیایی در قالب چندین سناریو به‌عنوان ورودی مدل‌های داده‌کاوی براساس نمونه‌های مشاهداتی درنظر گرفته شد. در همین سناریوها کلاس و طبقه کیفی آب که براساس شاخص کیفی آب برای نمونه‌های مشاهداتی قبلاً تعیین شده بود به‌عنوان خروجی مدل‌ها برای آموزش و انجام فرآیند مدل‌سازی درنظر گرفته شد. کارکرد کلی هریک از مدل‌ها و الگوریتم‌های داده‌کاوی مورد استفاده در این پژوهش معطوف به افزایش دقت مدل‌ها در پیش‌بینی شاخص کیفی آب بود. با استفاده از معیارهای ارزیابی نتایج هریک از مدل‌ها و الگوریتم‌ها برای سناریوهای معرفی شده مورد مقایسه قرارگرفت و نهایتاً بهترین سناریو (ترکیب پارامترهای ورودی) و دقیق‌ترین مدل و الگوریتم داده‌کاوی انتخاب شد. در شکل ۲ روند انجام تحقیق ارائه شده است.



شکل ۲- روندنمای مراحل انجام تحقیق

۲-۳-۱- شاخص کیفیت آب شرب

از فرمول‌های (۱) تا (۳) برای محاسبه شاخص کیفی آب و طبقه‌بندی کلاس کیفی، استفاده شد (Singh, 1992).

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \quad (۱)$$

$$q_i = \left(\frac{C_i}{S_i}\right) \times 100 \quad (۲)$$

$$WQI = \sum_{i=1}^{n} W_i q_i \quad (۳)$$

که w: وزن مربوط به هر پارامتر با توجه به اهمیت آن در شرب، W: وزن نسبی هر پارامتر، C: غلظت هر پارامتر، S: غلظت استاندارد هر پارامتر، q: رتبه کیفی هر پارامتر و WQI: نیز شاخص کیفی آب شرب است.

پس از محاسبه مقادیر WQI، کلاس کیفی آب شرب به پنج دسته آب عالی، خوب، بد، بسیار ضعیف و نامناسب برای آشامیدن تقسیم می‌شود (جدول ۲).

جدول ۲- طبقه بندی کیفیت آب بر اساس ارزش WQI

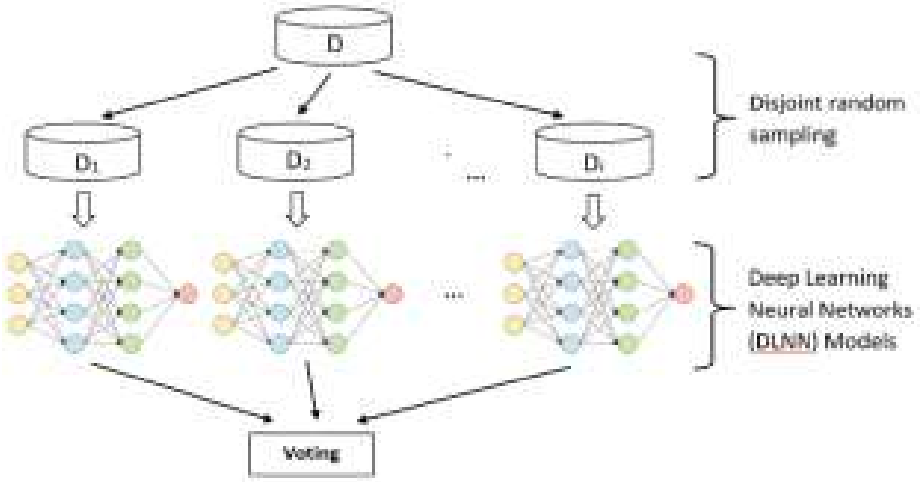
طبقه‌بندی کیفیت آب آشامیدنی		
نوع آب	کلاس	محدوده شاخص WQI
آب عالی	I	کمتر از ۵۰
آب خوب	II	۵۰-۱۰۰
آب بد	III	۱۰۰-۲۰۰
آب بسیار بد	IV	۲۰۰-۳۰۰
آب نامناسب برای آشامیدن	V	بیشتر از ۳۰۰

۲-۳-۲- روش درختی هوفدینگ

مدل درختی هوفدینگ[۱۴] که به‌عنوان یک الگوریتم افزایشی معروف درخت تصمیم شناخته می‌شود، در ابتدا برای رفع مشکلات طبقه‌بندی در استخراج جریان داده در مقیاس بزرگ پیشنهاد شد (Domingos and Hulten, 2003). در روش مدل HT، هر نمونه در پایگاه داده آموزشی تنها یک‌بار اسکن می‌شود. از این‌رو، این مدل دارای راندمان محاسباتی برجسته با رم نسبتاً پایین است. علاوه‌بر این، عملیات طبقه‌بندی را می‌توان در زمانی که مدل HT در حال رشد است، اجرا کرد که به‌وضوح با مدل‌های DT معمولی متفاوت است (Mehta and Sanghavi, 2019).

۲-۳-۳- روش Dagging

این طبقه‌بندی‌کننده، تعدادی چین‌های منفصل و طبقه‌بندی‌شده از داده‌ها ایجاد می‌کند و هر تکه از داده‌ها را به‌یک کپی از طبقه‌بندی‌کننده پایه ارائه‌شده، تغذیه می‌کند. پیش‌بینی‌ها از طریق اکثریت آرا انجام می‌شود. نمونه‌گیری غیرمجاز تصادفی و ناهمگن در مجموعه داده آموزشی اعمال می‌شود. پس از نمونه‌برداری مجدد از مجموعه داده آموزشی، یک طبقه‌بندی پایه برای هر نمونه ایجاد می‌شود. سپس نتایج این طبقه‌بندی‌کننده‌های چندگانه با استفاده از رأی اکثریت ترکیب می‌شوند. بنابراین روش ترکیبی Dagging یک مجموعه موازی درنظر گرفته می‌شود (Ting and Witten, 1997). شکل ۳ نمای کلی از این روش را ارائه می‌دهد.



شکل ۳- نمای کلی روش ترکیبی Dagging (Elish and Elish, 2021)

۲-۴- معیارهای ارزیابی

در هر پژوهش مبتنی بر روش‌های داده‌کاوی، از آن‌جایی‌که روش‌ها در رقابت بایکدیگر عمل می‌کنند، ضروری است تا با به‌کار بردن معیارهایی دقت مدل‌های مورد استفاده را تعیین نموده و بر این اساس نسبت به اولویت‌بندی مدل‌ها و انتخاب مدل برتر اقدام نمود. اساساً در شرایطی که خروجی مدل‌ها کمی (عددی) و یا کیفی (غیرعددی) باشند، معیارهای ارزیابی متفاوتی برای سنجش دقت مدل‌ها به‌کار می‌رود. در این پژوهش خروجی مدل‌های داده‌کاوی کیفی (غیرعددی) هستند و بر این اساس معیارهای ارزیابی، معطوف به مقایسه تعداد صحیح موارد پیش‌بینی شده در برابر تعداد غیرصحیح موارد پیش‌بینی شده در فرآیند مدل‌سازی و طبقه‌بندی است.

برای مقایسه کلاس کیفی به‌دست آمده از روش‌های داده‌کاوی با کلاس کیفی محاسبه شده از WQI از آماره کاپا، نرخ مثبت صحیح[۱۵] (TPR) و نرخ مثبت غلط[۱۶] (FPR) استفاده شد. فرمول‌های آماره‌های فوق به ترتیب در روابط (۴) تا (۶) ارائه شده است.

$$kappa = p_i = (PA_0 - PA_E)/(1 - PA_E) \quad (۴)$$

$$Sensitivity = TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۵)$$

$$1 - Specificity = FPR = \frac{TN}{TN + FP} \quad (۶)$$

که PA_0: میزان توافق دو ارزیاب، PA_E: میزان توافق مورد انتظار، TP: مثبت صحیح، FN: منفی غلط، FP: مثبت غلط و TN: منفی صحیح هستند.

منحنی راک برای مقایسه دو ویژگی عملیاتی نرخ مثبت واقعی (TPR) یا حساسیت و نرخ مثبت کاذب (FPR) یا ویژگی به‌کار می‌رود. هم‌چنین به‌عنوان منحنی مشخصه عملکرد گیرنده شناخته می‌شود. منحنی مشخصه عملکرد گیرنده، یک نمایش گرافیکی است که عملکرد الگوریتم‌های طبقه‌بندی‌کننده داده‌کاوی را تفسیر می‌کند. این نتیجه ترسیم نرخ مثبت واقعی در مقابل نرخ مثبت کاذب در تنظیمات آستانه‌های مختلف است. TPR در امتداد محور y و FPR در امتداد محور x رسم می‌شود. عملکرد هر الگوریتم به‌عنوان یک نقطه در منحنی ROC نشان داده می‌شود.

۳- نتایج و بحث

در پژوهش حاضر برای برآورد کلاس کیفی آب با استفاده از شاخص WQI، از پارامترهای TH، pH، EC، TDS، Ca، Na، Mg، K، Cl، CO_3، HCO_3 و SO_4 ایستگاه هیدرومتری باغ کلایه در دوره آماری ۲۳ ساله استفاده شد. روش رلیف و همبستگی برای انتخاب ترکیب‌های ورودی مختلف به‌کار برده شد. پارامترهای ورودی سناریوهای مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- پارامترهای دخیل در هر سناریو و روش انتخاب سناریوها

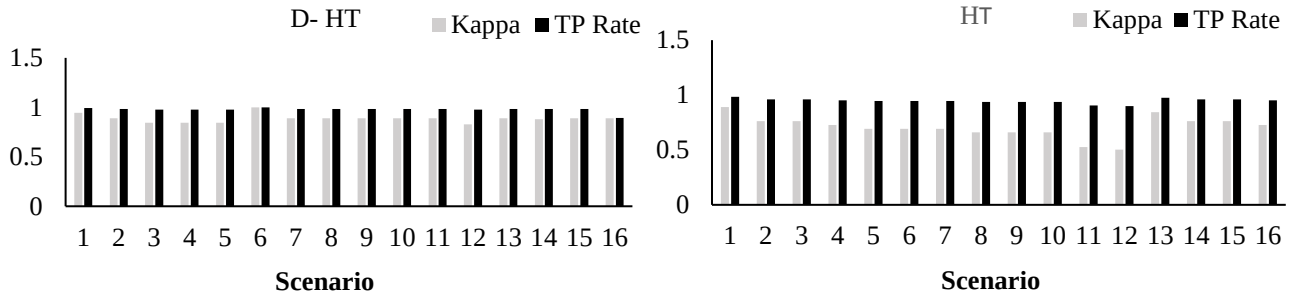
شماره سناریو	ورودی‌ها	روش انتخاب سناریو
۱	TH	ماتریس همبستگی
۲	TH, EC	
۳	TH, EC, TDS	
۴	TH, EC, TDS, SO_4	
۵	TH, EC, TDS, SO_4, Ca	
۶	TH, EC, TDS, SO_4, Ca, HCO_3	
۷	TH, EC, TDS, SO_4, Ca, HCO_3, Mg	
۸	TH, EC, TDS, SO_4, Ca, HCO_3, Mg, Cl	
۹	TH, EC, TDS, SO_4, Ca, HCO_3, Mg, Cl, Na	
۱۰	TH, EC, TDS, SO_4, Ca, HCO_3, Mg, Cl, Na, K	
۱۱	TH, EC, TDS, SO_4, Ca, HCO_3, Mg, Cl, Na, K, CO_3	
۱۲	TH, EC, TDS, SO_4, Ca, HCO_3, Mg, Cl, Na, K, CO_3, PH	
۱۳	TH, K	الگوریتم رلیف
۱۴	TH, K, SO_4	
۱۵	TH, K, SO_4, TDS	
۱۶	TH, K, SO_4, TDS, EC	

برای برآورد مقادیر کیفی WQI از روش درختی هوفدینگ و روش ترکیبی Dagging استفاده شد. پس از طبقه‌بندی کلاس کیفی آب در ایستگاه مورد مطالعه، مشخص شد که تمام نمونه‌های برداشت شده در کلاس کیفی یک و دو، یعنی کیفیت عالی (۱۳/۲۷ درصد) و خوب (۸۶/۷۳ درصد) قرارگرفتند. نتایج مدل‌سازی کلاس کیفی آب در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- معیارهای ارزیابی برای برآورد مقادیر کیفی WQI

سناریو	روش									
	روش درختی هوفدینگ					روش ترکیبی Dagging				
	Kappa	RMSE	TP Rate	FP Rate	ROC Area	Kappa	RMSE	TP Rate	FP Rate	ROC Area
۱	۰/۸۹۱	۰/۱۱۷	۰/۹۸۴	۰/۰۰۱	۱/۰۰۰	۰/۹۴۳	۰/۱۰۰	۰/۹۹۲	۰/۰۰۱	۱/۰۰۰
۲	۰/۷۶۲	۰/۱۶۷	۰/۹۶۱	۰/۰۰۳	۱/۰۰۰	۰/۸۹۱	۰/۱۰۴	۰/۹۸۴	۰/۰۰۱	۱/۰۰۰
۳	۰/۷۶۲	۰/۱۸۶	۰/۹۶۱	۰/۰۰۳	۱/۰۰۰	۰/۸۴۵	۰/۱۰۹	۰/۹۷۶	۰/۰۰۲	۱/۰۰۰
۴	۰/۷۲۶	۰/۱۹۸	۰/۹۵۳	۰/۰۰۴	۱/۰۰۰	۰/۸۴۵	۰/۱۱۵	۰/۹۷۶	۰/۰۰۲	۱/۰۰۰
۵	۰/۶۹۲	۰/۲۱۰	۰/۹۴۵	۰/۰۰۴	۱/۰۰۰	۰/۸۴۵	۰/۱۲۲	۰/۹۷۶	۰/۰۰۲	۱/۰۰۰
۶	۰/۶۹۲	۰/۲۱۱	۰/۹۴۵	۰/۰۰۴	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۰۹۳	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰
۷	۰/۶۹۲	۰/۲۰۱	۰/۹۴۵	۰/۰۰۴	۱/۰۰۰	۰/۸۹۱	۰/۱۰۱	۰/۹۸۴	۰/۰۰۱	۱/۰۰۰
۸	۰/۶۶۱	۰/۲۲۷	۰/۹۳۷	۰/۰۰۵	۰/۹۹۸	۰/۸۹۱	۰/۱۳۲	۰/۹۸۴	۰/۰۰۱	۰/۹۹۷
۹	۰/۶۶۱	۰/۲۳۸	۰/۹۳۷	۰/۰۰۵	۰/۹۹۸	۰/۸۹۱	۰/۱۳۰	۰/۹۸۴	۰/۰۰۱	۰/۹۹۵
۱۰	۰/۶۶۱	۰/۲۴۸	۰/۹۳۷	۰/۰۰۵	۰/۹۹۸	۰/۸۹۱	۰/۱۳۶	۰/۹۸۴	۰/۰۰۱	۰/۹۹۶
۱۱	۰/۵۲۶	۰/۲۹۱	۰/۹۰۶	۰/۱۱۰	۰/۹۲۱	۰/۸۹۱	۰/۱۱۳	۰/۹۸۴	۰/۰۰۱	۰/۹۹۸
۱۲	۰/۵۰۳	۰/۲۹۸	۰/۸۹۸	۰/۱۱۰	۰/۹۲۲	۰/۸۲۹	۰/۱۳۰	۰/۹۷۶	۰/۱۰۴	۰/۹۹۵
۱۳	۰/۸۴۵	۰/۱۳۸	۰/۹۷۶	۰/۰۰۲	۰/۹۹۹	۰/۸۹۱	۰/۱۱۳	۰/۹۸۴	۰/۰۰۱	۰/۹۹۷
۱۴	۰/۷۶۲	۰/۱۵۴	۰/۹۶۱	۰/۰۰۳	۰/۹۹۷	۰/۸۸۰	۰/۱۰۵	۰/۹۸۴	۰/۱۰۴	۰/۹۹۶
۱۵	۰/۷۶۲	۰/۱۷۶	۰/۹۶۱	۰/۰۰۳	۱/۰۰۰	۰/۸۹۱	۰/۰۹۱	۰/۹۸۴	۰/۰۰۱	۱/۰۰۰
۱۶	۰/۷۲۶	۰/۱۹۸	۰/۹۵۳	۰/۰۰۴	۱/۰۰۰	۰/۸۹۱	۰/۰۹۰	۰/۸۹۴	۰/۰۰۱	۱/۰۰۰

همان‌گونه که از جدول ۴ مشخص است، استفاده از روش ترکیبی Dagging باعث بهبود نتایج درخت هوفدینگ شده است. در روش HT سناریو اول شامل TH بالاترین دقت را دارد. با بهره‌گیری از روش Dagging مقدار کاپا در سناریوی اول از ۰/۸۹۱ به ۰/۹۴۳ افزایش یافته است. در حالت کلی از بین دو روش و ۱۶ سناریوی مورد مطالعه، سناریوی ۶ روش Dagging با الگوریتم پایه HT شامل TH, EC, TDS, SO_4, Ca, HCO_3 و Kappa = 1، RMSE = 0.093، TPR = 1، FPR = 0 و ROC Area = 1 بهترین عملکرد را داشته است. شکل ۴ نمودار ستونی مقادیر Kappa و TPR روش‌های HT و D- HT را نشان می‌دهد.



شکل ۴- نمودار ستونی مقادیر کاپا و نرخ مثبت صحیح روش‌های مورد مطالعه

برتر بودن سناریوی ۱ در روش HT و سناریوی ۶ در روش D- HT از نمودارهای شکل ۴ نیز مشهود است. جدول‌های ۵ و ۶ ماتریس اغتشاش به‌دست آمده از نتایج سناریوهای برتر هر دو روش مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این جدول‌ها نحوه توزیع نمونه‌ها در بین کلاس‌های مختلف را نشان می‌دهد. چنان‌چه نمونه‌ای در این جدول‌ها خارج از قطر اصلی قرارگیرد، به این معنی است که در کلاس اشتباهی طبقه‌بندی شده است. به‌عبارت دیگر، هر چه تعداد نمونه‌ها در قطر اصلی بیشتر باشد، دقت و کارایی مدل در تخمین کلاس موردنظر، بیشتر می‌شود.

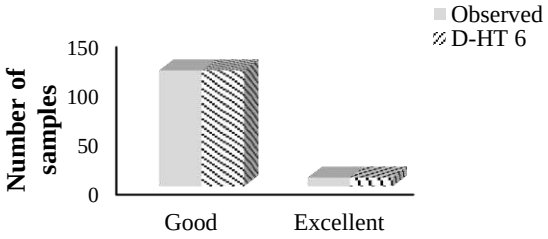
جدول ۵- ماتریس اغتشاش سناریو برتر روش HT

		طبقه‌بندی شده با مدل	
		خوب	عالی
واقعی	خوب	۱۱۶	۲
	عالی	۰	۹

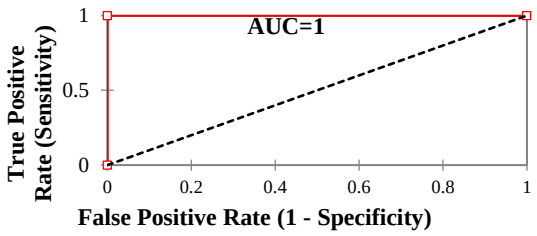
جدول ۶- ماتریس اغتشاش سناریو برتر روش D- HT

		طبقه‌بندی شده با مدل	
		خوب	عالی
واقعی	خوب	۱۱۸	۰
	عالی	۰	۹

با توجه به جدول ۵، از بین ۱۲۷ نمونه آزمایشی، تنها ۲ نمونه به اشتباه طبقه‌بندی شده است. یعنی به‌جای کلاس کیفی خوب (II)، در کلاس عالی (I) قرارگرفته است. اما در روش D-HT6 که ماتریس اغتشاش آن در جدول ۶ مشخص شده است، تمام نمونه‌ها در کلاس صحیح، طبقه‌بندی شده‌اند. شکل ۵ نیز توزیع سه‌بعدی کلاس کیفی آب برای داده‌های مشاهداتی و مدل D- HT6 برای دوره آزمون را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش Dagging عملکرد خوبی در برآورد مقادیر کیفی WQI داشته و باعث بهبود نتایج شده است. منحنی راک سناریو و روش برتر معرفی شده در پژوهش حاضر در شکل ۶ مشخص شد.



شکل ۵- توزیع سه‌بعدی کلاس کیفی آب برای داده‌های مشاهداتی و مدل D- HT6 برای دوره آزمون



شکل ۶- منحنی راک روش D- HT6

هنگامی‌که حساسیت افزایش پیدا کند، نرخ مثبت کاذب نیز افزایش خواهدیافت. بنابراین در منحنی راک امکان مقایسه نرخ مثبت صحیح و نرخ مثبت کاذب، در هر نقطه بر روی منحنی وجود دارد. سطح زیر منحنی نشان‌دهنده کیفیت مدل‌های مورد مطالعه است. هرچه نرخ مثبت صحیح یا حساسیت بیشتر باشد، بدین معنی است که نمونه‌ها به‌درستی طبقه‌بندی شده‌اند. در نتیجه سطح زیر منحنی بیشتر شده و به ۱۰۰ درصد خواهد رسید. با توجه به توضیحات فوق و شکل ۶، چون سطح زیر منحنی برابر با یک شده است، می‌توان نتیجه گرفت که روش مورد استفاده دقت بالایی داشته است.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، کلاس کیفی آب ایستگاه هیدرومتری باغ کلایه مورد بررسی قرارگرفت. ابتدا مقادیر عددی کیفی شاخص WQI آب براساس داده‌های مشاهداتی شده پارامترهای شیمیایی محاسبه و براساس استانداردهای موجود، کلاس کیفیت آب شرب مشخص شد. برای طبقه‌بندی کیفی آب از ۱۲ پارامتر شیمیایی شامل pH، EC، TDS، Ca، Na، Mg، K، Cl، CO_3، HCO_3 و SO_4 در دوره آماری ۲۳ ساله در سناریوهای مختلف استفاده شد. طبقه‌بندی کلاس کیفی آب با روش درخت هوفدینگ انجام شد. در مدل‌سازی کیفی، تاثیر روش ترکیبی Dagging با الگوریتم پایه درخت هوفدینگ در بهبود نتایج، مورد ارزیابی قرارگرفت. برای انتخاب روش و سناریو برتر از آماره کاپا و منحنی راک استفاده شد. در مدل‌سازی کیفی بهره‌گیری از روش Dagging باعث افزایش دقت و کاهش خطا شد. در طبقه‌بندی کلاس کیفی آب شرب، سناریوی ۶ روش D-HT شامل پارامترهای TH, EC, TDS, SO_4, Ca, HCO_3 از دقت قابل‌توجهی برخوردار بود و توانست تمام نمونه‌ها را در کلاس کیفی صحیح، طبقه‌بندی کند. بنابراین این روش توانست به‌جای استفاده از ۱۲ پارامتر شیمیایی، تنها با استفاده از ۶ پارامتر، با دقت مناسبی کلاس کیفی تمام نمونه‌های ایستگاه مورد مطالعه را به‌درستی، طبقه‌بندی کند. با توجه به این‌که تمام روش‌های مورد استفاده در طبقه‌بندی کلاس کیفی، دقت قابل‌قبولی داشتند، لذا در صورت کمبود داده و عدم دسترسی به تمام پارامترهای شیمیایی، می‌توان با استفاده از تعداد محدودی از پارامترها و با بهره‌گیری از روش‌های داده‌کاوی، نتایج مناسب و قابل‌قبولی را به‌دست آورده و کلاس کیفیت آب شرب را طبقه‌بندی نمود. نتایج به‌دست آمده نشان داد؛ آب منطقه مورد مطالعه از کیفیت قابل‌قبولی برای شرب برخوردار است.

۵- پی‌نوشت‌ها

1- Data Mining
2- Decision Tree
3- Support Vector Machine
4- Electrical Conductivity
5- Sodium Absorption Ratio
6- Probabilistic Neural Network
7- Principal Component Regression
8-Gradient Boosting Classifier Approach
9- Reduced Error Pruning Tree
10- Extreme Gradient Boosting
11- Water Quality Index
12- Total Dissolved Solids
13- Relief
14- Hoeffding Tree
15- True Positive Rate
16- False Positive Rate

۶- مراجع

جاویدان، س.، ستاری، م. ت.، کریم‌زاده، پ.، و مهرابی، ا.، (۱۴۰۱)، "تحلیل عملکرد روش‌های هیدرولوژیکی و داده-مبنا در برآورد میزان رسوب معلق"، *مجله محیط‌زیست و مهندسی آب*، ۸(۲)، ۴۸۰-۴۶۸، https://doi.org/10.22034/jewe.2021.305599.1632.

دزفولی، د.، موغاری، م.ح.، ابراهیمی، ک.، و عراقی‌نژاد، ش.، (۱۳۹۶)، "تعیین طبقه‌بندی کیفی آب بر اساس حداقل پارامترهای کیفی (مطالعه موردی: رودخانه کارون)"، *محیط‌زیست طبیعی، مجله منابع طبیعی ایران*، ۷۰(۳)، ۵۹۵-۵۸۳، https://doi.org/10.22059/jne.2017.213338.1224.

ستاری، م. ت.، میرعباسی، ر.، و عباسقلی نایب‌زاد، م.، (۱۳۹۶)، "استفاده از داده‌کاوی در پیش‌بینی کیفیت آب‌های سطحی (مطالعهٔ موردی: رودخانه‌های دامنهٔ شمالی سهند)"، *اکوهیدرولوژی*، ۴(۲)، ۴۰۷-۴۱۹، https://doi.org/10.22059/ije.2017.61477.

Babar, R., and Babar, S., (2017), "Predicting river water quality index using data mining techniques", *Environmental Earth Sciences*, 76(504), 1-15, https://doi.org/10.1007/s12665-017-6845-9.

Domingos, P., and Hulten, G., (2003), "A general framework for mining massive data streams", *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 12(4), 945-949, https://doi.org/10.1198/1061860032544.

Elish, M., and Elish, K., (2021), "An empirical comparison of resampling ensemble methods of deep learning Neural Networks for cross-project software defect prediction", *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 14(3), 201-209, https://doi.org/10.22266/ijies2021.0630.18.

Ting, K.M., and Witten, I.H., (1997), "Stacking bagged and dagged models", In: *Fourteenth International Conference on Machine Learning*, San Francisco, CA, pp. 367-375.

Yusri, H., Ab Rahim, A., Hassan, S., Halim, I., and Abdullah, N., (2022), "Water quality classification using SVM and XGBoost method", *IEEE 13th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*, pp. 231-236, https://doi.org/10.1109/ICSGRC55096.2022.9845143.

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

Gakii, C., and Jepkoech, J., (2019), "A classification model for water quality analysis using desision tree", *European Journal of Computer Science and Information Technology*, 7(3), 1-8.

Hall, M.A., (1999), "Correlation-based feature selection for machine learning", Ph.D. Thesis, University of Waikato.

Khan, M.S.I., Islam, N., Uddin, J., Islam, S., and Nasir, M.K. (2022). Water quality prediction and classification based on principal component regression and gradient boosting classifier approach. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 34(8), 4773-4781, https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.06.003

Kavita, D., and Jagdish, S., (2012), "Water resources management and water quality, case of Bhopal", *International Conference on Chemical, Ecology and Environmental Sciences*, Bangkok.

Khalil, B., Ouarda, T., and St-Hilaire, A., (2011), "Estimation of water quality characteristics at ungauged sites using artificial neural networks and canonical correlation analysis", *Journal of Hydrology*, 405, 277-287, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.024.

Kira, K., and Rendell, L. A., (1992), "The Feature Selection Problem: Traditional methods and a new algorithm", *Proceedings of the 10th National Conference on Artificial intelligence*, 129-134.

Kotsianti, S.B., and Kanellopoulos, D., (2007), "Combining bagging, boosting and dagging for classification problems", In: Apolloni, B., Howlett, R.J., Jain, L. (eds.), *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, KES* 2007, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4693, Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74827-4_62.

Kotti, M.E., Vlessidis, A.G., Thanasoulias, N.C., and Evmiridis, N.P., (2005), "Assessment of river water quality in Northwestern Greece", *Water Resources Manag*ement, 19, 77-94, https://doi.org/10.1007/s11269-005-0294-z.

Meddouri, N., Khoufi, H., and Maddouri, M., (2021), "A performant dagging approach of classification based on formal concept", *International Journal of Artificial Intelligence and Machine Learning (IJAIML)*, 11(2), 38-62, http://doi.org/10.4018/IJAIML.20210701.oa3.

Mehta, V., and Sanghavi, V., (2019), "Comparative study of various decision tree methods for data stream mining", In: *3rd International Conference on Information and Communication Technology* (ICICT), Springer International Publishing, pp. 371-379, https://doi.org/10.1007/978-981-13-1165-9_34.

Sattari, M.T., Feizi, H., Colak, M., Ozturk, A., Ozturk, F., and Apaydin, H., (2021), "Surface water quality classification using data mining approaches: Irrigation along the Aladag River", *Irrigation and Drainage*, 70(5), 1227-1246, https://doi.org/10.1002/ird.2594.

Singh, D.F, (1992), "Studies on the water quality index of some major rivers of Pune, Maharashtra", *Proceedings of the Academy of Environmental Biology* 1, 61-66.

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 8, No. 3, PP. 35-46, Autumn 2023
DOI: 10.22112/JWWSE.2023.366738.1331

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال هشتم، شماره ۳، صفحات ۳۵-۴۶، پاییز ۱۴۰۲

Research Paper

Measuring and Evaluating Water-Energy Nexus in Iran's Electricity Export and Import Using Virtual Water Approach

Morteza Tahamipour Zarandi[1*] and Erfan Esmaiel Zadeh Hanjani[2]
1- Assistant Professor, Faculty of Economics and Political Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2- M.Sc., Faculty of Economics and Political Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
* Corresponding Author, Email: m_tahami@sbu.ac.ir

Received: 16/11/2022
Revised: 26/01/2023
Accepted: 31/01/2023
© IWWA

Abstract

Iran is facing limited water resources and all production and service processes require the use of water, so it is very important to evaluate the state of water consumption of activities and provide methods for its optimization. So, the aim of the present study is to evaluate the water consumption in the production of each kilowatt hour of electricity and to examine the virtual water situation in the process of exporting and importing electricity in Iran. For this purpose, two methods of structural path analysis and technical-basic approach have been used. The results showed that the country's power plants directly consume 1.5 liters of water per kilowatt hour of electricity production. Also, according to the results of the structural path analysis method, in the electricity production chain before reaching the power plant, 2.5 liters of water is indirectly consumed per kilowatt hour of electricity, and therefore the entire chain consumes 4 liters of water per kilowatt hour. Of the total water consumed in the electricity production chain, which is more than one billion cubic meters, 38% of it was consumed directly in power plants and the other 62% in the production chain.

Keywords: Special Water Consumption, Water-Energy Nexus, Virtual Water, Electricity Industry, Iran.

مقاله پژوهشی

ارزیابی پیوند آب-انرژی در صادرات و واردات برق ایران با استفاده از رویکرد آب مجازی

مرتضی تهامی‌پور زرندی[۱*] و عرفان اسمعیل‌زاده هنجنی[۲]
۱- استادیار دانشکده اقتصاد و علوم سیاسی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۲-دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده اقتصاد و علوم سیاسی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: m_tahami@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۵
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۱/۱۱/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

کشور ایران با محدودیت منابع آب مواجه است و از طرفی همه فرایندهای تولیدی و خدماتی نیازمند استفاده از آب است. لذا ارزیابی وضعیت آب‌بری فعالیت‌ها و ارائه روش‌های بهینه‌سازی آن اهمیت بسیار زیادی دارد. بر این اساس، هدف مطالعه حاضر ارزیابی آب مصرفی در تولید هر کیلووات ساعت برق و بررسی وضعیت آب مجازی در فرایند صادرات و واردات برق ایران است. برای این منظور از دو روش تحلیل مسیر ساختاری و رهیافت فنی-پایه استفاده شده است. نتایج نشان داد که نیروگاه‌های کشور به‌طور متوسط به‌ازای تولید هر کیلووات ساعت برق، ۱/۵ لیتر آب به‌طور مستقیم مصرف می‌کنند. هم‌چنین طبق نتایج روش تحلیل مسیر ساختاری، در زنجیره تولید برق تا قبل از رسیدن به نیروگاه، به ازای هر کیلووات ساعت برق، ۲/۵ لیتر آب به‌طور غیرمستقیم مصرف می‌شود. لذا کل زنجیره، ۴ لیتر آب به‌ازای هر کیلووات ساعت تولید برق، مصرف می‌کند. از کل آب مصرف شده در زنجیره تولید برق که بیش از یک میلیارد متر مکعب است، ۳۸٪ آن مستقیماً در نیروگاه‌ها و ۶۲٪ دیگر آن در زنجیره تولید، مصرف شده است.

کلمات کلیدی: مصرف آب ویژه، پیوند آب-انرژی، آب مجازی، صنعت برق، ایران.

۱- مقدمه

رشد سریع جمعیت و افزایش شهر نشینی در چند دهه گذشته باعث شده دولت‌ها بیش از پیش به فکر کنترل و بهینه‌سازی مصارف منابع طبیعی و انواع انرژی بیفتند. به‌خصوص در کشورهای درحال توسعه، مسئله کمبود منابع برای برطرف کردن نیازهای جمعیت روزافزون این کشورها بیشتر به‌چشم می‌خورد. در این حین، کمبود منابع آب شیرین و بحران آب در جهان باعث شده از بین منابع طبیعی، به منابع آبی توجه بیشتری شود. مدیریت بهینه منابع آب در جهان تامین کننده امنیت غذایی، معیشت افراد، توسعه صنعتی و پایداری محیطزیست است (محمدجانی و یزدانیان، ۱۳۹۳). سازمان همکاری اقتصادی و توسعه[1] در سال ۲۰۱۱ گزارشی منتشر کرد که در آن میزان افزایش تقاضا آب را تا سال ۲۰۵۰ ، ۵۰ درصد برآورد کرده است. انتظار می‌رود در آینده نزدیک بیش از ۴۰ درصد جمعیت جهان تحت فشار تنش شدید آب قرارگیرند (UNESCO, 2014). براساس شاخص سازمان ملل[2] برای ارزیابی وضعیت منابع آب کشورها، کشوری با بحران شدید منابع آب مواجه است که میزان برداشت آب آن کشور بیش از ۴۰ درصد کل منابع تجدیدپذیر آن کشور باشد. براساس این شاخص ایران با برداشت ۷۲/۳ درصدی منابع آب تجدیدپذیر خود، با بحران شدید آب مواجه است (محمدجانی و یزدانیان، ۱۳۹۳). لذا اهمیت پژوهش بیشتر و عمیق‌تر در زمینه آب با توجه به شرایط رشد جمعیت و رشد نیاز به منابع، بر هیچ‌کس پوشیده نیست. این درحالی است که امروزه با پیشرفت تکنولوژی و ایجاد نیاز به استفاده بیشتر از آن برای همه افراد، تقاضا برای برق همواره رو به افزایش است و چون به‌راحتی به سایر شکل‌های انرژی تبدیل می‌شود، این تقاضا بیشتر شدت گرفته است. با توجه به این‌که برق همانند سایر اشکال انرژی قابل ذخیره‌سازی نیست، لذا تولید و مصرف برق هم‌گام هستند. مجموع تولید برق از ۶،۱۱۶ تراوات ساعت در سال ۱۹۷۳ به ۲۰،۱۸۱ تراوات ساعت در سال ۲۰۰۸ افزایش یافته است، یعنی طی ۳۵ سال ۳/۳ برابر شده است. این امر بدان معنی است که تولید برق در جهان به‌طور متوسط سالانه ۳/۴۷ درصد افزایش یافته است (طبیبی، ۱۳۹۰).

در حال‌حاضر برق پس از نفت دارای بیشترین سهم در سبد مصرف انرژی جهان است و به‌دلیل این‌که نسبت به سایر حامل‌های انرژی پاک‌تر بوده و بیشتر در دسترس است، تقاضا برای مصرف آن همواره رو به افزایش است (طبیبی، ۱۳۹۰). طبق گزارش آمار کلیدی انرژی جهان[3] ۲۰۱۰، در سال ۱۹۷۳، ۹/۴ درصد از کل انرژی مصرف شده در جهان را برق تامین کرده و در سال ۲۰۰۸ این نسبت به ۱۷/۲ درصد رسیده است. صادرات برق به‌عنوان انرژی طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۶ به‌طور کلی دارای یک روند صعودی بوده و به‌طور متوسط سالانه ۱۴ درصد رشد داشته است. با استناد به آمار تفصیلی صنعت برق ایران، صادرات برق در سال ۱۳۹۶ میزان ۸.۱۷۲ میلیون کیلووات ساعت و میزان واردات در همین سال ۳.۸۵۲ میلیون کیلووات ساعت بوده است. در نتیجه می‌توان گفت خالص صادرات حاصل از تبادل انرژی برق ایران در سال ۱۳۹۶ برابر ۴.۳۲۰ میلیون کیلووات ساعت بوده است. براساس اطلاعات ارائه شده در لایحه بودجه سال ۱۳۹۹، درآمد حاصل از صادرات برق با رشدی ۱۰۰ درصدی نسبت به سال قبل به ۸۸ هزار و ۸۰۰ میلیارد تومان رسیده است.

آب مجازی، به‌میزان آب مصرف شده در فرآیند تولید هر کالایی گفته می‌شود. اما در چند دهه گذشته، ایده‌پردازان آب مجازی صرفاً به بررسی فرآیند تولید کالاها بسنده نکرده‌اند، بلکه به‌دنبال ردپای آب در تولید دیگر انرژی‌ها نیز بوده‌اند. این بررسی‌ها منجر به ورود مفاهیم جدیدی مانند همبست یا پیوند آب-انرژی به علم اقتصاد شده است. همبست یا پیوند آب-انرژی را می‌توان مفهومی که به بررسی ارتباط دو طرفه آب و انرژی یعنی آب مصرف شده در فرآیند تولید انرژی و انرژی به‌کار رفته در فرآیند تولید آب می‌پردازد، تعریف کرد. ایران از گذشته دارای مشکل کمبود آب بوده است. موقعیت جغرافیایی ایران باعث شده متوسط میزان بارندگی سالانه در آن ۲۵۰ میلی‌متر باشد، این یعنی در حدود یک سوم متوسط بارندگی سالانه در جهان. سهم ایران از منابع آب شیرین جهان نسبت به مناطق دیگر در سطح پایین‌تری قرار دارد. درحالی که ۱ درصد جمعیت جهان در ایران هستند، تنها ۰/۳ درصد از منابع آب شیرین جهان در اختیار ایران است (گرجیان، ۱۳۹۳). لذا مسئله آب همواره در ایران مورد اهمیت بوده است. در ایران میزان بارندگی سالانه معادل ۳۹۷/۹ میلیارد مترمکعب است که دو سوم آن قبل از رسیدن به رودخانه‌ها تبخیر می‌شود. منابع آب تجدیدپذیر داخلی سالانه معادل ۱۲۸/۵ میلیارد مترمکعب است و منابع آب تجدیدپذیر خارجی نیز سالانه ۹ میلیارد مترمکعب است. پس منابع آب تجدیدپذیر واقعی معادل ۱۳۷/۵ میلیارد مترمکعب سالانه است (FAO, 2014).

صنعت برق به‌عنوان صنعت زیربنایی و مادر نقش مهمی در توسعهٔ اقتصادی و رفاه جوامع دارد. طبق نشریه آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژه تولید نیروی برق در سال ۱۳۹۶، تولید کل برق در سال مذکور ۶/۵ درصد و سرانه تولید ۵/۲ درصد نسبت به

سال قبل افزایش داشته است. این آمار در دهه گذشته روند صعودی خودش را با همین شیب ادامه داده است (آمارنامه تفصیلی صنعت برق وزارت نیرو، ۱۴۰۰). ایران در سال ۲۰۱۷ رتبه شانزدهم تولید برق در دنیا و رتبه دوم منطقه پس از عربستان سعودی و رتبه هجدهم دنیا را در مصرف برق به‌خود اختصاص داده است (پایگاه خبری اتاق بازرگانی صنایع معادن و کشاورزی ایران، ۱۳۹۷).

با توجه به این مهم که ایران با محدودیت منابع آب مواجه است و از طرفی، نقش حساسی در تامین برق منطقه نیز دارد، بررسی تراز تجاری صنعت برق ایران با رویکرد آب مجازی مسئله روز و پر اهمیت کشور است و به‌عنوان هدف این مطالعه مدنظر قرارگرفته است. در این راستا، فرضیه مطالعه که مورد آزمون قرار می‌گیرد آن است که فرایندهای نیروگاهی کشور از نظر مصرف آب پرمصرف هستند و نسبت به هزینه فرصتی که آب در مصارف مختلف به‌ویژه در صنعت و معدن و شرب و کشاورزی کشور دارد، تولید برق مازاد و صادرات آن از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه نیست. محدودیت مهم این مطالعه، فقدان اطلاعات دقیق در مورد مصرف آب در بخش‌های مختلف فرایند تولید و به تفکیک نیروگاه‌های مختلف در کشور است که نویسندگان با توجه به فقدان این داده مجبور به شبیه‌سازی از نیروگاه‌های مشابه با تکنولوژی یکسان در سایر مناطق جهان شده‌اند. در این ارتباط مطالعاتی نیز قبلاً انجام شده که به‌دقت مورد تحلیل قرارگرفت. از جمله این مطالعات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

شاید مرتبط‌ترین مطالعه داخلی در این زمینه مطالعه عیسی‌پور و عابدی (۱۳۹۳) باشد. در این مطالعه که نیروگاه‌های شهر تهران را مورد بررسی قرارداده است، با بررسی هشت نیروگاه برق و منابع آبی مورد استفاده این نیروگاه‌ها آب مصرف شده به‌ازای هر مگاوات ساعت برق تولید شده محاسبه شده است. براساس این مطالعه اگر میانگین وزنی‌ای از آب مصرفی نیروگاه‌ها با توجه به ظرفیت هر نیروگاه گرفته شود، میزان آب مجازی در برق در استان تهران بیش از ۸۰۰ لیتر به ازای تولید هر مگاوات ساعت برق است. Chen et al. (2019) در مطالعه‌ای با تاکید بر این مسئله که انرژی، آب و محیط‌زیست منابعی جدایی ناپذیر هستند، با استفاده از الگوی ARIMA این پیوند سه‌گانه را به‌طور کمی بررسی کردند. در مرحله اول میزان کل آب مصرفی برای تولید انرژی را تخمین زده و در مرحله دوم میزان آب مصرفی به ازای هر کیلووات ساعت برق تولید شده را به‌دست آوردند. Larsen and Drews (2019) پیوند آب-انرژی را در قاره اروپا مورد مطالعه قراردادند. در این مقاله میزان آب مجازی مبادله شده از طریق برق در بین این کشورها تخمین زده شد. این مطالعه که بازه زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵ را مورد بررسی قرارداده است شاخص‌های مختلفی از مصرف آب در سیستم تولید برق در اروپا را بررسی و براساس تکنولوژی نیروگاه‌ها آن‌ها را دسته‌بندی کرده است. در این مطالعه اطلاعات بیش از ۲۰ مقاله در حوزه آب مجازی در عملیات در تولید برق استفاده شده است. Hasanzadeh et al. (2022)، پیوند آب-انرژی-غذا را با توجه به انتشار CO_2 از زمین‌های زراعی در شمال غرب ایران بهینه‌سازی کردند. نتایج ارزیابی‌های بهینه‌سازی برای شناسایی الگوی کشت بهینه، با تاکید بر به حداقل رساندن انتشار CO_2، نشان‌داد که جو، کلزا، ذرت سیلو و گندم در شرایط مورد مطالعه بهترین عملکرد را داشته‌اند. Terrapon et al. (2020) در مطالعه‌ای سناریوهای مختلف تقاضا آب برای تولید برق در سطح بین‌المللی و منطقه‌ای را بررسی کردند. طبق این مطالعه میزان آب مصرف شده برای تولید برق به سه مورد بستگی دارد. اول نوع سوخت مصرفی یا ترکیب سوخت‌های مصرف شده در نیروگاه، دوم سیستم خنک‌کننده نیروگاه و در آخر کشش مصرف آب برای هر ترکیب از دو مورد قبلی. این مطالعه سه سناریو برای سال‌های ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰ ارائه داده و پیش‌بینی کرده است که اگر از انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق استفاده شود تا سال ۲۰۵۰ می‌توان گازهای گلخانه‌ای را در مقایسه با سال ۱۹۹۰ تا ۶۱ درصد کاهش داد. در همه این سناریوها بررسی شده که میزان آب مصرفی برای تولید برق چگونه تغییر می‌کند و براساس آن در سال ۲۰۵۰ نسبت به سال ۱۹۹۰ می‌توان آب مصرفی را تا ۷۲ درصد کاهش داد.

اکثر مطالعات انجام شده تمرکز روی آب مجازی مبادله شده در محصولات کشاورزی داشتند و کمتر روی آب مجازی و تحلیل آن در صنعت و به‌ویژه صنعت برق ایران بحث شده است. مطالعاتی که آب مجازی را در صنعت برق در ایران بررسی کرده‌اند محدود به یک استان یا منطقه‌ای خاص بوده و مطالعه جامعی در شبکه سراسری برق تاکنون در ایران صورت نگرفته است. در مطالعات خارجی برخلاف مطالعات داخلی بحث ردپای آب و آب مجازی در صنعت بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در این دسته مطالعات، علاوه بر تقسیم‌بندی‌های دقیق‌تر در نوع نیروگاه‌ها و داده‌های بسیار شفاف‌تر از مصرف آب و سوخت در نیروگاه‌ها، اطلاعات مبادله انرژی در میان شرکای تجاری کشورها نیز بررسی شده است.

۲-مواد و روش‌ها

به‌طور کلی در محاسبات مربوط به آب مجازی همواره از دو روش استفاده می‌شود: رهیافت تعادل فراگیر و رهیافت فنی-پایه (تهامی‌پور و همکاران، ۱۳۹۴). به‌طور خلاصه در رهیافت تعادل فراگیر، کل مسیر کالاهای واسطه و میزان مصرف آب در هر یک از مراحل تولید تا رسیدن به کالای نهایی با استفاده از ضرایب جدول داده ستانده، تعاملات بین بخش‌های مختلف صنایع بررسی و مجموع آب مصرفی محاسبه می‌شود. اما در رهیافت فنی-پایه تمرکز روی مرحله نهایی تولید است. البته نمی‌توان اذعان داشت که کدام روش دقت بیشتر یا کارایی بیشتری نسبت به روش دیگر دارد. هرکدام از این روش‌ها با توجه به موضوع مورد بررسی می‌توانند کارایی لازم را داشته باشند. در روش فنی-پایه می‌توان تراز تجاری آب مجازی را با توجه به‌میزان واردات و صادرات کالا یا انرژی مورد نظر دقیق‌تر بررسی کرد.

رهیافت فنی-پایه در واقع روشی آماری برای محاسبه آب مجازی هر کالا است. در این روش اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه آب مجازی محدود است. تنها داده‌های مورد نیاز، مقدار آب خریداری‌شده و یا مصرف‌شده صنعت و مقدار کل تولید همان صنعت است (تهامی پور و همکاران، ۱۳۹۶) که در رابطه (۱) نحوه محاسبه آن آمده است.

$$SWD_i = {PW_i}/{Y_i} \qquad (۱)$$

که SWD_i: متوسط آب مصرفی ویژه کالای iام، PW_i: آب خریداری یا مصرف‌شده توسط واحد صنعتی و Y_i: مقدار تولید واحد صنعتی یا نیروگاه است. با محاسبه متوسط آب مصرفی ویژه برای کلیه واحدهای صنعتی یا نیروگاه‌های مورد مطالعه، شاخص آب مصرفی هر کیلووات ساعت کالای برق با رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$TSWD_i = SWD_i \times TP_i \qquad (۲)$$

که TP_i: نمایان‌گر مقدار تولید برق و $TSWD_i$: بیانگر کل آبی است که باید مصرف شود تا یک کیلووات ساعت برق تولید شود و به آن آب مصرفی پایه هر واحد کالای iام اطلاق می‌شود. شاخص پایه آب مصرفی کل محصولات صادراتی برحسب مترمکعب با ضرب SWD در کل صادرات کالا و آب مصرفی پایه وارداتی نیز از ضرب SWD در کل واردات کالا به‌دست می‌آیند.

همان‌طور که در رابطه (۳) نشان‌داده شده است. بدیهی است که از تفاضل این دو مقدار، تراز خارجی تجارت آب مجازی حاصل می‌شود که می‌تواند بسته به دوره مورد بررسی مثبت، منفی یا صفر باشد.

$$TVW_\pi = WFP_{EX} - WFP_{IM} \qquad (۳)$$

که TVW_π: تراز تجاری آب مجازی و مقادیر WFP_{IM} و WFP_{EX}: نشان‌دهنده کل آب وارداتی و صادراتی از طریق کالاهای صنعتی هستند.

از جمله مطالعاتی که از این رهیافت استفاده کرده‌اند می‌توان به باغستانی و همکاران (۱۳۸۹) و تهامی‌پور و عابدی (۱۳۹۴) اشاره نمود. در رهیافت تعادل فراگیر ابتدا آب مصرفی برای تولید یک کالا به مصرف آب مستقیم و مصرف آب غیرمستقیم تفکیک می‌شود. مقداری از آب که به‌عنوان نهاده اولیه در فرآیند تولید مورد استفاده قرار می‌گیرد، مصرف آب مستقیم و مجموع آب استفاده شده برای تولید کالای واسطه‌ای، مصرف آب غیرمستقیم تعریف می‌شود. مجموع دو آب مستقیم و غیرمستقیم در واقع کل آب استفاده شده برای تولید کالا و خدمات در بخش موردنظر است که آب مجازی نامیده می‌شود. با استفاده از رابطه (۴)، برای هر بخش اقتصاد با در دست داشتن میزان کل تولید، TP_j و آب استفاده شده آن بخش، W_j می‌توان شاخصی به نام شدت استفاده از آب، f_j که در واقع ضریب فنی آب در جدول داده ستانده است را تعریف و محاسبه کرد (تهامی‌پور و همکاران، ۱۳۹۶).

$$f_j = \frac{w_j}{TP_j} \qquad (۴)$$

حال با درنظر گرفتن این موضوع که آب غیرمستقیم ورودی به‌هر بخش در واقع قسمتی (مجموع وزنی) از آب مستقیم دیگر بخش‌ها است، با استفاده از معکوس ماتریس لئونتیف ($(I-A)^{-1}$) میزان آب مستقیم هر بخش که به‌صورت غیرمستقیم در بخش‌های دیگر مصرف می‌شود را می‌توان استخراج کرد. سپس با جمع مصرف مستقیم و غیرمستقیم آب، میزان آب مصرفی کل به‌ازای هر واحد کالا محاسبه می‌شود. در واقع، $(I-A)^{-1}$ به‌عنوان ضریب تکاثرکل اقتصاد برای وزن‌دهی و محاسبه کل آب استفاده شده برای تولید هر واحد کالا و خدمات در اقتصاد استفاده می‌شود. پس مقدار خالص صادرات آب مجازی طبق رابطه (۵)، قابل محاسبه است.

$$\begin{aligned} f_j^t &= f_j^d \sum_{i=1}^{n} a_{ij} f_j^t \\ f_t &= f_j + f_t x A \\ f_t - f_t x A &= f_j \\ f_t(I-A) &= f_j \\ f_t &= f_j(I-A)^{-1} \end{aligned} \qquad (۵)$$

که j: فعالیت اقتصادی مورد نظر، n: تعداد فعالیت‌های اقتصادی در اقتصاد و i: نماینده رشته فعالیت‌های اقتصادی است. پس عنصر iام از کل f_t بردار ضریب مقدار کل (مستقیم و غیرمستقیم) آب در هر واحد استفاده نهایی از کالای بخش iام است. با ضرب‌کردن این ماتریس در میزان کل تولید می‌توان به‌مقدار تجارت آب مجازی دست‌یافت. از جمله مطالعاتی که از این رهیافت برای محاسبات آب مجازی خود استفاده کردند می‌توان به Liao et al. Feng et al. (2019); (2018); lu et al. (2019) و Honga et al. (2019) اشاره کرد.

برای محاسبه کل آب مصرفی در تولید برق در هر نوع نیروگاه می‌توان از روش SPA[۴] (Feng et al., 2019) استفاده کرد. روش SPA یا روش تحلیل مسیر ساختاری که براساس تئوری تقریب سری قدرت بنا شده است، با تجزیه اثرات مستقیم و غیرمستقیم، انتقال محیطی را در فرآیند بالادست بررسی می‌کند (Honga et al., 2019). این روش از گسترش رابطه (۶) به‌دست می‌آید که همان رابطه اصلی رهیافت تعادل فراگیر (رابطه (۵)) است (Feng et al., 2019).

$$e = w(I - A)^{-1}Y \qquad (۶)$$

جمله‌های $(I - A)^{-1}$ در هر دو رابطه (۵) و (۶) یکسان است. e همان f_t است و w همان f_j است. تنها تفاوت دو رابطه، Y است که ماتریس کل تولید کدهای فعالیت‌های اقتصادی است. براساس رابطه (۶)، روش تحلیل مسیر ساختاری در قالب روابط (۷) و (۸) به‌صورت زیر گسترش می‌یابد.

$$e = w(I + A + A^{۲} + A^{۳} + \cdots)Y = wY + wAY + wA^{۲}Y \qquad (۷)$$

$$+$$

$$e = PL_{.} + PL_{۱} + PL_{۲} + \cdots \qquad (۸)$$

در سمت راست رابطه (۷) هر جمله به‌عنوان یک لایه از تولید درنظر گرفته می‌شود که در رابطه (۸)، PL[۵] نام‌گذاری شده است. لایه صفر در واقع آب مستقیم مورد استفاده در تولید و لایه‌های بعدی آب غیرمستقیم مورد استفاده در مراحل مختلف تولید است. e: کل آب مجازی، مجموع آب مستقیم و غیرمستقیم استفاده شده در فرآیند تولید کالا است. w: شدت آب مجازی برای تولید یک کالا، y: تقاضای نهایی برق و A: ماتریس ضرایب فنی است که در رهیافت تعادل فراگیر نیز از آن استفاده می‌شود.

در این مطالعه با توجه به داده‌هایی که در دسترس هستند از رهیافت فنی-پایه استفاده می‌شود. اما برای افزایش دقت محاسبات به‌جای استفاده از یک نسبت کسری که فقط آب مجازی لایه نهایی محیط تولید را نشان می دهد، از شاخص SPA برای محاسبه آب مجازی در زنجیره تولید برق نیروگاه استفاده می‌شود. پس از محاسبه کل آب مجازی در تولید برق در هر نوع نیروگاه با استفاده از روش تحلیل مسیر ساختاری می‌توان لایه‌های تولید و میزان آب مصرف شده در هر لایه را جداگانه محاسبه و مورد بررسی قرار داد. تا این‌جا آب مصرفی هر نیروگاه براساس سوخت ورودی نیروگاه بررسی شده است. در ادامه به این سوال نیز پاسخ داده خواهد شد که با توجه با شرایط حال‌حاضر در نیروگاه‌های کشور به‌طور میانگین میزان مصرف آب برای تولید یک کیلووات ساعت برق در شبکه سراسری برق ایران چقدر است. برای این کار میانگین وزنی از میزان آب مصرف شده در هر نوع نیروگاه با توجه به نسبت برق تولیدی همان نوع نیروگاه به کل برق تولید شده در کشور محاسبه خواهد شد. در واقع این میانگین وزنی، میانگین آب مجازی به ازای هر کیلووات ساعت برق در کل شبکه برق کشور است (رابطه (۹)).

$$W_a = \frac{\sum E_i w_i}{\sum w_i} \qquad (۹)$$

که W_a: میانگین وزنی آب مصرف‌شده در نیروگاه‌هایی که برق آن‌ها وارد شبکه سراسری برق شده است، E_i: میزان برق تولید شده در نیروگاه نوع iام و w_i: نسبت برق تولید شده توسط همه نیروگاه‌های نوع i به کل برق وارد شده به شبکه برق سراسری است.

در ادامه نیز مطابق رهیات فنی-پایه تجارت برق از دیدگاه آب مجازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از این روش شبکه تولید برق به‌صورت یک‌پارچه بررسی و تجارت برق ایران تحلیل می‌شود. با مقایسه قیمت برق و هزینه فرصت آب در صنعت، می‌توان درباره توجیه‌پذیری صادرات برق ایران از دیدگاه آب مجازی اظهارنظر کرد.

برای بررسی پیشینه تحقیق و مباحث نظری از روش کتابخانه‌ای برای جمع آوری اطلاعات استفاده شده است. داده‌های مربوط به میزان واردات و صادرات برق ایران، انواع نیروگاه‌های موجود در کشور و میزان آب مصرفی طی فرآیند تولید برق در انواع نیروگاه‌ها از ترازنامه انرژی، بانک اطلاعات سری زمانی بانک مرکزی و مراجعه به مراجع آماری رسمی جمع آوری شده است. با توجه به‌روش مورد استفاده در این مطالعه، داده‌های مورد نیاز از بانک داده‌های سری زمانی بانک مرکزی و آمارنامه تفصیلی شرکت توانیر استفاده شده است. داده‌های شدت آب مصرفی نیز از مطالعه نصراللهی و رازعی (۱۳۹۶) که فعالیت‌های اقتصادی

ایران را به ۲۷ بخش تقسیم کرده و شدت آب هر بخش را جداگانه محاسبه کرده‌اند گرفته‌شده است. داده‌های مورد بررسی که مربوط به دهه گذشته است به‌جز در روش تحلیل مسیر ساختاری، چون از جدول داده ستانده استفاده شده به‌اجبار محاسبات محدود به سال ۱۳۹۵ است. بقیه داده‌ها نیز از آمارنامه تفصیلی شرکت برق برداشته شده است. در جدول ۱ خلاصه داده‌های استخراج شده از مطالعات خارجی آمده است. چون در ایران داده‌ای مبنی بر میزان آب مصرف شده در نیروگاه‌ها وجود نداشت، بیش از ۱۵ مطالعه خارجی مورد بررسی قرارگرفته و داده‌های مصرف آب در نیروگاه‌های خارجی استخراج شده است. سپس داده‌های نیروگاه‌هایی که تکنولوژی نزدیک‌تری به نیروگاه‌های ایران داشتند جدا شده و از آن‌ها به تفکیک سوخت مصرفی و سیستم خنک‌کننده، میانگین گرفته شده است که خلاصه آن در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۱- خلاصه داده‌های استخراج شده از مطالعات خارجی مصرف آب در فرآیند تولید برق

نوع خنک‌کننده	سوخت مصرفی	مصرف آب (L/MWh)	میانگین L/Million KWh
گاز	یک بار گذر	۷۳۷,۹۰۰	۷۳۸
	برج خنک‌کننده	۱,۳۹۳,۱۰۰	۱,۳۹۳
میانگین		۱,۰۶۵,۵۰۰	۱,۰۶۶
گاز (سیکل ترکیبی)	یک بار گذر	۳۵۶,۵۰۰	۳۵۷
	برج خنک‌کننده	۸۵۸,۵۳۸	۸۵۹
میانگین		۶۰۷,۵۱۹	۶۰۸
نفت و فرآورده‌های نفتی	یک بار گذر	۷۵۵,۱۴۳	۷۵۵
	برج خنک‌کننده	۱,۴۷۵,۸۳۳	۱,۴۷۶
میانگین		۱,۱۱۵,۴۸۸	۱,۱۱۵
هسته‌ای	برج خنک‌کننده	۲,۳۷۱,۱۲۵	۲,۳۷۱
انرژی خورشیدی	-	۱۳,۰۰۰	۱۳
برقآبی	-	۱۲۲۴۴۶۶۷	۱۲۲۴۵

در مرحله بعد لایه‌های تولید مشخص شده است. لایه‌های مختلف تولید در صنعت برق ایران از ۸۹ بخش اقتصاد در جدول داده-ستانده استخراج شده است. زنجیره تولید در صنعت برق به چهار لایه تقسیم شده است. در لایه صفر نیروگاه‌ها درنظر گرفته شده و آخرین حلقه زنجیره تولید است. سه لایه بعدی آن به‌ترتیب از تولید، انتقال و توزیع برق، تعمیر و نصب و راه‌اندازی تجهیزات تا تولید سوخت و استخراج منابع و تولید ماشین‌آلات و در نهایت خدمات که بخش جدانشدنی در هر زنجیره تولید است مرتب شده است. تاثیر حلقه‌های دورتر کمتر درنظر گرفته می‌شود. در مرحله بعدی با استفاده از ضرب ماتریسی، میزان آب مصرف شده در هر حلقه جداگانه محاسبه شده است. ماتریس اول، ماتریس خطی $(1 \times n)$ شدت آب مجازی است که اعداد مربوط به هر لایه تولید در آن جایگذاری و مابقی درایه‌ها صفر گذاشته شده است. این ماتریس خطی در توان‌های ماتریس ضرایب مستقیم اقتصادی (nxn) ضرب می‌شود و حاصل آن که یک ماتریس خطی است در ماتریس تقاضای نهایی که یک ماتریس ستونی $(n \times 1)$ است ضرب می‌شود. حاصل این ضرب، یک عدد برای هر حلقه است که میزان مصرف آب آن حلقه را نشان می‌دهد. برای محاسبه لایه صفر که مصرف آب مستقیم است از نتایج روش فنی-پایه در محاسبات سال ۱۳۹۵ استفاده شده است. برای این‌که دید بهتری نسبت به نتایج به‌دست آمده در این محاسبات حاصل شود، کل آب مصرف شده در کشور در سال ۱۳۹۵ نیز از جدول داده ستانده استخراج شده‌است. برای این کار ماتریس سطری شدت آب در ماتریس ستونی تقاضا نهایی ضرب شده است.

۳- نتایج

ابتدا با استفاده از نتایج روش فنی-پایه، میزان آب صادر و وارد شده در قالب برق در دهه گذشته بررسی شده است. در جدول ۲ این خروجی‌ها به تفکیک آورده شده است. ابتدا میزان برق صادر و وارد شده از بانک اطلاعات سری زمانی بانک مرکزی استخراج شده و با استفاده از روش فنی-پایه، آب استفاده‌شده در تولید برق در صادرات و واردات به‌دست آمده است. در ستون انتهایی جدول درصد آب صادر و وارد شده از کل آب مصرف شده در تولید آورده

شده است. همان‌طور که مشخص است، بیشترین میزان آب صادر شده مربوط به سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ است که دلیل آن صرفاً افزایش صادرات نسبت به سال‌های دیگر بوده است.

جدول ۲- سری زمانی آب مجازی صادراتی و وارداتی در قالب برق در ایران

سال	واردات برق (میلیون کیلووات ساعت)	صادرات برق (میلیون کیلووات ساعت)	آب مجازی وارد شده (لیتر)	آب مجازی صادر شده (لیتر)	درصد آب مجازی به کل آب مصرف‌شده در تولید	
					در واردات	در صادرات
۱۳۸۸	۲،۰۶۸	۶،۱۵۲	۱،۲۹۸،۰۱۹	۳،۸۶۱،۶۰۹	۰.۵	۱.۴۸
۱۳۸۹	۳،۰۱۵	۶،۷۰۷	۱،۸۹۲،۵۸۱	۷،۵۰۹،۰۹۵	۰.۷۳	۲.۸۸
۱۳۹۰	۳،۶۵۶	۸،۶۶۸	۲،۲۹۴،۶۴۷	۹،۶۲۱،۸۶۲	۰.۸۶	۳.۶۱
۱۳۹۱	۳،۸۹۷	۱۱،۰۲۹	۲،۴۴۵،۹۰۸	۱۱،۲۸۴،۱۲۴	۰.۹۴	۴.۳۴
۱۳۹۲	۳،۷۰۷	۱۱،۵۸۶	۲،۳۲۶،۶۵۶	۱۱،۴۷۷،۱۳۶	۰.۹	۴.۴۲
۱۳۹۳	۳،۷۷۲	۹،۶۶۰	۲،۳۶۷،۴۵۳	۹،۰۱۹،۱۴۶	۰.۹۲	۳.۵۲
۱۳۹۴	۴،۱۴۸	۹،۸۸۰	۲،۶۰۳،۴۴۵	۹،۲۲۶،۸۰۶	۱	۳.۵۲
۱۳۹۵	۴،۲۲۱	۶،۶۸۷	۲،۶۴۹،۳۲۶	۶،۰۱۹،۹۴۵	۱.۰۲	۲.۳۱
۱۳۹۶	۳،۸۵۲	۸،۱۷۲	۲،۴۱۷،۷۲۷	۷،۵۰۷،۲۳۰	۰.۸۵	۲.۶۵

برای دستیابی به مصرف دقیق آب به‌ازای تولید یک کیلووات ساعت برق به این‌صورت عمل شد که ابتدا میزان کل مصرف سوخت‌های مختلف در فرآیند تولید برق در یک‌سال محاسبه شد. سپس با استفاده از اعداد استخراج شده در بخش اول محاسبات روش فنی-پایه، آب مصرفی به‌ازای سوخت‌های مختلف در مقدار سوخت ضرب و سپس در سهم هر نیروگاه از تولید برق ضرب شد. حاصل آن میانگینی وزنی از مصرف آب در صنعت برق کشور است که می‌توان نماینده مصرف آب به‌ازای تولید یک کیلووات ساعت برق باشد. جدول ۳ سهم تولید و مصرف آب نیروگاه‌های ایران را نشان می‌دهد. همواره نیروگاه‌های چرخه ترکیبی و بخاری به‌ترتیب بیشترین میزان برق را در بین همه انواع نیروگاه‌ها در ایران تولید می‌کنند. با توجه به داده‌های سال ۱۳۹۸ این میزان برای نیروگاه‌های چرخه ترکیبی ۳۹٪ از کل برق تولید شده در ایران و برای نیروگاه‌های بخاری ۲۸٪ است. این درحالی است که در همان سال میزان آب مصرفی این نیروگاه‌ها به‌ترتیب ۱۵/۵٪ و ۱۹/۵٪ بوده است که این میزان در مقابل نیروگاه‌های برقآبی که ۶٪ تولید و ۴۴/۳٪ آب را مصرف کرده‌اند بسیار پایین است. البته باید به این نکته توجه شود که نیروگاه‌های برقابی گاهی از ارتفاع آب ایجاد شده روی سدهایی که مصارف کشاورزی و صنعتی و شهری دارند بهره می‌گیرند و برق تولید می‌کنند. لذا کل آب مصرفی آن‌ها را نمی‌توان به مصرف برق تعمیم داد، ولی به‌هرحال تفکیک این بحث با داده‌های موجود امکان‌پذیر نبوده است.

جدول ۳- سهم تولید و آب مصرفی انواع نیروگاه‌ها

نیروگاه	سهم از تولید	سهم آب مصرفی
جمع نیروگاه‌های بخاری	٪۲۸	٪۱۹/۵
جمع نیروگاه‌های چرخه‌ترکیبی	٪۳۹	٪۱۵/۵
جمع نیروگاه‌های برق‌آبی	٪۶	٪۴۴/۳
جمع نیروگاه‌های گازی	٪۲۵	٪۱۷
جمع اتمی و تجدیدپذیر	٪۲	٪۴
جمع کل سال (میلیون کیلووات ساعت)	٪۱۰۰	٪۱۰۰

در این بخش ابتدا نتایج حاصل از روش تحلیل مسیر ساختاری آورده شده است. مصرف آب در هر لایه به تفکیک در جدول ۴ برحسب مترمکعب آمده و در ستون انتهایی جدول سهم هر لایه در مصرف آب زنجیره تولید برق به‌صورت درصد بیان شده است.

جدول ۴- خلاصه نتایج روش تحلیل مسیر ساختاری

حجم آب (مترمکعب)		مقدار محاسباتی	سهم هر لایه
آب کشور در سال ۱۳۹۵ (طبق جدول داده-ستانده)		۶۵,۱۹۵,۰۳۶,۰۰۲	--
آب مجازی صنعت برق به روش فنی پایه		۴۵۳,۹۲۰,۷۶۶	--
آب مجازی صنعت برق به روش SPA		۱,۱۸۹,۲۹۹,۲۲۳	٪۱۰۰
لایه صفر	مصرف مستقیم	۴۵۳,۹۲۰,۷۶۶	٪۳۸
لایه یک	تولید سوخت، نصب تجهیزات، توزیع برق	۲۱۸,۴۶۲,۱۳۴	٪۱۸
لایه دو	استخراج نفت و دغال سنگ، تولید تجهیزات و...	۱۵۳,۱۰۶,۹۹۱	٪۱۳
لایه سه	خدمات	۳۶۳,۸۰۹,۳۳۱	٪۳۱

پس از مقایسه اعداد به‌دست آمده در هر دو روش، این نتیجه حاصل می‌شود که آب ویژه مصرفی محاسبه شده به‌روش تحلیل مسیر ساختاری بیش از ۲/۶ برابر روش فنی-پایه است. این بدین معنی است که آب مصرف شده در فرآیند تولید برق ۱/۶ برابر آب مصرف شده در نیروگاه است. مصرف آب غیرمستقیم که در اکثر محاسبات و پژوهش‌ها درنظر گرفته نمی‌شود بسیار بیشتر از مصرف مستقیم آب است و از جمع این دو مقدار کل مصرف آب به‌دست می‌آید. از دید دیگری نیز می‌توان این اختلاف را نشان داد. اگر با استفاده از جدول داده-ستانده کل آب مصرف شده در کشور در سال ۱۳۹۵ محاسبه شود، این نتیجه حاصل می‌شود که آب مصرف شده در داخل نیروگاه‌ها برای تولید برق ۰/۷٪ از آب کل کشور در همان سال بوده، اما آب مصرفی کل زنجیره برق بیش از ۱/۸٪ از کل آب کشور بوده است. براساس محاسبات گفته شده به‌ازای هر کیلووات ساعت برق تولید شده در ایران بیش از چهار لیتر آب مصرف می‌شود. به بیان دیگر به‌ازای تولید هر میلیون کیلووات ساعت برق بیش از ۴۰۰۰ مترمکعب آب مصرف می‌شود. این عدد میانگین وزنی همه انواع نیروگاه‌ها و همه انواع تکنولوژی‌های موجود در کشور است. این محاسبات با درنظر گرفتن شاخص تحلیل مسیر ساختاری به‌عنوان روش محاسبه آب ویژه است. اگر به آب مصرف شده در داخل نیروگاه‌ها بسنده شود، به‌ازای هر کیلووات ساعت برق تولید شده در ایران ۱/۵ لیتر آب مصرف می‌شود.

فرضیه مورد بررسی در این مطالعه این بوده که "با توجه به هزینه فرصت آب در مصارف صنعتی در کشور، تولید برق و صادرات آن با نگاه پیوند آب و انرژی و آب مجازی صادر شده مقرون به‌صرفه نیست". در این بخش این فرضیه مورد آزمون قرار خواهد گرفت. در این دیدگاه تولیدات برحسب مصرف آب ویژه مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند. پس در گام اول آب مصرف شده در تولید برق مورد نیاز است که در بخش‌های قبلی محاسبه شده است[۶]. نتایج محاسبات ۱/۵ لیتر در روش فنی-پایه برای داخل نیروگاه و ۴ لیتر در روش تحلیل مسیر ساختاری برای کل زنجیره تولید برق بوده است. در گام بعدی این مسئله بررسی می‌شود که میزان برق صادراتی چقدر بوده که آمار استفاده شده از بانک سری زمانی داده‌های بانک مرکزی ۶۶۸۷/۸ میلیون کیلووات ساعت است. در گام بعدی باید میزان درآمد دلاری به‌دست آمده از این فروش برق محاسبه شود. برای این‌کار از نرخ دلار مربوط به سال ۱۳۹۵ (سال انجام محاسبات جدول داده-ستانده) و نرخ دلار روز سامانه نیما در همین سال استفاده شده است. قیمت برق صادراتی که از همان سال تاکنون تغییری نداشته ۱۰ سنت به ازای هر کیلووات ساعت درنظر گرفته شده است. براساس داده‌های موجود درآمد ایران از فروش برق برحسب نرخ دلار در سال ۱۳۹۵ که ۳۶۰۰ تومان بوده است مبلغ ۲/۴ هزار میلیارد تومان و براساس نرخ دلار روز (۲۶۷۰۰ تومان)، ۱۷/۸ هزار میلیارد تومان است. براساس این محاسبه، ارزش اقتصادی آب نهفته در صادرات یک کیلووات ساعت برق در روش فنی-پایه و روش تحلیل مسیر به‌ترتیب ۳،۱۵۱،۴۴۰ و ۸،۴۰۳،۸۴۰ ریال است.

در گام آخر برای آزمون فرضیه باید ارزش آب صادراتی نهفته در قالب برق با ارزش اقتصادی آب در دیگر بخش‌های اقتصاد مقایسه شود تا بتوان به سوال اصلی این پژوهش پاسخ داد. برای این‌کار از مطالعات مختلف ارزش اقتصادی آب در صنعت، کشاورزی و شرب استخراج شده است. براساس مطالعات انجام شده در ایران ارزش اقتصادی آب در صنعت ۸۷،۳۴۷ ریال بر مترمکعب است. این مطالعه توسط تهامی‌پور و همکاران (۱۳۹۲) با روش باقی‌مانده انجام شده است و ارزش اقتصادی آب در صنعت با داده‌های شاخص قیمت مصرف‌کننده درگاه ملی آمار ایران برای سال ۱۳۹۵ و سال ۱۴۰۱ به‌روز شده است. حاصل ۱۱۹،۱۵۲ ریال بر مترمکعب برای سال ۱۳۹۵ و ۴۱۷،۲۲۴ ریال بر مترمکعب برای سال ۱۴۰۱ به‌دست آمده است. نتایج مقایسه نشان داد که در همه حالات و روش‌های مورد استفاده در این مطالعه ارزش آب

نهفته در برق صادراتی بیشتر از هزینه فرصت آب در صنعت است. این بدین معنی است که تولید برق صادراتی از دید آب مجازی نسبت به هزینه فرصت داخل کشور ارزش کمتری ندارد.

از سوی دیگر، در مطالعه‌ای تعزری و همکاران (۱۴۰۰)، با استفاده از توابع تولید، ارزش اقتصادی آب را به‌صورت میانگین برای محصولات اساسی مانند گندم، جو، چغندر قند، کلزا، گوجه‌فرنگی، ذرت علوفه‌ای و یونجه محاسبه کرده اند و براساس سناریوهای مختلف برای قیمت آب، ارزش اقتصادی محاسبه شده در کشاورزی ۱،۰۹۰ ریال بر مترمکعب به‌دست آمده است. این مطالعه نیز در سال ۱۴۰۰ انجام شده است و این عدد برای ۱۴۰۱ با نرخ تورم، ۳،۸۱۶ ریال بر مترمکعب است. ارزش اقتصادی آب آشامیدنی تصفیه‌شده خریداری شده نیز در مطالعه‌ای توسط تهامی‌پور و همکاران (۱۳۸۹) محاسبه شد که مبلغ ۱۲۵،۰۰۰ ریال به‌ازای هر مترمکعب است. اعداد استخراج شده به‌روز شده در این مطالعه برای سال ۱۴۰۱ معادل ۱،۲۸۱،۰۶۱ ریال بر مترمکعب است. پس ارزش اقتصادی آب در فرآیند تولید برق حتی از آب آشامیدنی نیز بالاتر است. در جدول ۵ داده‌های مربوط به ارزش اقتصادی آب آورده شده است.

جدول شماره ۵ : مقایسه ارزش اقتصادی آب در فرایند تولید و صادرات برق با سایر مصارف

بخش/سال		۱۳۹۲	۱۳۹۵	۱۳۹۹	۱۴۰۱ (به‌هنگام شده)
صنعت		۸۷،۳۴۷	۱۱۹،۱۵۲	۲۹۸،۵۹۸	۴۱۷،۲۲۴
کشاورزی		-	۱،۰۹۰	۲،۷۳۱	۳،۸۱۶
آب شرب		۲۶۸،۱۹۴	۲۶۸،۱۹۴	۹۱۶،۸۲۸	۱،۲۸۱،۰۶۱
برق	فنی-پایه	-	۹۰۰،۰۰۰	۲،۲۵۵،۴۱۸	۳،۱۵۱،۴۴۰
	SPA	-	۲،۴۰۰،۰۰۰	۶،۰۱۴،۴۴۸	۸،۴۰۳،۸۴۰

با توجه به ارزش اقتصادی بسیار بالای آب در تولید برق می‌توان به این نتیجه رسید که تولید و صادرات برق از دید آب مجازی برای آب‌های مرزی و آب های مازاد کشور مقرون به‌صرفه است و ارزش آب استفاده شده در تولید برق بسیار بالاتر از کشاورزی و صنعت و شرب است.

گفته شد که آب مجازی به‌ازای تولید یک کیلووات ساعت برق در ایران به‌روش فنی-پایه ۱/۵ لیتر و به‌روش تحلیل مسیر ساختاری ۴ لیتر محاسبه شده است. کل آب موجود در کشور در سال ۱۳۹۵ (سال پایه محاسبات)، بیش از ۶۵ میلیارد مترمکعب بوده است. مصرف آب ویژه برق ایران به‌روش فنی-پایه ۴۵۳ میلیون مترمکعب بوده که این بدین معنی است که حدود ۰/۷٪ از کل آب کشور در سال ۱۳۹۵ مستقیماً در نیروگاه‌ها برای تولید برق مصرف شده است. اما به‌روش تحلیل مسیر ساختاری در ۴ لایه فرآیند تولید برق مجموعا ۱،۱۸۹ میلیون مترمکعب آب مصرف شده است. این بدین معنی است که بیش از ۱/۸٪ از کل آب کشور در سال ۱۳۹۵ در فرآیند تولید برق دخیل بوده است. در لایه‌های تولید برق به‌ترتیب ۲۱۸ و ۱۵۳ و ۳۶۳ میلیون مترمکعب آب مصرف شده است. یعنی بعد از لایه صفر که مصرف مستقیم آب در نیروگاه‌ها بوده، بیشترین مصرف آب مربوط به بخش خدمات بوده است.

علاوه‌بر این، نیروگاه‌های برقآبی بیشترین مصرف آب را در بین نیروگاه‌های ایران دارد. بیش از ۴۴٪ مصرف آب نیروگاه‌های ایران مربوط به نیروگاه‌های برقآبی است. این درحالی است که تنها ۶٪ از کل تولید برق مربوط بی نیروگاه‌های برقآبی است. اگر ترکیب نیروگاه‌ها طوری عوض شود که به‌جای نیروگاه‌های برقآبی از نیروگاه‌های چرخه‌ترکیبی استفاده شود مصرف کل آب با همان میزان تولید در حدود ۴۰٪ کاهش می‌یابد. از کل آب مصرفی داخل نیروگاه‌ها که ۴۵۰ میلیون مترمکعب است، می‌توان بیش از ۱۸۱ میلیون مترمکعب آب را ذخیره کرد. البته توجه به این نکته ضروری است که این نتیجه‌گیری قابل تعمیم به هر منطقه نیست و در برخی مناطق با توجه به پتانسیل‌های آبی و مسائل اقتصادی، ساخت نیروگاه برقابی کاملاً منطقی و توجیه‌پذیر است. هم‌چنین نیروگاه‌های برقابی نسبت به نیروگاه‌های چرخه ترکیبی، آلودگی محیط‌زیستی بسیار کمتری دارد. لذا تحلیل ارائه‌شده صرفاً براساس بهینه‌سازی آب فرایند تولید است.

در این مرحله تغییر در ترکیب نیروگاه‌ها و در نتیجه آن تغییر در مقدار آب مصرفی کل تحلیل می‌شود. با توجه به داده‌های ارائه شده در جدول ۳، بیشترین مصرف آب و کمترین میزان تولید بعد از نیروگاه‌های اتمی و تجدیدپذیر مربوط به نیروگاه‌های برقآبی است. برای درک بهتر کارایی نیروگاه‌های مختلف از منظر آب مجازی شاخصی برای بررسی و مقایسه بهره‌وری نیروگاه‌ها از دیدگاه مصرف آب تعریف می‌شود. این شاخص نسبت تولید یک

نوع نیروگاه به مصرف آب همان نوع نیروگاه را به‌عنوان شاخص بهره‌وری نیروگاه از نظر مصرف آب نشان می‌دهد. در جدول ۶ نسبت تولید هر نیروگاه به آب مصرفی آن نیروگاه آورده شده است.

جدول ۶- نسبت تولید به آب مصرفی نیروگاه‌ها

انواع نیروگاه‌ها	نسبت تولید به آب مصرفی (کیلووات ساعت به لیتر)
بخاری	۱/۴۴
چرخه ترکیبی	۲/۵۲
برق‌آبی	۰/۱۴
گازی	۱/۴۷
اتمی و تجدیدپذیر	۰/۵

جدول ۶ نشان می‌دهد که به لحاظ مصرف آب، بیشترین بهره‌وری مربوط به نیروگاه‌های چرخه ترکیبی است که بیش از ۲/۵ برابر آب مصرفی خود، برق تولید می‌کند و همان‌طور که گفته شد کمترین بهره‌وری مربوط به نیروگاه‌های برقآبی است. در این بخش این مهم بررسی خواهد شد که درصورتی‌که نیروگاه‌های برقآبی و اتمی و تجدیدپذیر که کمترین بهره‌وری را از دیدگاه مصرف آب دارند حذف شوند و نیروگاه‌های چرخه ترکیبی جایگزین آن شود، میزان آب مصرفی چگونه تغییر خواهد کرد. مجموع نیروگاه‌های برقآبی و اتمی و تجدیدپذیر ۸٪ برق کل شبکه را تولید می‌کنند. از سوی دیگر این نیروگاه‌ها ۴۸/۳٪ از کل آب را مصرف می‌کنند. اگر نیروگاه چرخه ترکیبی جایگزین این نیروگاه‌ها شود، یعنی تولید این نیروگاه‌ها ۸٪ افزایش یابد، مصرف آب نیروگاه‌های چرخه ترکیبی ۳/۲٪ میزان فعلی افزایش پیدا می‌کند. این بدان معنی است که مصرف آب نیروگاه‌ها بیش از ۴۵٪ میزان مصرف آب فعلی یعنی ۵۳۶ میلیون مترمکعب کاهش پیدا می‌کند. درصورتی‌که کل نیروگاه‌های مورد استفاده در شبکه سراسری، به‌جز نیروگاه‌های سیکل ترکیبی از چرخه خارج شوند، میزان تولید این نیروگاه‌ها ۶۱٪ افزایش پیدا خواهد کرد. در مقابل مصرف آب کل، بیش از ۷۰۰ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد. این میزان، ۴۰٪ کل مصرف فعلی آب در فرآیند تولید برق و بیش از ۱٪ کل آب کشور در سال مورد بررسی است.

برای درک بهتر و بررسی دقیق‌تر و کمی تغییرات در ترکیب نیروگاه‌ها، سه سناریوی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سناریوی اول این حالت بررسی می‌شود که نیروگاه‌های اتمی و تجدیدپذیر از شبکه سراسری حذف شوند و نیروگاه‌های سیکل ترکیبی که بیشترین مقدار شاخص بهره‌وری آب را دارند جایگزین آن‌ها شوند. سناریوی دوم حالتی است که ۵۰٪ نیروگاه‌های برقآبی با توجه به سدسازی‌های بی‌رویه و مسائل مربوط به کم‌آبی از چرخه خارج شوند و نیروگاه‌های سیکل ترکیبی جایگزین آن شوند. سناریوی سوم جایگزینی ۵۰٪ از نیروگاه‌های گازی به‌جای نیروگاه‌های سیکل‌ترکیبی را مورد بررسی قرار می‌دهد.

- سناریوی اول: نیروگاه‌های اتمی و تجدیدپذیر ۲ درصد از برق شبکه را تولید و ۴٪ از آب کل شبکه را مصرف می‌کنند. اگر این نیروگاه‌ها از چرخه تولید خارج شوند، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی باید تولید خود را ۲ درصد افزایش دهند. در مقابل میزان آب مصرفی آن‌ها ۰/۸٪ افزایش پیدا می‌کند. پس کل آب مصرفی به‌میزان ۱/۲٪ نسبت به قبل از تغییر در ترکیب نیروگاه‌ها کاهش پیدا می‌کند. لذا در این سناریو میزان ۱۴ میلیون و ۲۷۰ هزار مترمکعب آب صرفه‌جویی می شود.
- سناریوی دوم: نیروگاه‌های برقآبی ۶٪ از تولید کل شبکه و ۴۴/۳٪ از مصرف آب شبکه را دارند. اگر ۵۰٪ این نیروگاه‌ها از چرخه خارج شوند تولید آن‌ها ۳٪ کاهش می‌یابد و مصرف آب این نیروگاه‌ها به ۲۲/۲٪ کاهش پیدا می‌کند. اگر در ازای این کاهش در تولید، میزان تولید نیروگاه‌های سیکل ترکیبی ۳٪ افزایش یابد، مصرف آب این نیروگاه‌ها به‌میزان ۱/۲٪ افزایش می‌یابد. در مقابل مصرف آب کل به میزان ۲۱٪ کاهش می‌یابد. لذا در این سناریو نزدیک به ۲۵۰ میلیون مترمکعب در مصرف آب صرفه‌جویی می‌شود. این میزان آب، بیش از ۵۰٪ مصرف آب مستقیم در کل نیروگاه‌های شبکه سراسری برق است.
- سناریوی سوم: نیروگاه‌های گازی ۲۵٪ از سهم تولید و ۱۷٪ ار کل آب را مصرف می‌کنند. اگر ۵۰٪ ظرفیت این نیروگاه‌ها با نیروگاه‌های سیکل‌ترکیبی جایگزین شود، یعنی تولید آن به ۱۲/۵ درصد و مصرف آن هم به ۸/۵٪ کاهش یابد. در ازای آن نیروگاه‌های سیکل ترکیبی تولید خود را به ۵۱/۵٪ شبکه برساند، میزان آب مصرفی این نیروگاه‌ها ۵٪ افزایش پیدا می‌کند. در این سناریو ۵۹/۵ میلیون مترمکعب آب در تولید برق صرفه‌جویی می‌شود.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که از دیدگاه همبست آب-انرژی و براساس تحلیل زنجیره تولید برق، به‌ازای تولید هر کیلووات ساعت برق در کشور حدود ۴ لیتر آب مصرف می‌شود که این میزان با تغییر ترکیب نیروگاه‌ها در مناطق مختلف با توجه به پتانسیل منابع آب قابل کاهش است. هم‌چنین، ارزش اقتصادی آب مجازی صادر شده در قالب برق، نسبت به هزینه فرصت آب در مصارف کشاورزی، شرب و صنعت به مراتب بالاتر است. لذا، صادرات برق با دیدگاه آب توجیه‌پذیر به‌نظر می‌رسد، اما با توجه به کمبود منابع آب در ایران صدور برق باید فقط از آب خروجی از مرزها در منطقه گیلان و مازندران، خوزستان و منطقه سیروان و گرمسیری باشد. البته باید توجه داشت که با توجه به کمبود منابع آب در فلات مرکزی و ضرورت تامین آب شرب به‌صورت ترجیحی، تامین آب ضروری شرب نسبت به صادرات آب در قالب برق حتی از مناطق مرزی، در اولویت است، مگر آن‌که آب‌های مذکور قابلیت مدیریت و انتقال و مصرف در داخل کشور نداشته باشد. علاوه‌بر این، در فرآیند تولید برق از طریق به‌روزکردن تکنولوژی مورد استفاده و تغییر ترکیب نیروگاه‌های متصل به شبکه سراسری، می‌توان بهره‌وری را افزایش داد. پیشنهاد می‌شود که این فرآیند تولید به‌سمت افزایش سهم نیروگاه‌های چرخه ترکیبی حرکت کند. با توجه به بررسی‌های انجام شده در سه سناریوی ارائه شده در بخش قبلی، میزان مصرف آب به‌طور قابل‌توجهی کاهش پیدا می‌کند.

در این مطالعه تلاش شد تا وضعیت آب‌بری صنعت برق و نیروگاه‌ها به تفکیک مراحل زنجیره تولید و هم‌چنین میزان آب مجازی نهفته در صادرات برق تحلیل و با هزینه فرصت‌های آن مقایسه شود. اما لازم به توضیح است که مهم‌ترین عدم قطعیتی که می‌تواند روی نتایج به‌دست آمده تاثیرگذار باشد، ناشی از مصرف آب ویژه نیروگاه‌ها و تغییرات آن است که در این مطالعه براساس تجارب گذشته و با اعمال اصلاحات و تعدیلات، بومی‌سازی شد. ولی جا دارد در مطالعات بعدی سایر محققین در داخل کشور، با سطح دقت بالایی محاسبه شود.

۵-پی‌نوشت‌ها

1- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD)
2- Index of United Nation
3- Key World Energy Statistic
4- Structural path analysis
5- Production Layer

۶- محاسبات انجام شده برای شاخص تحلیل مسیر ساختاری نیازمند داده‌های جدول داده-ستانده بوده و آخرین و به‌روزترین جدول داده-ستانده مربوط به سال ۱۳۹۵ بوده است. لذا برای محاسبات این روش به عدد به‌دست آمده برای همین سال بسنده شده است. بدیهی است که از سال ۱۳۹۵ تاکنون تغییرات زیادی در این صنعت رخ داده است. اما امید است این پژوهش مسیر را برای محاسبات دقیق‌تر به‌صورت سری زمانی برای دستیابی به حالات بهینه‌تر در تولید برق و مصرف آب در ایران باشد.

۶- مراجع

باغستانی، ع.، مهرابی بشرآبادی، م.، زارع مهرجردی، م.، و شرافتمند، ح.، (۱۳۸۹)، "کاربرد مفهوم آب مجازی در مدیریت منابع آب ایران"، *تحقیقات منابع آب ایران*، ۶(۱)، ۲۸-۳۸.

تعذری، ن.، بنی‌حبیب، م.، هاشمی شاهدانی، م.، و حسنی، ی.، (۱۴۰۰)، "تعیین قیمت آب کشاورزی براساس معیارهای توسعه پایدار (مطالعه موردی: شبکه آبیاری قزوین)"، *اکوهیدرولوژی*، ۸(۲)، ۴۶۱-۴۷۳.

تهامی‌پور، م.، و عابدی، س.، (۱۳۹۶)، "ارزیابی تجارت آب مجازی در بخش صنعت استان زنجان"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۸، ۳۶-۴۵.

تهامی‌پور، م.، دشتبان فاروجی، س.، و جواهردهی، س.، (۱۳۹۶)، "ارزیابی تجارت محصولات صنعتی ایران با کشورهای مختلف از دیدگاه آب مجازی"، *فصل نامه اقتصاد و الگوسازی*، دانشگاه شهید بهشتی، ۸(۳۰)، ۱۴۳-۱۸۵.

تهامی‌پور، م.، زارع‌پور، ز.، و شاوردی، ع.، (۱۳۸۹)، "برآورد ارزش اقتصادی آب در مصارف شهری و روستایی استان خوزستان"، *اقتصاد کشاورزی و توسعه*، ۱۹(۷۶)، ۱۲۱-۱۴۲.

طیبی، م.، (۱۳۹۰)، "نگاهی به تولید و مصرف برق در جهان"، *مجله اقتصادی - ماهنامه بررسی مسائل و سیاست‌های اقتصادی*، ۱۱(۵)، ۱۱۳-۱۲۴.

عابدی، س.، (۱۳۹۹)، "حکمروایی آب و ارزیابی آثار آن بر تأمین امنیت آب و غذا"، *نشریه آب و توسعه پایدار*، ۷(۱)، ۱-۱۲.

عیسی‌پور، ع.، و عابدی، ش.، (۱۳۹۳)، "بررسی مصرف آب در نیروگاه‌های حرارتی و ارائه راه‌کارهای اصلاح الگوی مصرف"، شرکت برق منطقه‌ای تهران.

نصراللهی، ز.، و زارعی، م.، (۱۳۹۶)، "بررسی جریان‌های آب مجازی در اقتصاد ایران: تحلیل روابط بین بخشی آب با استفاده از رهیافت داده-ستانده"، *فصلنامه مدل‌سازی اقتصادسنجی*، ۲(۴)، ۱۳۱-۱۵۷.

محمدجانی، ا.، یزدانیان، ن.، (۱۳۹۳)، "تحلیل وضعیت بحران آب در کشور و الزامات مدیریت آن"، *فصلنامه روند*، ۲۱(۶۵ و ۶۶)، ۱۱۷-۱۴۴.

Chen, C., Lei, Y., Zeng, X., Huang, G., and Yongping, L., (2019), "Planning an energy-water-environment nexus system in coal-dependent regions under uncertainties", *Energies*, 13, 208, https://doi.org/10.3390/en13010208.

FAO, (2014), *Water governance for agriculture and food Ssecurity, A FAO initiative to minimize its environmental impact and promote greener communications*, Availabel at : www. fao.org.

Feng, C., Tang, X., Jin, Y., Guo, Y., and Zhang, X., (2019), "Regional energy-water nexus based on structural path betweenness: A case study of Shanxi Province, China", *Energy Policy*, 127, 102-112, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.002.

Hasanzadeh, S.M., Baubekova, A., Gohari, A., Eslamian, S., Klove, B., and Torabi H., (2022), "Optimization of water-energy-food nexus considering CO_2 emissions from cropland: A case study in northwest Iran", *Applied Energy*, Elsevier, 307(C), 118236, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118236.

Honga, J., Zhong, X., Guo, Sh., Liu, G., Qiping Shen, G., and Yu, T., (2019), "Water-energy nexus and its efficiency in China's construction industry: Evidence from province-level data", *Sustainable Cities and Society*, 48, 101-157. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101557.

Larsen Andreas, M.D., and Drews M., (2019), "Water use in electricity generation for water-energy nexus analyses: The European case", *Science of the Total Environment*, 651, 2044-2058, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.045.

Liao, X., Zhao, X., Hall, J.W., and Guan, D., (2018), "Categorising virtual water transfers through China's electric power sector", *Applied Energy*, 226, 252-260, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.132.

Lu, L., Yongqin, D., Chen, C., Hua, D., Yi, L., and Yan, M., (2019), "Provincial virtual energy-water use and its flows within China: A multiregional input-output approach", *Resources, Conservation & Recycling*, 151, 86-104, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104486.

Terrapon-Pfaff, J., Ortiz, W., Viebahn, P., Kynast, E., and Flörke, M., (2020), "Water demand scenarios for electricity generation at the global and Regional Levels", *Water*, 12, 2482, https://doi.org/10.3390/w12092482.

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. 8, No. 3, PP. 47-58, Autumn 2023
DOI: 10.22112/JWWSE.2023.370878.1334

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال هشتم، شماره ۳، صفحات ۴۷-۵۸، پاییز ۱۴۰۲

Research Paper

Optimizing Sulfate Radical Based Advanced Oxidation Process for Reducing Effluent Organic Matter of Pulp and Paper Mill Wastewater Using Response Surface Method

Ali Tahmasebi[1], Mohammad Hossein Sarrafzadeh[2*] and Seyed Behnam Ghaffari[3]
1- M.Sc., UNESCO Chair on Water Reuse, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
2- Professor, UNESCO Chair on Water Reuse, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
3- Post Doctoral Researcher, UNESCO Chair on Water Reuse, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
* Corresponding Author, Email: sarrafzdh@ut.ac.ir

Received: 11/12/2022
Revised: 14/01/2023
Accepted: 21/01/2023
© IWWA

Abstract

The pulp and paper industries are one of the largest water-consuming industries in the world. The high organic load of wastewater makes conventional treatment methods like biological and coagulation, ineffective for making the discharge effluent meet environmental standards. Advanced oxidation processes have been considered a promising solution due to their high oxidation power and low operating cost compared to other methods. These processes based on the type of radical production have different types, which are divided into two main categories of hydroxyl radicals and sulfate radicals, which are selected depending on the conditions and their purpose. In this research, by using the Response Surface Method (RSM) experiment design, sulfate radical efficiency, the initial oxidizing concentration and pH were optimized. To investigate the effect of factors, Chemical Oxygen Demand (COD) removal was measured at the end of each experiment as an index for organic pollutant removal. In the maximum state whit this method, 75% of the initial COD can be removed. In the economic optimal mode, with the initial dimensionless peroxy-disulfate dose = 0.407 and initial pH = 8.37, COD removal% = 53.53% is demonstrated.

Keywords: Advanced oxidation process, Sulfate radical, Pulp and paper mill wastewater, Optimization, Response surface method.

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی فرآیند اکسیداسیون پیشرفته رادیکال سولفاتی برای کاهش مواد آلی فاضلاب کارخانه خمیر و کاغذ با استفاده از روش سطح پاسخ

علی طهماسبی[۱]، محمدحسین صراف‌زاده[۲*] و سید بهنام غفاری[۳]
۱- کارشناس ارشد، کرسی یونسکو در بازیافت آب، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲- استاد، کرسی یونسکو در بازیافت آب، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳- پژوهشگر پسا دکترا، کرسی یونسکو در بازیافت آب، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: sarrafzdh@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۱/۱۰/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱
© انجمن آب و فاضلاب ایران

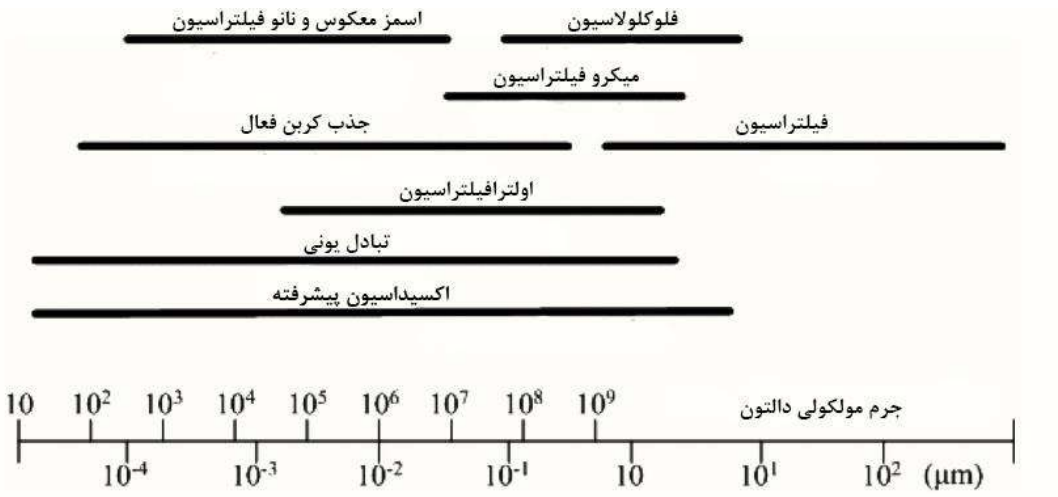
چکیده

صنایع خمیر و کاغذ به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین صنایع مصرف‌کننده آب در دنیا شناخته می‌شوند و تصفیه فاضلاب آن‌ها به‌دلیل داشتن بار آلی بالا با روش‌های مرسوم تصفیه فاضلاب نظیر تصفیه بیولوژیکی و ته‌نشینی نمی‌تواند به استانداردهای مطلوب محیط‌زیستی برسد. فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته به‌عنوان راه‌حلی مطلوب، به‌دلیل داشتن قدرت بالای اکسندگی و هم‌چنین هزینه عملیاتی پایین در مقایسه با سایر روش‌ها، مورد توجه قرارگرفته‌اند. این فرآیندها انواع متفاوتی دارند که براساس نوع تولید رادیکال‌ها به دو دسته اصلی رادیکال‌های هیدروکسیلی و رادیکال‌های سولفاتی تقسیم می‌شوند و بسته به شرایط و هدف به‌کارگیری آن‌ها، انتخاب می‌شوند. در این تحقیق با استفاده از طراحی آزمایش به‌روش سطح پاسخ (RSM) دو عامل غلظت اولیه اکسید کننده و pH در کارآیی روش رادیکال سولفاتی بهینه‌سازی شد. برای بررسی هرکدام از پارامترهای موثر، حذف مواد آلی برحسب اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) در پایان هر آزمایش اندازه‌گیری شد. با استفاده از این روش در حالت بیشینه می‌توان مقدار ۷۵ درصد از COD اولیه موجود را حذف کرد. در حالت بهینه اقتصادی با غلظت اولیه بدون بعد پروکسی دی‌سولفات ۰/۴۰۷ و pH اولیه ۸/۳۷، درصد حذف COD برابر ۵۳/۵۳ درصد به‌دست آمد.

کلمات کلیدی: اکسیداسیون پیشرفته، رادیکال سولفاتی، فاضلاب کارخانه خمیر و کاغذ، بهینه‌سازی، روش سطح پاسخ.

۱- مقدمه

در دنیای امروز و با توجه به مشکلاتی نظیر تغییر شرایط آب و هوایی و افزایش چشمگیر دمای کره زمین، مشکل آب به یکی از جدی‌ترین مشکلات پیرامون زندگی بشر تبدیل شده است. از این‌رو کاهش مصرف آب و به‌کارگیری الگوهای مختلف تصفیه آب و فاضلاب توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است (Samsami et al., 2020). کارخانه‌های خمیر و کاغذ یکی از عمده‌ترین مصرف کنندگان آب شیرین هستند به‌طوری‌که پس از صنایع معدنی و شیمیایی رتبه سوم مصرف آب را به خود اختصاص داده‌اند (Oller et al., 2011). به‌خاطر استفاده این صنعت از موادی مانند جوهر، رزین‌های اسیدی، کلرین، لیگنین و هالیدهای آلی[1] در فرآیند تولید کاغذ، ترکیبات آلی و معدنی زیادی در فاضلاب نهایی وجود دارد که باعث می‌شوند شاخص‌های اکسیژن‌خواهی شیمیایی[2]، اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی[3]، سمیّت، ذرات معلق و رنگ فاضلاب دفعی بالا باشد (Samsami et al., 2020). فاضلاب این کارخانه‌ها درصورت عدم تصفیه می‌تواند مشکلات و آلودگی‌های محیط‌زیستی زیادی مثل رشد لجن و مشکلات حرارتی را ایجاد کند (Pokhrel and Viraraghavan, 2004). هم‌چنین، در صورت ورود به آب‌های سطحی و آزاد موجب از بین رفتن ماهی‌ها و پلانکتون‌های موجود در آب می‌شود و در صورت رهاسازی در خاک تأثیر عمیقی بر روی اکوسیستم خاک می‌گذارد (Oller et al., 2011). برای تصفیه فاضلاب کارخانه‌های خمیر و کاغذ اغلب روش‌های لخته‌سازی/ته‌نشینی و زیستی، مانند سیستم لجن فعال، به‌ترتیب به‌عنوان تصفیه اولیه و تصفیه ثانویه در فرآیند تصفیه استفاده می‌شوند (Carvalho Neves et al., 2020). این روش‌ها به‌خاطر هزینه عملیاتی کم، زیست‌سازگاری و کارآیی مناسب تقریبا در تمامی واحدهای تصفیه به‌کار می‌روند. اما با توجه به بار آلی بسیار بالا، حضور مواد سمی و عدم زیست تخریب‌پذیری آن‌ها، که در فاضلاب‌های صنعتی از جمله فاضلاب صنایع خمیر و کاغذ وجود دارد، روش‌های لخته‌سازی/ته‌نشینی و زیستی، بخصوص برای فاضلاب واحدهای رنگ‌زدایی و سفیدسازی، نمی‌توانند فاضلاب را به استانداردهای لازم برای تخلیه در محیط‌زیست برسانند (Anandan et al., 2020; Pokhrel and Viraraghavan, 2004). در نتیجه ناچار به استفاده از سایر فرآیندهای تصفیه است. روش‌های مرسوم دیگر نظیر روش‌های جذبی و غشائی نیز در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی مورد مطالعه قرارگرفته‌اند (Pokhrel and Viraraghavan, 2004). شکل ۱ روش‌های تصفیه مرحله سوم را باتوجه به توزیع جرم مولکولی بار آلی فاضلاب نشان می‌دهد (Shon et al., 2006).



شکل ۱- روش و نوع فرآیندهای مورد استفاده برای انواع فاضلاب‌ها با بار آلی زیاد با توجه به توزیع جرم مولکولی آن‌ها (Shon et al., 2006)

Pokhrel and Viraraghavan (2004) با بررسی منابع مختلف و مرور آن‌ها بهترین روش برای حذف رنگ را تصفیه زیستی به‌کمک قارچ‌ها، ته‌نشینی، روش‌های شیمیایی و ازناسیون معرفی کردند. هم‌چنین برای فاضلاب‌های حاوی AOX و مواد فنلی کلردار، روش‌های جذبی، غشائی و ازناسیون را مناسب‌تر می‌دانند. ولی در مجموع این روش‌ها علاوه‌بر هزینه عملیاتی بسیار بالایی که دارند، موجب حذف و یا از بین رفتن آلاینده نمی‌شوند، زیرا اساس آن‌ها صرفا بر جدا کردن آلاینده استوار است و موجب انتقال آلاینده از یک جریان به جریان دیگر می‌شوند که همین امر باعث به‌وجود آمدن آلودگی‌های ثانویه می‌شود (Chong et al., 2010).

از این‌رو فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته[4] در ۳۵ سال

گذشته به‌عنوان یک روش حذف پر قدرت مورد مطالعه قرار گرفته است. اساس این فرآیند بر تولید رادیکال‌های هیدروکسیلی یا سولفاتی، است که این رادیکال‌ها به‌دلیل واکنش‌پذیری بالا به مواد آلی موجود در ماتریس آب حمله می‌کنند و موجب تجزیه مواد آلی به ترکیبات ساده‌تر، افزایش زیست‌تخریب‌پذیری آن‌ها و کاهش غلظت مواد سمی می‌شوند. مطالعات زیادی اثرگذاری این روش را بر تجزیه مواد آلی از جمله انواع رنگ‌ها (Ahmadi et al., 2022)، سورفکتانت‌ها، هیدروکربن‌ها، فنل‌ها و مواد دارویی فعال نشان داده‌اند. نوع فرآیند اکسیداسیون پیشرفته مورد استفاده براساس نوع رادیکال به چند دسته کلی رادیکال هیدروکسیلی و رادیکال سولفاتی تقسیم می‌شود. از جمله روش‌های تولید رادیکال‌های هیدروکسیلی می‌توان به فرآیندهای فنتون، فوتو فنتون (Photo-Fenton Process)، الکترو فنتون (Electro-Fenton)، ازناسیون و هیدروژن پروکساید اشاره کرد (Oller et al., 2011). اگرچه این نوع رادیکال قدرت اکسید کنندگی بسیار بالایی (E_0 = 1.8-2.7 V) در تجزیه مواد آلی دارد، اما این نوع رادیکال بدلیل عدم انتخاب‌پذیری بسیار بالایی که دارد، موجب انجام واکنش‌های گوناگون تجزیه می‌شود که در نهایت ممکن است منجر به تولید واسطه‌های سمی شود (Yang et al., 2019). کارایی این روش‌ها نیز بسته به ماتریس و مواد موجود در آب می‌تواند به‌شدت مورد محدودیت قرارگیرد. برای مثال در محیط حاوی آنیون‌های کربنات/بی‌کربنات‌ها که تمایل بسیار بالایی برای واکنش با رادیکال‌های هیدروکسیلی دارند، کارآیی این روش‌ها به‌شدت محدود می‌شوند و هم چنین اغلب این روش‌ها فقط در محیط‌های اسیدی می‌توانند به‌کار روند (Yang et al., 2019).

روش‌های بر پایه رادیکال سولفاتی هم اخیراً مورد توجه قرار گرفته‌اند که همانند روش‌های هیدروکسیلی، رادیکال‌های با زمان نیمه عمر کوتاه و به‌شدت واکنش‌پذیر تولید می‌کنند. با این‌حال الگوی واکنش متفاوت آن منجر شده است که اشکالاتی که در سایر روش‌ها نظیر مشکل لجن آهن در فرآیند فنتون و سمیت روش ازناسیون وجود دارد، برطرف شوند. رادیکال‌های سولفاتی نیز قدرت اکسندگی بسیار بالایی (E_0 = 2.5-3.1 V) دارند و زمان نیمه عمر رادیکال‌های سولفاتی ۳۰ تا ۴۰ میکروثانیه است، در حالی‌که این مقدار برای رادیکال‌های هیدروکسیلی حدود ۲۰ نانو ثانیه گزارش شده است (Jaafarzadeh et al., 2016). همین امر موجب بروز تفاوت‌هایی میان این دو می‌شود، از جمله این‌که رادیکال‌های سولفاتی اندکی انتخاب پذیری بالاتری دارند. علاوه‌بر این، بازده کوانتومی (نسبت دفعات تکرار یک فرآیند به فوتون‌های جذب شده؛ در این‌جا منظور نسبت مولی تعداد رادیکال‌های تولید شده به فوتون‌های جذبی است) پروکسی دی‌سولفات نیز از هیدروژن پروکسید بیشتر (۱/۴ در مقایسه با ۱/۰) است (Miklos et al., 2018). به‌طور کلی رادیکال سولفاتی نسبت به رادیکال هیدروکسیلی در بازه pH وسیع‌تری می‌توانند مورد استفاده قرارگیرند. هم‌چنین عمده محصولات جانبی به‌دست آمده حاصل از واکنش این نوع رادیکال با مواد آلاینده، غیر مضر هستند (Giannakis et al., 2021). البته مهم‌ترین محدودیت استفاده روش‌های اکسیداسیون پیشرفته و به‌طور کلی روش‌های شیمیایی، هزینه عملیاتی بسیار بالای آن‌ها در مقایسه با روش زیستی و لخته‌سازی/ته‌نشینی است. از این‌رو بهینه‌سازی عوامل موثر ضروری است.

اگرچه حل‌شدن نمک‌های سولفاتی در آب منجر به تولید آنیون‌های سولفات مثل پروکسی دی‌سولفات[۵] ($S_2O_8^{2-}$, E = 2.01 V) می‌شود که به‌خودی خود اکسید کننده‌ای قوی است، اما در شرایط محیطی نرمال دما و pH، سرعت واکنش کمی دارد (Giannakis et al., 2021). با فعال‌کردن این آنیون توسط روش‌هایی مثل نور UV و گرما (واکنش (۱)) و یا استفاده از فلزات واسطه مانند مس، نقره، فررو و فرریک (Giannakis et al., 2021) (واکنش (۲))، رادیکال‌های سولفاتی ($SO_4^{\circ-}$) تولید می‌شوند.

$$S_2O_8^{2-} \xrightarrow{\Delta/UV} 2SO_4^{\circ-} \quad (۱)$$

$$S_2O_8^{2-} + M^{n+} \rightarrow SO_4^{\circ-} + SO_4^{2-} + M^{n+1} \quad (۲)$$

از روش دیگری هم می‌توان به تولید رادیکال‌های سولفاتی دست پیدا کرد. در این روش به‌جای استفاده از پروکسید دی‌سولفات، از پروکسید مونو سولفات[۶] (Peroxymonosulfate: HSO_5^-, E_0 = 1.82 V) استفاده می‌کند. این روش هم مکانیسم (واکنش‌های (۳) و (۴)) مشابهی با روش تولید با پروکسید دی‌سولفات دارد. اما همان‌طور که در واکنش (۳) نیز مشخص است می‌توان علاوه‌بر تولید رادیکال‌های سولفاتی به تولید رادیکال‌های هیدروکسیلی هم رسید.

$$HSO_5^- \xrightarrow{\Delta/UV} SO_4^{\circ-} + OH^{\circ} \quad (۳)$$

$$HSO_5^- + M^{n+} \rightarrow SO_4^{\circ-} + SO_4^{2-} + M^{n+1} \quad (۴)$$

پروکسی مونوسولفات نسبت به پروکسی دی‌سولفات بازده کوانتومی کمتری (۰/۵۲ در مقایسه با ۱/۴) دارد (Miklos et al., 2018). هم‌چنین به‌دلیل دسترسی کم و قیمت بالاتر آن (حدود سه برابر) نسبت به پروکسی دی‌سولفات در این تحقیق مورد

مطالعه قرار نمی‌گیرد.

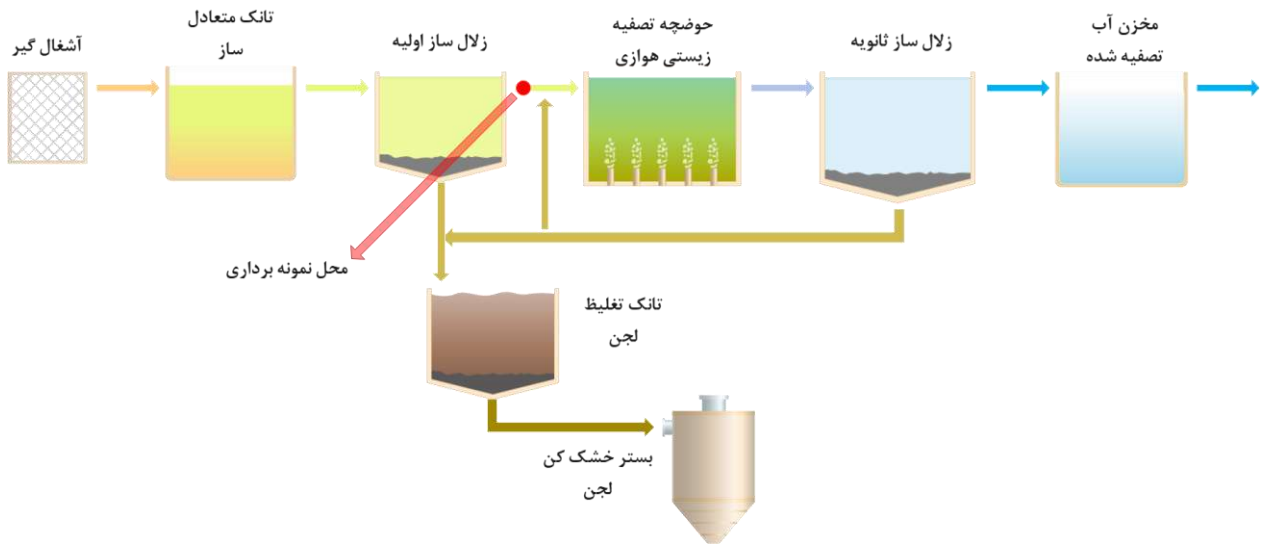
در میان روش‌های فعال‌سازی گفته شده، فعال‌سازی با UV به‌دلیل آسانی کنترل عملیات و قابلیت رسیدن به نرخ بالای تخریب مواد آلی بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. به‌طور کلی این روش از دو مسیر می‌تواند موجب تجزیه مواد آلی شود: الف) پیوند شیمیایی مواد آلوده کننده به‌صورت مستقیم توسط جذب نور UV شکسته شود؛ و ب) پیوند شیمیایی مواد آلوده‌کننده توسط رادیکال‌های فعال شده زیر نور UV شکسته شود. از جمله عوامل موثر در میزان کارآیی این روش می‌توان به دما و pH محیط، غلظت آلاینده، شدت نور UV، زمان واکنش و غلظت اولیه اکسید کننده اشاره نمود. در مطالعات بسیاری (Milh et al., 2021; Yi et al., 2021) اثر هرکدام از عوامل گفته شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. Jaafarzadeh et al. (2016) با استفاده از روش PDS/UV توانستند COD فاضلاب کارخانه خمیر و کاغذ، با مقدار COD اولیه ۱۵۳۷ میلی‌گرم اکسیژن بر لیتر، را تا ۴۲٪ در شرایط بهینه ۱۵ میلی‌مولار PDS و pH برابر ۶-۸ واحد حذف کنند. این درحالی است که با روش PMS/UV توانستند ۴۹/۹٪ حذف در شرایط بهینه ۲۰ میلی‌مولار PMS و pH اسیدی ۴ داشته باشند. Bashir et al. (2022) اقدام به تصفیه فاضلاب کارخانه خمیر و کاغذ با COD اولیه ۴۰۲۰ میلی‌گرم اکسیژن بر لیتر، به‌روش PDS/Heat نموده و مقدار بهینه نسبت اکسید کننده به COD را برابر ۹/۸ گزارش کردند که در این نسبت فرآیند قادر است ۸۴/۶۵ درصد از COD اولیه را حذف کند.

در این تحقیق با توجه به اهمیت تصفیه فاضلاب‌های کارخانه خمیر و کاغذ، اثر دو عامل موثر pH و غلظت عامل اکسیدکننده (پروکسی دی‌سولفات) در فرآیند اکسیداسیون پیشرفته رادیکال سولفاتی به‌منظور تصفیه فاضلاب این صنعت مورد بررسی قرارگرفت. بهینه‌سازی این عوامل با استفاده از طراحی آزمایش به‌روش سطح پاسخ (RSM) انجام شد و شرایط بهینه برای حصول بیشینه کاهش میزان COD فاضلاب و حصول بهترین نتیجه با حداقل هزینه اقتصادی مورد تحقیق قرارگرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- خصوصیات فاضلاب کارخانه خمیر و کاغذ

تهیه فاضلاب مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از نمونه برداری از واحد تصفیه‌خانه کارخانه خمیر و کاغذ اترک واقع در ایران، اصفهان/ زرین شهر از سرریز تانک زلال‌ساز اولیه انجام شد (شکل ۲).



شکل ۲- شمای تصفیه‌خانه کارخانه خمیر و کاغذ اترک و محل نمونه‌برداری

عمده محصول تولیدی این کارخانه کاغذ مقوایی است که از خمیرچوب (شیمیایی) و کاغذ بازیافتی تولید می‌شود. فاضلاب بعد از نمونه‌گیری، ایزوله و در دمای زیر ۴ درجه سانتی‌گراد و در تاریکی ذخیره شد. خصوصیات و ویژگی‌های به‌دست آمده از فاضلاب مورد استفاده به اختصار در جدول ۱ آورده شده است.

نتایج خود اظهاری انجام شده توسط کارخانه اترک نشان می‌دهد که علی‌رغم تصفیه فاضلاب در حوضچه بیولوژیکی و تانک زلال‌ساز ثانویه، هم‌چنان کیفیت فاضلاب خروجی فاقد استانداردهای لازم است و میانگین COD فاضلاب خروجی از تصفیه‌خانه در حدود ۷۷۰ میلی‌گرم اکسیژن بر لیتر است.

جدول ۱- مشخصات نمونه فاضلاب کارخانه خمیر و کاغذ اترک تهیه شده در ۴ خرداد ۱۴۰۱

مشخصه	مقدار (واحد)
pH	۶/۷۲
کل مواد جامد حل‌شده	۲۹۶۰ (mg/L)
کدورت	۱۴۳ (NTU)
COD کل	۴۶۵۰ (mg O_2/L)
COD نمونه فیلتر شده با فیلتر ۲۰ میکرو متری	۴۱۷۴ (mg O_2/L)
COD نمونه فیلتر شده با فیلتر ۲/۵ میکرو متری	۳۹۳۶ (mg O_2/L)
COD محلول	۲۸۶۳ (mg O_2/L)
BOD نمونه فیلتر شده با فیلتر ۲۰ میکرو متری	۱۵۸۲ (mg O_2/L)
BOD/COD (۲۰ میکرومتری)	۰/۳۷۹

با توجه به جدول ۱ حدود ۶۲ درصد از COD موجود در نمونه مربوط به ذرات کوچکتر از ۰/۲۲ میکرومتر یا COD محلول است که نشان می‌دهد، نمی‌توان فرآیند تصفیه را تنها محدود به این بازه از ذرات نمود و لازم است که ذرات بزرگتر نیز در فرآیند تصفیه درنظر گرفته شوند. از این‌رو کلیه آزمایش‌های انجام‌شده با فاضلاب فیلتر شده با فیلتر کاغذی کلاس واتمن ۴۱ (۲۰ میکرومتری) انجام پذیرفت.

۲-۲- مواد

پتاسیم پرسولفات ۹۹٪، اسید سولفوریک غلیظ، سدیم هیدروکسید ۱ مولار، پتاسیم کرومات ۹۹٪، سولفات جیوه ۹۹٪، سولفات نقره خالص و سدیم سولفیت ۹۸٪ از کمپانی مرک تهیه شد. پتاسیم یدید خالص نیز از شرکت قطران شیمی تهیه شد. هم‌چنین نشاسته از شرکت پارس شیمی تهیه شد.

۲-۳- روش‌های مشخصه‌یابی

برای اندازه‌گیری pH، TDS و دما از دستگاه Aqualitic AL15 استفاده شد. روش محاسبه COD و BOD برپایه استاندارد APHA (2017) انجام شد. برای جلوگیری از خطای پروکسی دی‌سولفات باقیمانده در محلول بر نتیجه آزمون COD، پس از انجام فرآیند تصفیه طبق روش پیشنهادی (J. Yang et al., 2019) عمل شد. در روش پیشنهادی، پس از اتمام زمان واکنش با نسبت مولی دو برابر پروکسی دی‌سولفات اولیه، سدیم سولفیت به محلول اضافه می‌شود و به‌مدت ۶۰ دقیقه بر روی استیرر در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. در این‌صورت رادیکال‌های ایجاد شده طبق واکنش‌های ۵ و ۶ به‌سرعت با سدیم سولفیت واکنش‌داده و از بین می‌روند. برای از بین بردن سدیم سولفیت مصرف نشده، به‌ازای هر ۲۰ میلی‌لیتر محلول، ۱ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ اضافه کرده و به‌مدت ۳۰ دقیقه هوادهی می‌شود.

$$SO_4^{\circ-} + SO_3^{2-} \rightarrow SO_4^{2-} + SO_3^{\circ-} \quad (۵)$$

$$SO_3^{\circ-} + SO_3^{2-} \rightarrow SO_3^{2-} + SO_3 \quad (۶)$$

$$S_2O_8^{2-} + SO_3^{2-} \rightarrow SO_3 + 2SO_4^{2-} \quad (۷)$$

۲-۴- طراحی آزمایش و انتخاب عوامل

در اکثر مطالعات انجام گرفته پیشین، آزمایش‌ها به‌صورت تک‌عاملی انجام شده است. به این‌صورت که یکی از عامل‌های مورد مطالعه به‌صورت سیستماتیکی تغییر می‌کند، در حالی‌که سایر عوامل ثابت نگه‌داشته می‌شود. برای بررسی اثر متقابل پارامترهای مختلف و هم‌چنین جلوگیری از تکرار آزمایش‌های اضافی و به حداقل رساندن تعداد آزمایش‌ها از طراحی آزمایش استفاده می‌شود. روش CCD مبتنی بر روش پاسخ سطح برای طراحی آزمایش به‌دلیل بهینه‌کردن فاکتورها با تعداد کمتر آزمایش، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با استفاده از RSM شامل شش مرحله متوالی است: ۱) انتخاب متغیرهای مستقل و پاسخ‌های ممکن، ۲) انتخاب استراتژی طراحی آزمایش، ۳) اجرای آزمایش‌ها و به‌دست‌آوردن نتایج، ۴) برازش معادله مدل با داده‌های تجربی، ۵) به‌دست‌آوردن نمودارهای پاسخ و تأیید مدل (ANOVA) و ۶) تعیین شرایط بهینه (Witek-Krowiak et al., 2014). برای روش CCD تعداد کل آزمایش‌های مورد نیاز طبق رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$N = K^2 + 2K + n \quad (۸)$$

که N: تعداد کل آزمایش‌ها، K: تعداد عوامل و n: تعداد تکرار در نقطه مرکزی هستند. برای تعیین محل نقطه α، از رابطه (۹) استفاده می‌شود.

$$\alpha = \left(2^k\right)^{1/4} \quad (۹)$$

معادله Quadratic مدل برای پیش‌بینی نقطه بهینه طبق رابطه (۱) بیان می‌شود.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_{ii}^2 + \sum_{i=1}^{k} \sum_{i \neq j=1}^{k} \beta_{ij} x_i x_j \quad (۱۰)$$

که Y: بیانگر پاسخ، K: تعداد عوامل متغیر، β_0: عرض از مبدا، i، ii و ij همراه با β: بیانگر مقدار ضرایب اثرات خطی، Quadratic و برهمکنش عوامل و x_i و x_j: نشان‌دهنده سطوح کد شده متغیرهای مستقل هستند (Pishbin et al., 2021). همبستگی بین پاسخ و متغیرهای مستقل نیز می‌تواند توسط مدل خطی یا Quadratic بیان شود. در این تحقیق برای انجام طراحی آزمایش، تحلیل واریانس و بهینه‌سازی از نرم‌افزار Design Expert 13.0.1.0 استفاده شد.

عواملی نظیر دما، pH، شدت نور UV، مدت زمان واکنش و غلظت اولیه پرسولفات از جمله عوامل دخیل در میزان کارایی فرآیند PDS/UV هستند. دمای آزمایش به‌صورت ثابت در دمای محیط درنظر گرفته شد و با توجه به نتیجه (Deng and Ezyske, 2011) که دمای زیر ۴۰ درجه سانتی‌گراد را در فعال‌سازی پرسولفات قابل‌توجه نمی‌داند از تغییرات دمایی صرف‌نظر شد.

مطالعات گوناگونی مانند (Amor et al., 2019, 2021) اثر اکسیدکننده بر حذف COD را مورد مطالعه قرار داده‌اند، اما بررسی رابطه بین COD اولیه فاضلاب و غلظت اکسید کننده به‌کار رفته مقداری مشکل است و خواننده را دچار سردرگمی می‌کند. هم‌چنین از طرفی خصوصیات فاضلاب از جمله COD آن می‌تواند در یک کارخانه مشخص هر روز دچار تغییر و نوسان شود.

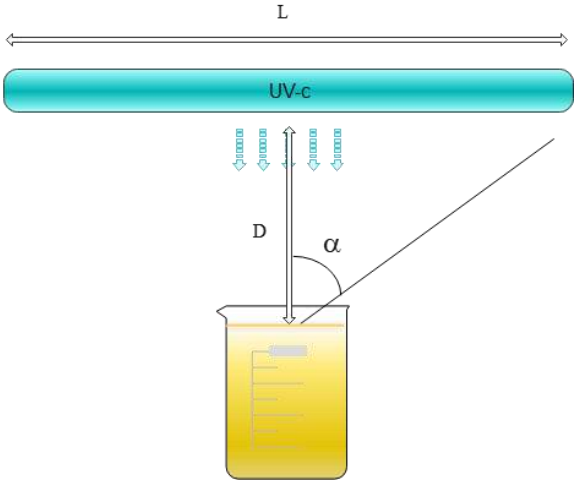
از این‌رو لازم است که کمیتی تعریف شود تا بر مبنای COD_0 فاضلاب باشد. در این تحقیق همانند Chen et al. (2019) از کمیت غلظت اکسید کننده بدون بعد[۷] استفاده می‌شود. DOD از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود. طبق تعریف Jung et al. (2017) به‌صورت تئوری، DOD = 1 برابر است با مقدار مشخصی از اکسید کننده که قادر است تمامی COD را اکسید کند.

$$DOD = \frac{Oxidant\ dose\ (\frac{mg}{L})}{f.COD_0(\frac{mg}{L})} \quad (۱۱)$$

که f: ضریب برابری است که از موازنه الکترونی به‌دست می‌آید و برای هیدروژن پروکسید برابر ۲/۱۲۵، برای ازن برابر ۳ و برای پروکسی دی‌سولفات برابر ۱۲ است (Jung et al., 2017). عامل شدت نور UV-C هم از پارامترهای تاثیرگذار در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته بر پایه فعال‌سازی با استفاده از نور UV است. عوامل موثر در محاسبه شدت نور در شکل ۳ نشان‌داده شده است. برای محاسبه انرژی وارده به محلول از رابطه پیشنهادی انجمن بین المللی ماوراء بنفش[۸]، طبق رابطه (۱۲)، استفاده می‌شود:

$$P_\varphi = \frac{20E\pi^2 DL}{2\alpha + \sin 2\alpha} \quad (۱۲)$$

که P: توان خالص خروجی لامپ برحسب وات (W)؛ E: انرژی رسیده به محلول برحسب ($mW.\ c.m^{-2}$)؛ D: فاصله محلول از مرکز لامپ؛ L: طول لامپ و α: زاویه محلول با لامپ برحسب رادیان هستند. در مطالعات انجام شده متوسط توان لامپ استفاده شده برای فرآیند PDS/UV ۲۰ تا ۶۴ وات است (Khataee, 2010; Lou et al., 2016). در این تحقیق این پارامتر نیز به‌صورت ثابت درنظر گرفته می‌شود.



شکل ۳- پارامترهای موثر در محاسبه شدت نور به‌روش IUAI

در این پژوهش از سه عدد لامپ ۸ وات UV-C از نوع کم فشار جیوه برند فیلیپس استفاده شد. طول هرکدام از لامپ‌ها برابر ۲۸ سانتی‌متر و فاصله متوسط لامپ از محلول ۸ سانتی‌متر در محاسبات منظور شد. با فرض برابری توان خروجی لامپ و توان اسمی، انرژی رسیده به محلول حدودا برابر ۱/۶۱ mW/cm^2 به‌دست می‌آید که با توجه به نتایج Milh et al., (2021) مقدار قابل‌قبولی برای فعال‌سازی پروکسی دی‌سولفات است. طبق آن‌چه گفته شد دو عامل غلظت اولیه اکسید کننده و pH محیط به‌عنوان عوامل مورد مطالعه انتخاب و طراحی آزمایش طبق آن‌ها صورت‌پذیرفت. سطوح انتخابی برای طراحی آزمایش به‌اختصار در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- سطوح انتخابی برای طراحی آزمایش به‌روش CCD برای فرآیند رادیکال سولفاتی

سطح	۱/۴۱	۱	۰	-۱	-۱/۴۱
DOD (PDS)	۱	۰/۸۵۴	۰/۵	۰/۱۴۶	۰
pH	۱۱	۹/۸۱	۷	۴/۱۷	۳

۲-۵- روش انجام آزمایشات

ابتدا ۱۰۰ میلی‌لیتر فاضلاب از یخچال خارج شده و با همان مقدار آب مقطر، برای جلوگیری از استفاده بیشتر مواد شیمیایی مضر رقیق‌سازی شد. بعد از رسیدن به دمای محیط، pH با استفاده از اسید سولفوریک ۵ نرمال و سدیم‌هیدروکسید ۱ مولار تنظیم می‌شد و سپس پتاسیم پروکسی دی‌سولفات به مقدار مورد نظر اضافه گشته و تحت تابش لامپ‌های UV-C قرار می‌گرفت. برای تشخیص زمان اتمام واکنش ابتدا یک پیش آزمایش با DOD برابر ۱ و pH برابر ۷ انجام گرفت. هر یک ساعت تست یدومتری مطابق روش Deng and Ezyske (2011) برای تشخیص نقطه پایان واکنش انجام می‌شد، به این‌صورت که ۰/۵ میلی‌لیتر از محلول به ۲۰ میلی‌لیتر محلول ۱ گرم بر لیتر نشاسته و ۱ گرم بر لیتر پتاسیم یدید اضافه می‌شد. آبی شدن محلول به‌معنی وجود پرسولفات در نمونه بود و درصورت عدم‌تغییر رنگ، محلول آزمایش متوقف می‌شد. توجه شود که به‌علت درجه اول بودن واکنش، همیشه مقداری پرسولفات در محلول باقی می‌ماند، پس تغییر رنگ محلول در ۴۵ دقیقه ابتدایی از زمان نمونه‌گیری لحاظ شد. مقدار زمان به‌دست آمده از این روش برابر ۱۲ ساعت اندازه‌گیری شد که با توجه به طولانی بودن زمان ماند هیدرولیکی فاضلاب در حوضچه بیولوژیکی در کارخانه مذکور (۳۵ تا ۴۰ ساعت) پارامتر محدودکننده محسوب نمی‌شود و در مطالعه کنونی تغییرات آن مورد بحث قرار نمی‌گیرد.

۳- نتایج و بحث

با استفاده از ۴ نقطه محوری، ۴ نقطه فاکتوریل و ۳ نقطه مرکزی سطوح واقعی و کدگذاری شده و هم‌چنین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده برای پاسخ‌های موردنظر به‌دست آمد. نتایج حاصل از پاسخ‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها به اختصار در جدول ۳ آورده شده‌است.

جدول ۳- ماتریس CCD میانگین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده برای درصد حذف COD با روش رادیکال سولفاتی

ترتیب آزمایش	DOD		pH		درصد حذف COD		
	مقدار واقعی	مقدار پیش‌بینی شده	مقدار واقعی	مقدار پیش‌بینی شده	مقدار واقعی	مقدار پیش‌بینی شده	باقی‌مانده
۱	صفر	۰/۵	-α	۳	۵۱/۷۵	۵۲/۹۷	-۱/۲۲
۲	+α	۱	صفر	۷	۷۵/۴۷	۷۳/۴۱	۲/۰۶
۳	-۱	۰/۱۴۶	-۱	۴/۱۷	۲۷/۰۵	۲۴/۶۶	۲/۲۳
۴	-α	۰	صفر	۷	۷/۵۶	۹/۷۶	-۲/۲
۵	-۱	۰/۱۴۶	+۱	۹/۸۳	۲۸/۴۴	۲۷/۶۸	۰/۷۶۳۸
۶	صفر	۰/۵	صفر	۷	۶۰/۴۱	۵۹/۶	۰/۸۰۹۳
۷	صفر	۰/۵	+α	۱۱	۵۹/۶۴	۵۸/۵۶	۱/۰۸
۸	+۱	۰/۸۵۴	+۱	۹/۸۳	۷۱/۳۸	۷۳/۶۲	-۲/۲۵
۹	صفر	۰/۵	صفر	۷	۵۷/۵۲	۵۹/۶	-۲/۰۸
۱۰	صفر	۰/۵	صفر	۷	۶۰/۸۷	۵۹/۶	۱/۲۷
۱۱	+۱	۰/۸۵۴	-۱	۴/۱۷	۶۸/۱۱	۶۸/۷۳	-۰/۶۲۵۱

همان‌طور که در جدول ۳ مشخص است بیشترین مقدار حذف COD برابر ۷۵/۴۷٪ است و حداقل مقدار آن ۷/۵۶٪ به‌دست آمد که این مقدار مربوط به آزمایش بدون اکسید کننده است. بنابراین این مقدار حذف را می‌توان به اثر فتولیز نور UV نسبت داد.

۳-۱- مدلسازی و تحلیل واریانس (ANOVA)

برای ارزیابی اهمیت هر یک از پارامترها از عدد احتمال (P-value) استفاده شد. در این‌حالت، متغیرهایی که ضریب احتمال کمتر از ۰/۰۵ را نشان می‌دهند، تأثیر معناداری بر روی پاسخ فرآیند داشته‌اند (Pour Hosseini et al., 2017). مدل پیشنهادی نرم‌افزار برای تحلیل پاسخ اول Quadratic است. آنالیز واریانس (ANOVA) مدل رگرسیون پاسخ (درصد حذف COD) با عنایت به‌مقدار بسیار کوچک ضریب احتمال (۰/۰۰۰۱ >) و فیشر محاسبه‌شده (F-value = 151.37) نشان‌می‌دهد که مدل بسیار معنی‌دار است (جدول ۴). از درجه معناداری نتیجه‌گیری می‌شود که عوامل غلظت اولیه پروکسی سولفات (A) و اثر درجه دوم غلظت اولیه (A^2)، معنادار است. در مقابل اثر متقابل دو پارامتر اولیه (AB) و اثر درجه اول (B) و دوم پارامتر pH (B^2) قابل‌توجه نیستند، اگرچه مقدار P-value عامل pH به‌گونه‌ای نیست که کاملا هم قابل اغماض تلقی شود.

جدول ۴- تجزیه و تحلیل واریانس برای درصد حذف COD با استفاده از روش رادیکال سولفاتی به‌دست‌آمده با روش CCD

منبع	جمع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	ضریب فیشر	ضریب احتمال
مدل	۴۵۴۴/۶۹	۵	۹۰۸/۹۴	۱۵۱/۳۷	< ۰/۰۰۰۱
DOD -A	۴۰۵۰/۸۸	۱	۴۰۵۰/۸۸	۶۲/۶۷۴	< ۰/۰۰۰۱
pH -B	۳۱/۲۷	۱	۳۱/۲۷	۵/۲۱	۰/۰۷۱۴
AB	۰/۸۸۱۷	۱	۰/۸۸۱۷	۰/۱۴۶۸	۰/۷۱۷۳
A^2	۴۵۸/۳۴	۱	۴۵۸/۳۴	۷۶/۳	۰/۰۰۰۳
B^2	۲۰/۷۶	۱	۲۰/۷۶	۳/۴۶	۰/۱۲۲۱
باقیمانده‌ها	۳۰/۰۲	۵	۶		
عدم برازش	۲۳/۴۵	۳	۷/۸۲	۲/۳۸	۰/۳۰۹۷
خطای خالص	۶/۵۷	۲	۳/۲۹		
کل تصحیح شده	۴۵۷۴/۷۱	۱۰			
R^2	۰/۹۹۳۴	انحراف معیار	۲/۴۵		
R^2 تعدیل **شده**	۰/۹۹۳۴	میانگین	۵۱/۶۵		
R^2 پیش‌بینی شده	۰/۹۸۶۹	ضریب پراکندگی (٪)	۴/۷۴		
کفایت دقت	۳۵/۲۸۸۴	مجموع مربعات خطای باقی‌مانده پیش‌بینی شده	۱۸۱/۵۴		

مدل رگرسیون حذف COD دارای مقدار R^2 = ۰/۹۹۳۴ است، به این معنی که ۹۹/۳۴ درصد تغییرات در درصد حذف COD به عوامل مستقل نسبت داده می‌شود و مدل نمی‌تواند فقط ۰/۶۶ درصد از کل تغییرات را توصیف کند. از سوی دیگر، اختلاف مقادیر ضریب تعیین تعدیل‌شده و پیش‌بینی شده کمتر از ۰/۲ است و سایر نتایج آماری نیز مانند کفایت دقت[۹] مدل (باید کمتر از ۴ باشد) و ضریب درصد تغییرات همگی نشانگر دقت قابل‌قبول و صحت مدل به‌دست آمده است.

روابط ریاضی بین متغیرهای مستقل انتخاب‌شده و پاسخ با معادلات رگرسیون چند جمله‌ای مرتبه دوم زیر با استفاده از ضرایب تعیین‌شده به‌صورت روابط (۱۳) و (۱۴) به‌دست می‌آید:

$$Y_{\text{(معادله کد شده)}} = 59.6 + 22.5\,A + 1.98\,B - 0.4695\,AB - 9.01\,A^2 - 1.92\,B^2 \quad (۱۳)$$

$$Y_{\text{(معادله واقعی)}} = -5.2345 + 132.4332\,A + 3.8197\,B - 0.4695\,AB - 72.0732\,A^2 - 0.2397\,B^2 \quad (۱۴)$$

که A برای غلظت پروکسی دی‌سولفات اولیه و B برای pH به‌کار رفته‌است. مقادیر ضرایب منفی در معادله‌های کد شده نشان‌دهنده همبستگی متضاد بین متغیرها است، در حالی‌که ضریب مثبت دلالت بر یک رابطه هم‌افزایی بین متغیرها دارد. علاوه‌بر ضریب همبستگی، کفایت مدل‌ها توسط باقی‌مانده‌ها نیز (تفاوت بین مقدار پاسخ مشاهده شده و پیش‌بینی شده) ارزیابی شد.

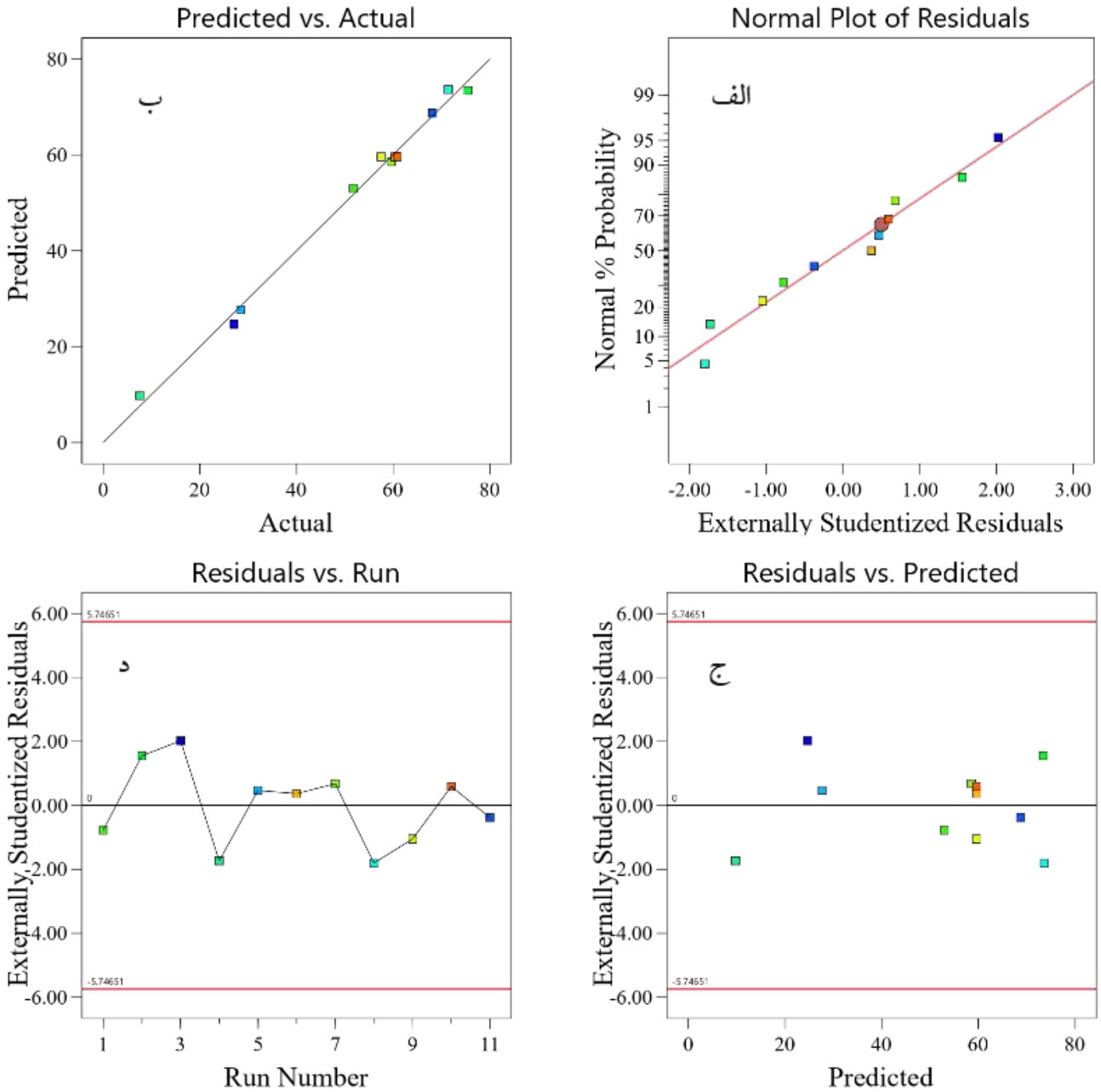
باقی‌مانده‌ها به‌عنوان اصلی از تغییرات غیرقابل توضیح توسط مدل برازش شده تصور می‌شوند و سپس انتظار می‌رود که طبق یک توزیع نرمال رخ دهند. شکل ۴-الف نشان‌دهنده نمودار باقی‌مانده در مقابل احتمال نرمال است. جای‌گیری نقاط باقی‌مانده بر روی یک خط مستقیم تضمین می‌کند که هیچ نشانه‌ای از غیرنرمال بودن نتایج تجربی وجود ندارد و از الگوی خاصی پیروی نمی‌کنند، که نشان‌دهنده تصادفی بودن خطاها است. هم‌چنین برازش منحنی درصدهای نظری و تجربی

(مشاهده‌شده) برای تأیید اهمیت و سازگاری مدل‌های تجربی انجام شد. همان‌طور که در شکل ۴-ب نشان داده‌شده‌است، درصد حذف COD تئوری و تجربی مطابقت خوبی دارند، که نشان‌دهنده کفایت مدل است.

نمودارهای سطح سه‌بعدی و دوبعدی برای درصد حذف COD فرآیند رادیکال سولفاتی در شکل ۵ آورده شده‌اند. در این شکل درصد حذف COD برحسب عوامل DOD و pH نشان‌داده شده است. مشاهده می‌شود که درصد حذف به‌شدت تابع غلظت اولیه PDS است و می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزایش غلظت PDS منجر به تولید رادیکال‌های سولفاتی بیشتر و تجزیه بیشتر مواد ایجادکننده آلودگی می‌شود. اما شیب افزایش حذف COD با افزایش غلظت اکسیدکننده کاهش می‌یابد. دلیل این امر به تمایل بسیار بالای واکنش رادیکال‌های تولید شده با یکدیگر و همچنین PDS است (واکنش‌های (۱۵) و (۱۶)) (Babaei and Ghanbari, 2016).

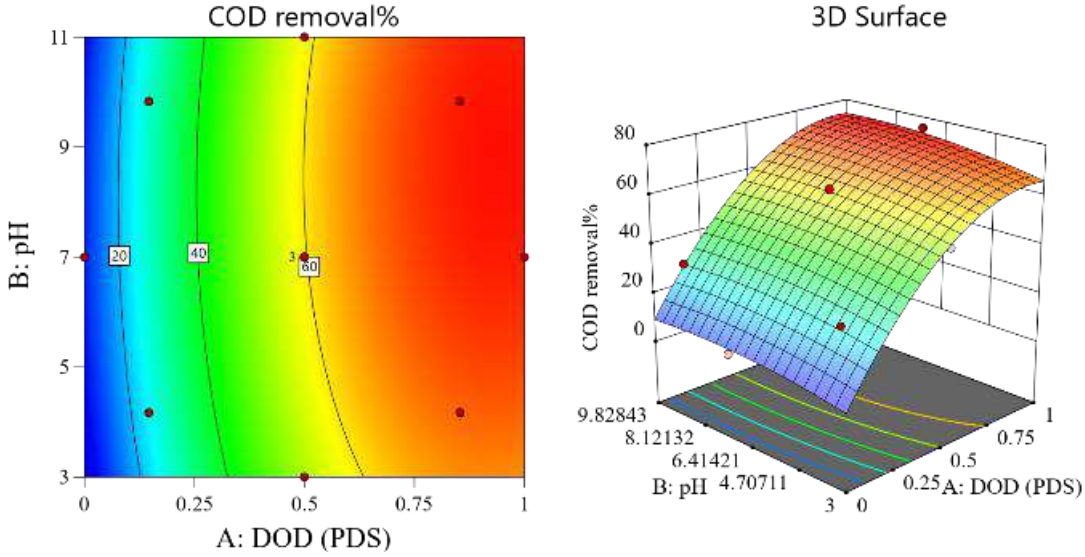
$$SO_4^{\circ-} + SO_4^{\circ-} \rightarrow S_2O_8^{2-} \quad k = 3.1 \times 10^8\ M^{-1}s^{-1} \qquad (۱۵)$$

$$SO_4^{\circ-} + S_2O_8^{2-} \rightarrow S_2O_8^{2-} + SO_4^{2-} \quad k = 1.2 \times 10^6\ M^{-1}s^{-1} \qquad (۱۶)$$



شکل ۴- (الف و ب) نمودار نرمال باقی‌مانده‌ها و مقادیر پیش‌بینی شده در مقابل واقعی و (ج و د) نمودارهای باقی‌مانده برای حذف COD با روش PDS/UV

فرآیند در pHهای بازی اندکی بهتر در حذف COD عمل می‌کند ولی در کل تغییر قابل‌توجهی با تغییرات pH از خود نشان نمی‌دهد و بهترین عملکرد در مقادیر نزدیک به pH خنثی مشاهده می‌شود. هم‌چنین Boczkaj and Fernandes (2017) با مطالعه منابع گوناگون نتیجه‌گیری کرده‌اند که در فاضلاب‌های واقعی، مشابه فاضلاب استفاده‌شده در این تحقیق، اثر pH بر روی بازدهی فرآیند قابل‌اغماض است. این موضوع با عنایت به ضریب pH در معادله واقعی به‌دست آمده و مقدار ضریب احتمال در جدول ۴ قابل پیش‌بینی است. هم‌چنین Chen et al. (2019) نیز در تصفیه شیرابه خام زباله شهری (COD_0 = 1096 mg/L) با روش PDS/Heat گزارش کرده‌اند که فرآیند در pH بازی، اندکی عملکرد بهتری دارد ولی در کل، به‌خصوص برای مقادیر بالای DOD تاثیر ناچیزی بر عملکرد فرآیند دارد. هم‌چنین ایشان در نسبت DOD برابر ۱ (بنا به تعریف DOD در این مقاله) حدود ۸۲ درصد از COD اولیه را توانسته‌اند حذف کنند که حدود ۷٪ بالاتر از بهترین نتیجه به‌دست آمده در تحقیق کنونی است. Deng and Ezyske (2011) با استفاده از روش PDS/Heat نسبت به تصفیه شیرابه زباله با COD اولیه ۱۲۵۴ میلی‌گرم بر لیتر اقدام کردند. برخلاف نتایج این تحقیق و سایر تحقیقات پیشین، ایشان در pHهای اسیدی نتیجه بهتری نسبت به شرایط بازی برای حذف COD حاصل کرده‌اند، به‌طوری‌که با افزایش pH از ۳ تا ۸/۳ حدود ۱۲ درصد افت را نشان می‌دهد. در DOD = 1 و در شرایط اسیدی و دمایی بهینه حدود ۷۹٪ حذف COD را گزارش کرده‌اند.



شکل ۵- نمودارهای سه‌بعدی و دو بعدی به‌دست‌آمده برای حذف COD با روش رادیکال سولفاتی

۳-۲- بهینه‌سازی

برای تعیین بهترین شرایط عملیاتی برای اهداف مشخص‌شده، جعبه‌ابزار بهینه‌سازی پاسخ موجود در نرم‌افزار Design Expert برای روش CCD برای شناسایی ترکیب بهینه از متغیرهای فرآیند عملیاتی که به‌طور مشترک می‌تواند بهینه‌سازی را انجام دهد، استفاده شد. بدین منظور برای متغیر غلظت اکسید کننده هدف کمینه و برای درصد حذف COD هدف بیشینه با درجه اهمیت یکسان درنظر گرفته شد. مقدار بهینه ۵۳/۵۳٪ حذف COD در DOD برابر ۰/۴۰۷ و pH برابر ۸/۳۷ به‌دست آمد. هزینه عملیاتی با توجه به نتایج بهینه و درنظر گرفتن حدود ۶۰۰ هزار ریال به ازای ۱ کیلوگرم پتاسیم پروکسی دی‌سولفات (Wacławek et al., 2017)، ۲۹۳۰ ریال برای حذف ۱ میلی‌گرم بر لیتر COD محاسبه می‌شود. Babaei and Ghanbari (2016) در تحقیقی با مقایسه چندین روش مختلف برای تصفیه فاضلاب پتروشیمی، هزینه حذف ۱ کیلوگرم COD با روش PDS/UV را ۲۲/۹۶ دلار ایالات متحده آمریکا برآورد کرده است، که حدود ۳ تا ۴ برابر هزینه برآورد شده در این تحقیق است. برای صحت‌سنجی مدل نیز در مقادیر بهینه به‌دست آمده، آزمایش صحت‌سنجی انجام شد. در این آزمایش مقدار ۵۱/۸۶ درصد حذف COD مشاهده شد که مطابقت خوبی با مقدار پیش‌بینی شده دارد و صحت مدل به‌دست آمده را تایید می‌کند.

۴- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این تحقیق تصفیه فاضلاب کارخانه خمیر و کاغذ با استفاده از PDS/UV انجام و نشان‌داده شد که این‌روش قابلیت خوبی برای

کاهش مواد آلی موجود در فاضلاب دارد، به‌طوری‌که تا ۷۵٪ از COD موجود در آن را می‌توان حذف کرد. با استفاده از طراحی آزمایش تاثیر دو عامل غلظت اولیه اکسید کننده و pH اولیه مطالعه شد، که دقت بالای مدل به‌دست آمده، صحت آن‌را اثبات نمود. نتیجه‌گیری شد که حذف مواد آلی از فاضلاب به شدت تابع غلظت اولیه اکسیدکننده است و در مقابل تاثیر اندکی از pH اولیه می‌پذیرد و اثر متقابل این دو عامل نیز تاثیری ندارد. در حالت بهینه اقتصادی هزینه حذف ۱ میلی‌گرم بر لیتر COD برابر ۲۹۳۰ ریال به‌دست آمد که هزینه بالایی برای حذف مواد آلی تا مقدار استاندارد است. از این‌رو پیشنهاد می‌شود که به‌عنوان روش کمکی برای تصفیه زیستی به‌کار برده شود و مطالعات بیشتری در این زمینه برای تغییرات BOD و سمیت فاضلاب بعد از تصفیه با این روش، انجام شود.

۵- پی‌نوشت‌ها

1- Absorbable Organic Halogens (AOX)
2- Chemical Oxygen Demand (COD)
3- Biological Oxygen Demand (BOD)
4- Advanced Oxidation Process (AOP)
5- Peroxy disulfate (PDS)
6- Peroxy monosulfate (PMS)
7- Dimensionless Oxidant Dose (DOD)
8- International Ultraviolet Association Inc (IUAI)
9- Adequate precision

۶- مراجع

Ahmadi, A., Sarrafzadeh, M.-H., Hosseinian, A., and Ghaffari, S.-B., (2022), "Foulant layer degradation of dye in Photocatalytic Membrane Reactor (PMR) containing immobilized and suspended NH2-MIL125(Ti) MOF led to water flux recovery", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1), 106999, https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106999.

Amor, C., Fernandes, J.R., Lucas, M.S., and Peres, J.A., (2021), "Hydroxyl and sulfate radical advanced oxidation processes: Application to an agro-industrial wastewater", *Environmental Technology and Innovation*, 21, 101183, https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101183.

Amor, C., Rodríguez-Chueca, J., Fernandes, J.L., Domínguez, J.R., Lucas, M.S., and Peres, J.A., (2019), "Winery wastewater treatment by sulphate radical based-advanced oxidation processes (SR-AOP): Thermally vs UV-assisted persulphate activation", *Process Safety and Environmental Protection*, 122, 94-101, https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.11.016.

Anandan, S., Kumar Ponnusamy, V., and Ashokkumar, M., (2020), "A review on hybrid techniques for the degradation of organic pollutants in aqueous environment", *Ultrasonics Sonochemistry*, 67, 105130, . https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105130.

American Public Health Association (APHA), (2017), *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 23th Edition, University of California, USA, 1268 p.

Babaei, A.A. and Ghanbari, F., (2016), "COD removal from petrochemical wastewater by UV/hydrogen peroxide, UV/persulfate and UV/percarbonate: Biodegradability improvement and cost evaluation", *Journal of Water Reuse and Desalination*, 6(4), 484-494, https://doi.org/10.2166/wrd.2016.188.

Bashir, M.J.K., Sheen, O.S., Ng, C.A., Abujazar, M.S.S., Alazaiza, M.Y.D., and Abu Amr, S.S., (2022), "Advanced treatment of palm oil mill effluent using thermally activated persulfate oxidation", *Separations*, 9(7), 171, https://doi.org/10.3390/separations9070171.

Boczkaj, G., and Fernandes, A., (2017), "Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes at basic pH conditions: A review", *Chemical Engineering Journal*, 320, 608-633, https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.03.084.

Carvalho Neves, L., Beber de Souza, J., de Souza Vidal, C.M., Herbert, L.T., de Souza, K.V., Geronazzo Martins, K., and Young, B.J., (2020), "Phytotoxicity indexes and removal of color, COD, phenols and ISA from pulp and paper mill wastewater post-treated by UV/H_2O_2 and photo-Fenton", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 202, 110939, https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110939.

Chen, C., Feng, H., and Deng, Y., (2019), "Re-evaluation of sulfate radical based–advanced oxidation processes (SR-AOPs) for treatment of raw municipal landfill leachate", *Water Research*, 153, 100-107, https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.013.

Chong, M.N., Jin, B., Chow, C.W.K., and Saint, C., (2010), "Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review", *Water Research*, 44(10), 2997-3027, https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039.

Deng, Y., and Ezyske, C.M., (2011), "Sulfate radical-advanced oxidation process (SR-AOP) for simultaneous removal of refractory organic contaminants and ammonia in landfill leachate", *Water Research*, 45(18), 6189-6194, https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.09.015.

Giannakis, S., Lin, K.-Y.A., and Ghanbari, F., (2021), "A review of the recent advances on the treatment of industrial wastewaters by Sulfate Radical-based Advanced Oxidation Processes (SR-AOPs)", *Chemical Engineering Journal*, 406, 127083, https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127083.

Jaafarzadeh, N., Omidinasab, M., and Ghanbari, F., (2016), "Combined electrocoagulation and UV-based sulfate radical oxidation processes for treatment of pulp and paper wastewater", *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 462-472, https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.04.019.

"Effluent Organic Matter (EfOM) in wastewater: Constituents, effects, and treatment", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 36(4), 327-374, https://doi.org/10.1080/10643380600580011.

Wacławek, S., Lutze, H.V., Grübel, K., Padil, V.V.T., Černík, M., and Dionysiou, D.D., (2017), "Chemistry of persulfates in water and wastewater treatment: A review", *Chemical Engineering Journal*, 330, 44-62, https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.07.132.

Witek-Krowiak, A., Chojnacka, K., Podstawczyk, D., Dawiec, A., and Pokomeda, K., (2014), "Application of response surface methodology and artificial neural network methods in modelling and optimization of biosorption process", *Bioresource Technology*, 160, 150-160, https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.021.

Yang, J., Liu, Z., Zeng, Z., Huang, Z., and Cui, Y., (2019), "A method for removing persulfate interference in the analysis of the chemical oxygen demand in wastewater", *Environmental Chemistry Letters*, 17(2), 1085-1089, https://doi.org/10.1007/s10311-018-00832-2.

Yang, Q., Ma, Y., Chen, F., Yao, F., Sun, J., Wang, S., Yi, K., Hou, L., Li, X., and Wang, D., (2019), "Recent advances in photo-activated Sulfate Radical-Advanced Oxidation Process (SR-AOP) for refractory organic pollutants removal in water", *Chemical Engineering Journal*, 378, 122149, https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122149.

Yi, X.-H., Ji, H., Wang, C.-C., Li, Y., Li, Y.-H., Zhao, C., Wang, A., Fu, H., Wang, P., Zhao, X., and Liu, W., (2021), "Photocatalysis-activated SR-AOP over PDINH/MIL-88A(Fe) composites for boosted chloroquine phosphate degradation: Performance, mechanism, pathway and DFT calculations", *Applied Catalysis B: Environmental*, 293, 120229, https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120229.

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

Jung, C., Deng, Y., Zhao, R., and Torrens, K., (2017), "Chemical oxidation for mitigation of UV-quenching substances (UVQS) from municipal landfill leachate: Fenton process versus ozonation", *Water Research*, 108, 260-270, https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.005.

Khataee, A.R., (2010), "Optimization of UV-promoted peroxydisulphate oxidation of C.I. Basic Blue 3 using response surface methodology", *Environmental Technology*, 31(1), 73-86, https://doi.org/10.1080/09593330903358302.

Lou, X., Xiao, D., Fang, C., Wang, Z., Liu, J., Guo, Y., and Lu, S., (2016), "Comparison of UV/hydrogen peroxide and UV/peroxydisulfate processes for the degradation of humic acid in the presence of halide ions", *Environmental Science and Pollution Research*, 23(5), 4778-4785, https://doi.org/10.1007/s11356-015-5232-x.

Miklos, D.B., Remy, C., Jekel, M., Linden, K.G., Drewes, J.E., and Hübner, U., (2018), "Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment, A critical review", *Water Research*, 139, 118-131, https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.042.

Milh, H., Yu, X., Cabooter, D., and Dewil, R., (2021), "Degradation of ciprofloxacin using UV-based advanced removal processes: Comparison of persulfate-based advanced oxidation and sulfite-based advanced reduction processes", *Science of The Total Environment*, 764, 144510, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144510.

Oller, I., Malato, S., and Sánchez-Pérez, J.A.A., (2011), "Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for wastewater decontamination, A review", *Science of The Total Environment*, 409(20), 4141-4166, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.061.

Pishbin, M., Sarrafzadeh, M.-H., and Faramarzi, M.A., (2021), "Nitrate and Phosphate removal efficiency of synechococcus elongatus under mixotrophic and heterotrophic conditions for wastewater treatment", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(3), 1831-1843, https://doi.org/10.1007/s40996-020-00514-6.

Pokhrel, D., and Viraraghavan, T., (2004), "Treatment of pulp and paper mill wastewater, A review", *Science of The Total Environment*, 333(1-3), 37-58, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.05.017.

Pour Hosseini, S.R., Tavakoli, O., and Sarrafzadeh, M.H., (2017), "Experimental optimization of SC-CO_2 extraction of carotenoids from Dunaliella salina", *The Journal of Supercritical Fluids*, 121(3), 89-95, https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.11.006.

Samsami, S., Mohamadizaniani, M., Sarrafzadeh, M.-H., Rene, E.R., and Firoozbahr, M., (2020), "Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives", *Process Safety and Environmental Protection*, 143, 138-163, https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.034.

Shon, H.K., Vigneswaran, S., and Snyder, S.A., (2006),

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 8, No. 3, PP. 59-69, Autumn 2023
DOI: 10.22112/JWWSE.2023.367762.1329

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال هشتم، شماره ۳، صفحات ۵۹-۶۹، پاییز ۱۴۰۲

Research Paper

A Laboratory Study of the Effect of ZnO Nanooxide and CuO Nanooxide on the Rutting Resistance and Absorption of Pollutants in Porous Asphalt in Urban Surface Runoff

Ramtin Sobhkhiz Fomani[1*], Taher Rajaee[2] and Esmaeil Fatehifar[3]
1- Ph.D. Student, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran.
2- Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran.
3- Professor, Environmental Engineering Department, Faculty of Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Sahand, Iran.
* Corresponding Author, Email: r.sobhkhiz@stu.qom.ac.ir

Received: 02/11/2022
Revised: 02/12/2022
Accepted: 27/12/2022
© IWWA

Abstract

The use of porous asphalt has been the subject of many inventions and innovations during the last decade. The most obvious characteristics of this asphalt is its drainage ability, which is due to the presence of a high percentage of empty space and pores and connections between these pores. Therefore, it is very important to pay attention to environmental issues such as the reduction of pollutants in porous environments such as asphalt, and therefore the purpose of the research is to investigate the effect of different concentrations of nanomaterials such as nano copper oxide (CuO) and nano zinc oxide (ZnO) on resistance and absorption. The pollutant was in porous asphalt. In this study, durable porous asphalt pavement with the ability to absorb pollutants from water was introduced, and it was built for dynamic creep testing in the asphalt laboratory, and the state of pollutants was investigated in the chemical laboratory. The results of the dynamic creep test showed that the addition of CuO nano oxide to the porous asphalt mixtures significantly increased the bearing capacity and Mental Number (FN), which was useful for rutting resistance. The FN values of porous asphalt mixtures increased by an average of 15% in all loads, and in all loads, asphalt samples modified with 6% copper nano oxide had higher FN values, but insignificant changes were observed in asphalt samples containing ZnO nano oxide. Also, the comparison of the qualitative results regarding the effectiveness of zinc oxide and copper nanomaterials in reducing pollution showed that zinc oxide (ZnO) had the role of reducing pollution in all qualitative parameters, and the biggest reduction was in phosphate, TSS and sulfate. Finally, in the mechanical test section, the asphalt sample containing copper nanooxide with a concentration of 6%, and in the environmental section, the asphalt sample containing zinc nanooxide with a concentration of 8% had the best performance.

Keywords: Porous Asphalt, Resistance, Pollutant Absorber, Zno Nano Oxide, Cuo Nano Oxide.

مقاله پژوهشی

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر نانو اکسید روی و نانو اکسید مس بر مقاومت شیارشدگی و جذب آلایندگی در آسفالت متخلخل در رواناب سطحی شهری

رامتین صبح‌خیز فومنی[۱*]، طاهر رجایی[۲] و اسماعیل فاتحی‌فر[۳]
۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.
۲- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.
۳- استاد گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، سهند، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: r.sobhkhiz@stu.qom.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۱/۰۹/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۶
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

استفاده از آسفالت متخلخل در طول دهه گذشته موضوع بسیاری از ابداعات و نوآوری‌ها بوده است. بارزترین خصوصیات این آسفالت، قابلیت زهکشی آن است که به‌دلیل وجود درصد بالایی از فضای خالی و تخلخل‌ها و ارتباطات بین این تخلخل‌ها صورت می‌گیرد. لذا توجه به مسائل محیط‌زیستی نظیر کاهش آلاینده‌های موجود در محیط‌های متخلخل نظیر آسفالت از اهمیت زیادی برخوردار است و لذا هدف پژوهش بررسی تاثیر درصد غلظت مختلف نانومواد‌هایی نظیر نانو اکسید مس(CuO) و نانو اکسید روی (ZnO) بر مقاومت و جاذب آلاینده در آسفالت متخلخل بوده است. در این مطالعه روسازی آسفالتی متخلخل با دوام و با قابلیت جذب آلاینده‌ها از آب معرفی و برای آزمایش خزش دینامیکی در آزمایشگاه آسفالت ساخته شد و بررسی وضعیت آلاینده‌ها در آزمایشگاه شیمی انجام شد. نتایج آزمایش خزش دینامیکی نشان‌داد که افزودن نانو اکسید CuO به مخلوط‌های آسفالتی متخلخل باعث افزایش قابل‌توجه ظرفیت باربری و عدد روانی (FN) شد که برای مقاومت در برابر شیارشدگی مفید بود. مقادیر FN مخلوط‌های آسفالتی متخلخل در تمام بارها به‌طور متوسط ۱۵ درصد افزایش‌یافته و در کل بارها، نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو ۶ درصد نانو اکسید مس دارای مقادیر FN بالاتری بود. اما در نمونه‌های آسفالتی حاوی نانو اکسید ZnO تغییرات ناچیزی مشاهده شد. هم‌چنین مقایسه نتایج کیفی در خصوص نقش نانو مواد اکسید روی و مس در کاهش آلایندگی نشان‌داد که نانو اکسید روی (ZnO) در تمامی پارامترهای کیفی نقش کاهنده آلاینده را به‌عهده داشته که بیشترین کاهش در فسفات، TSS و سولفات بوده است. درنهایت در بخش آزمایش مکانیکی، نمونه آسفالتی حاوی نانو اکسید مس با غلظت ۶٪ و در بخش محیط‌زیستی، نمونه آسفالتی حاوی نانو اکسید روی با غلظت ۸٪ بهترین عملکرد داشتند.

کلمات کلیدی: آسفالت متخلخل، خزش دینامیکی، جاذب آلاینده، نانو اکسید روی، نانو اکسید مس.

۱- مقدمه

امروزه با رشد روز افزون جمعیت و افزایش آلودگی آب و هوا و همین‌طور نیاز به منابع آب قابل استفاده، موضوع تصفیه آب مورد توجه همگانی قرارگرفته است. با توجه به صرف هزینه و زمان زیاد، محققان درصدد آن هستند که روش‌های جایگزین و کارآمد را ابداع و مورد استفاده قرار دهند. بهبود در عملکرد بخش‌های مختلف صنعتی که به‌شدت با پیشرفت در نانوتکنولوژی در ارتباط است، کارایی برخی مواد خاص را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده است، به‌همین دلیل برای بازدهی بیشتر از نانو مواد استفاده می‌شود (Wang et al., 2017). از آن‌جایی‌که نزولات آبی یا بارندگی‌ها منشاء اصلی حیات کلیه موجودات زنده محسوب می‌شوند، اما بعضی موارد این نزولات به‌تدریج باعث از بین رفتن اکوسیستم خشکی‌ها و دریاها از جمله جنگل‌ها و موجودات آب‌زی شده و تنوع زیستی کاهش می‌یابد. علت این امر اضافه شدن بیش از حد مواد آلاینده از جمله مواد آلی فرار از دودکش نیروگاه‌ها، کارخانجات صنعتی و اگزوز خودروها، مواد آلی فرار (VOC)[1] و فلزات سنگین است. اسیدهای موجود در آب باران عمدتا اسید سولفوریک و اسید نیتریک هستند (نیک نژاد، ۱۳۹۲). از طرفی امروزه علاوه‌بر مشکلات تکنیکی و فنی راه‌ها و جاده، نگرانی‌های شدید در رابطه با مسائل محیط‌زیستی منجر به تعریف و ساخت مصالح جدید با کیفیت بالا می‌شود. با توجه به وجود آلاینده‌ها در رواناب‌های سطحی که ریشه در بارندگی‌های اسیدی دارند، محققان دریافتند که در مناطق توسعه‌یافته این رواناب‌های آلوده می‌توانند ذخایر آب‌های زیرزمینی و دریاچه‌های شیرین را آلوده کنند که برای انسان مضر است. از طرفی آسفالت متخلخل اگرچه مزیت‌های فراوانی در رابطه با ایمنی جاده‌ها و زهکشی آب دارد اما به‌دلیل دوام کم و عمر کوتاه‌تر نسبت به دیگر مخلوط‌های آسفالتی متداول، کمتر مورد توجه متصدیان راه برای روسازی راه‌های با ترافیک سنگین قرار می‌گیرد (نیک نژاد، ۱۳۹۲).

پروین‌نیا و همکاران (۱۳۸۷) مشخصات کیفی رواناب در شهر شیراز مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نمونه‌هایی از رواناب از سه زیرحوزه شهری بزرگ، متوسط و کوچک در این شهر بررسی شد. نتایج نشان‌داد که بسیاری از آلاینده‌های رواناب جذب مواد معلق می‌شوند و غلظت مواد معلق در رواناب شهری بالاتر از حد مجاز تخلیه به آب‌های سطحی است. هم‌چنین بالاترین مقدار فلزات سنگین در رواناب شهری شیراز آهن و روی بوده است.

Kafi et al. (2007) تغییرات غلظت رواناب‌های شهری در پاریس را در ۶ حوزه بررسی کردند. از مقایسه آلاینده‌های خروجی از حوزه در هنگام بارندگی و با زمان خشک، نتیجه‌گیری شد که مواد جامد معلق، فلزات سنگین دارای غلظت بیشتری در هنگام بارندگی در مقایسه با حالت خشک دارند. با مقایسه بار آلودگی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ با ۱۹۹۶ تا ۱۹۹۷، آن‌ها به‌این نتیجه رسیدند که تغییرات فلزات سنگین در دو دوره با هم مشابه است. بارهای جامدات معلق، اکسیژن‌خواهی شیمیایی و اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی در سرتاسر ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ بالاتر بودند. تفاوت‌های موجود در این پارامترها را می‌توان به مشخصات رویداد بارش، به‌طور عمده دوره هوای خشک قبل از هر بارندگی نسبت داد.

Thomas et al. (2008) حذف فلزات سنگین از آسفالت متخلخل را بررسی کرده و به‌این نتیجه رسیدند که آسفالت متخلخل، پتانسیل بالایی در حذف روی و مس دارد. هم‌چنین نتایج نشان داد که به‌ترتیب ۹۲ و ۹۳ درصد روی و مس حذف شده و این روسازی توانسته نیترات و فسفات را به‌میزان ۲۷ درصد حذف نماید.

Klenzedrof et al. (2012) مزایای کیفیت آب و روش اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی را به‌طور خاص برای دوره اصطکاک نفوذپذیری (PFC) بررسی کردند. PFC لایه‌ای از آسفالت متخلخل است که از ۲/۵ تا ۵ سانتی‌متر ضخامت دارد و به‌عنوان روکش در جاده‌های معمولی غیرقابل نفوذ قرار می‌گیرد. مطالعات تحقیقاتی نشان‌داد که میزان کل مواد معلق و فلزات کل در رواناب‌های سطوح PFC در مقایسه با رواناب‌های آسفالت معمولی کاهش‌یافته است. استفاده از آسفالت متخلخل در یک محیط شهری نه تنها شرایط رانندگی را بهبود بخشید، بلکه به کاهش تأثیرات سوء شهرنشینی بر کیفیت سطح آب و سطح زیرزمینی نیز کمک کرد.

Roseen et al. (2012) عملکرد یک سیستم مدیریت آب طوفان روسازی متخلخل در مناطق ساحلی را بررسی کردند که در آن ۶ ماه دمای انجماد معمولا رخ می‌داد. استفاده از روسازی‌های متخلخل برای مدیریت آب - طوفان در آب و هوای شمالی چالش‌های بسیاری دارد که بیشتر آن‌ها مربوط به سرمای شدید و نفوذ قابل‌توجه یخ‌بندان در محیط متخلخل است. سیستم روسازی متخلخل برای عملکرد هیدرولیکی و کیفیت آب از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸ مورد بررسی قرارگرفت. پاسخ هیدرولوژیکی مشاهده شده، شبیه به زهکشی عمق کم آب زیرزمینی است. از طرفی عملکرد تصفیه با کیفیت آب استثنایی برای هیدروکربن‌های نفتی، روی و کل جامدات معلق با تقریبا هر مقدار کم‌تر از حد تشخیص وجود داشت و تنها حذف متوسط برای فسفر مشاهده شد و نیترات منفی بود.

Lopes Afonso et al. (2017) عملکرد مخلوط‌های روسازی متخلخل را با افزودن الیاف سلولزی ارزیابی کردند که به‌خاطر ظرفیت چسبندگی آن‌ها بین سنگدانه‌ها و چسب موردتوجه بوده است. این امر به جلوگیری از حذف چسبندگی حاصل از زهکشی کمک می‌کرد، که یکی از مشکلات اصلی آسفالت متخلخل است، زیرا مقدار مصالح ریز کاهش می‌یابد. در مقایسه با آسفالت متخلخل معمولی، افزودن الیاف سلولزی باعث بهبود عملکرد تغییر شکل دائمی می‌شود.

Sabmito et al. (2021) در پژوهش خود، روش‌های تجزیه و تحلیل عملکرد هیدرولوژیکی و محیطی سیستم‌های روسازی متخلخل نظیر آسفالت متخلخل در زمینه زهکشی شهری را با توجه به دوام آن‌ها بررسی کردند. هدف آن‌ها ارائه مروری بر مطالعات دهه گذشته در این زمینه بود. شواهد حاصل از دانش مبتنی بر این سند، تفسیرهای انتقادی مفیدی از مطالعات موجود برای پیشرفت درک فعلی در مورد عملکرد هیدرولوژیکی و تأثیرات محیطی ازنظر کارایی معمول حذف آلاینده‌ها و سیستم‌های روسازی نفوذپذیر کنونی ارائه داد.

Shafabakhsh et al. (2021) خواص فوتوکاتالیستی نانو اکسید تیتانیوم و نانو اکسید مس در آسفالت را به‌منظور جذب مواد آلاینده از جو بررسی کردند. ترکیب فوق با نور UV واکنش‌داده و ذرات آلاینده از جمله اکسیدهای نیتروژن و همچنین ترکیبات آلی فرار را اکسید می‌کند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن اصلاح‌کننده نانو اکسید تیتانیوم و نانو اکسید مس به‌طور موثر ذرات اکسیدهای نیتروژن را از هوا حذف و خواص رئولوژیکی قیر را افزایش می‌دهد. هم‌چنین نتایج حاصل از پاشش نانومواد به‌عنوان یک پوشش مبتنی بر آب، بیانگر کاهش ۴۱-۶۳٪ اکسیدهای نیتروژن بود.

Kamboozia et al. (2022) بررسی آزمایشگاهی اثر نانو اکسید روی بر مقاومت شکست و شیار مخلوط آسفالت متخلخل در شرایط خستگی و چرخه یخ-ذوب را انجام دادند. این مطالعه با هدف ارزیابی رفتار شیاردار و ترک‌خوردگی در دمای متوسط مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده بر شرایط خستگی آزمایشگاهی و انجماد انجام شد. نتایج حاکی از تاثیر منفی بر چرخه خستگی و مقاومت ترک خوردگی مخلوط بود. علاوه‌بر این، افزودن نانو اکسید روی، عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را در برابر تغییر شکل دائمی و ترک‌خوردگی بهبود بخشید.

Masri et al. (2022) تاثیر نانو تیتانیوم را به‌عنوان اصلاح‌کننده قیر در آسفالت متخلخل ماستیک سنگی بررسی کردند. این مطالعه تأثیر چسب و مخلوط اصلاح‌شده نانو تیتانیوم را با قیر عیار ۶۰/۷۰ بررسی کرد. نتایج نشان داد که آسفالت آستر[۲] اصلاح‌شده با نانومواد تیتانیوم بالاترین درصد بهبود را ازنظر خواص شیمیایی و خواص مورفولوژیکی آن انجام می‌دهد. علاوه‌بر این، خواص حجمی نیز با افزودن نانو تیتانیوم به‌طور قابل‌توجهی بهبود یافته و افزودن آن توانست خواص کلی قیر را افزایش دهد.

با توجه به اهمیت بررسی مسائل محیط‌زیستی نظیر کاهش آلاینده‌های موجود در محیط‌های متخلخل نظیر آسفالت و هم‌چنین مطالعات محدود در زمینه تاثیر نانومواد بر خصوصیت هم‌زمان کمی و کیفی موجود، هدف از این تحقیق بررسی تاثیر درصد غلظت‌های مختلف نانومواد‌های موجود در بازار نظیر نانو اکسید مس و نانو اکسید روی بر وضعیت مقاومت و جاذب آلاینده در آسفالت متخلخل است.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش با معرفی مصالح مصرفی و مشخصات آن‌ها شامل مصالح سنگی و دانه‌بندی آن، قیر، نانومواد و طرح اختلاط مخلوط آسفالتی؛ آزمایش‌های عملکردی و آزمایش‌های محیط‌زیستی در رابطه با درصد جذب آلاینده‌ها در مخلوط آسفالتی متخلخل مورد بررسی قرار می‌گیرد. اولین گام در طرح اختلاط، انتخاب مصالح مناسب برای مخلوط‌های متخلخل است. مصالح سنگی، قیر و اصلاح‌کننده‌هایی مانند پلیمر و نانومواد و افزودنی در طراحی آسفالت متخلخل به‌کارگرفته می‌شوند.

مصالح سنگی درشت‌دانه و ریز مصرفی در آسفالت متخلخل باید سخت، محکم، بادوام، تمیز و مکعبی شکل و صددرصد شکسته و با خصوصیات کیفی یکنواخت بوده و عاری از هرگونه ذرات رس و لای و شیستی و پوشش خاکی باشد. مصالح سنگی مصرفی در این تحقیق از جنس آهکی بود. جدول ۱ مشخصات مصالح مصرفی را نشان می‌دهد.

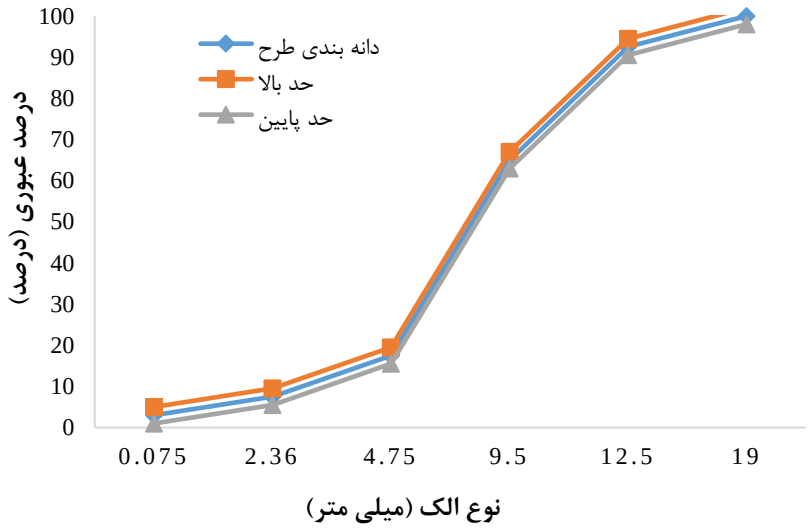
در این تحقیق از طرح دانه‌بندی آیین‌نامه مالزی[۳] طبق شکل ۱ استفاده شد. علت انتخاب این دانه‌بندی، آن است که در بسیاری از مقالات از آن استفاده شده و درصد فضای خالی این طرح حداقل ۱۹ درصد درنظر گرفته شد. این نوع دانه‌بندی تقریبا شبیه با دانه‌بندی شماره ۱ آیین‌نامه روسازی متخلخل بود. هم‌چنین دانه‌بندی این طرح دارای سنگدانه‌های بین ۰ تا ۱۹ میلی‌متر بود.

درخصوص قیر مصرفی نیز در مخلوط آسفالتی متخلخل از قیر خالص ۶۰/۷۰ (قیر شل با درجه نفوذ ۶ تا ۷ میلی‌متر) و ۸۵/۱۰۰ (قیر سنگین با درجه نفوذ ۸/۵ تا ۱۰ میلی‌متر) می‌توان

فقط برای راه‌های با ترافیک کم و متوسط استفاده نمود. اما در راه‌های با ترافیک زیاد، این نوع قیرها باید به‌صورت اصلاح‌شده با افزودنی‌های مختلف استفاده شود. لذا در این تحقیق، با توجه به کاربرد مرسوم در صنعت روسازی و مقالات معتبر (موسوی و همکاران، ۱۴۰۰) از قیر خالص ۶۰/۷۰ استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات مصالح مصرفی

مشخصه	واحد	استاندارد	محدوده مجاز	بزرگ‌دانه (بزرگ‌تر از ۴/۷۴ میلی‌متر)	ریزدانه (کوچک‌تر از ۴/۷۴ میلی‌متر)
سایش لس آنجلس	درصد	AASHTOD96	۳۰ >	۱۸	-
صاف و کشیده		ASTM D4791	۲۰ >	۸	-
تخت و کشیده		ASTM D4791	۵ >	۰/۸	-
جذب		AASHTO T85	۲ >	۱۲	-
سولفات سدیم		AASHTO T104	۱۵ >	۰/۲	۱
محدودیت روانی		AASHTO T89	۲۵ >	-	۱۸
شاخص پلاستیسیته		AASHTO T90	NP	-	NP
سایش لس آنجلس		AASHTOD96	۳۰ >	۱۸	-



شکل ۱- دانه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش

با توجه به این‌که در مطالعات گذشته (Tanzadeh et al., 2021; Anand et al., 2017 ؛ موسوی‌راد و همکاران، ۱۴۰۰) به‌طور معمول درصد نانومواد در مخلوط آسفالتی ۱ تا ۸ درصد از قیر استفاده شده است، در این تحقیق نیز درصد نانومواد به‌صورت ۰٪، ۲٪، ۴٪ و ۸٪ مدنظر قرارگرفت. هم‌چنین از انواع نانومواد اکسید روی (Zn0) و مس (CuO) استفاده شد، به‌طوری‌که هرکدام در ۴ نمونه آسفالت متخلخل، در درصدهای مختلف ۲٪، ۴٪، ۶٪ و ۸٪ قیر بهینه به آن اضافه شد. از طرفی آسفالت متخلخل به‌دلیل دارا بودن میزان کم مصالح ریزدانه نسبت به درشت‌دانه، بیشتر در معرض پدیده فرونشت قیر خواهد بود. در این تحقیق، از الیاف سلولوزی از نوع تاپسل استفاده شد. با توجه به آیین‌نامه راه و ترابری ایران، میزان مصرف این نوع الیاف در مخلوط آسفالتی باید برابر با ۰/۳٪ وزن کل مخلوط باشد.

۲-۱ - ساخت نمونه

یکی از شناخته‌شده‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های ساخت آسفالت، روش مارشال است که نخستین بار توسط مهندسی به‌نام بروس مارشال ارائه شد. هدف این روش پیدا کردن رابطه بین تراکم و درصد قیر و مقاومت فشاری است. آزمایش مارشال بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶/۲۵ سانتی‌متر انجام می‌شود و عمل تراکم نمونه آسفالت ساخته‌شده با چکش ۴/۵ کیلوگرمی و ارتفاع سقوط چکش ۴۵ سانتی‌متری صورت می‌پذیرد. (Li et al., 2017) بنابراین با توجه به این‌که روش مارشال از روش‌های متداول برای تست مقاومت آسفالت است، لذا در طرح اختلاط آسفالت متخلخل از روش مارشال استفاده شد. در این تحقیق، ۹ نمونه آسفالت متخلخل که شامل یک نمونه آسفالت متخلخل بدون نانومواد به‌عنوان شاهد به‌همراه

۴ نمونه آسفالت متخلخل حاوی نانومواد مس در درصدهای مختلف و ۴ نمونه آسفالت متلخلخل حاوی نانومواد روی در درصدهای مختلف ساخته شد. با فرض درصد قیر بهینه ۶/۴٪ (موسوی و همکاران، ۱۴۰۰)، نمونه‌های آزمایش‌های عملکردی توسط دستگاه مارشال ساخته شدند. هم‌چنین وزن نمونه‌ها برابر با ۱۲۰۰ گرم بود. شکل ۲ کوبیدن مخلوط آسفالتی متخلخل در روش مارشال و جدول ۲ طرح اختلاط آسفالت متخلخل را نشان می‌دهند.

شکل ۲- کوبیدن مخلوط آسفالتی متخلخل به‌روش مارشال

جدول ۲- طرح اختلاط مخلوط آسفالتی متخلخل استوانه‌ای

شرح	مشخصات
تعداد ضربه نمونه مارشال	۵۰
درصد فضای خالی	حداقل ۲۰
درصد ریزش قیر	حداقل ۰/۳
درصد افت وزنی	حداکثر ۲۵
نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم	حداقل ۸۰

۲-۲- اختلاط نانو مواد با قیر

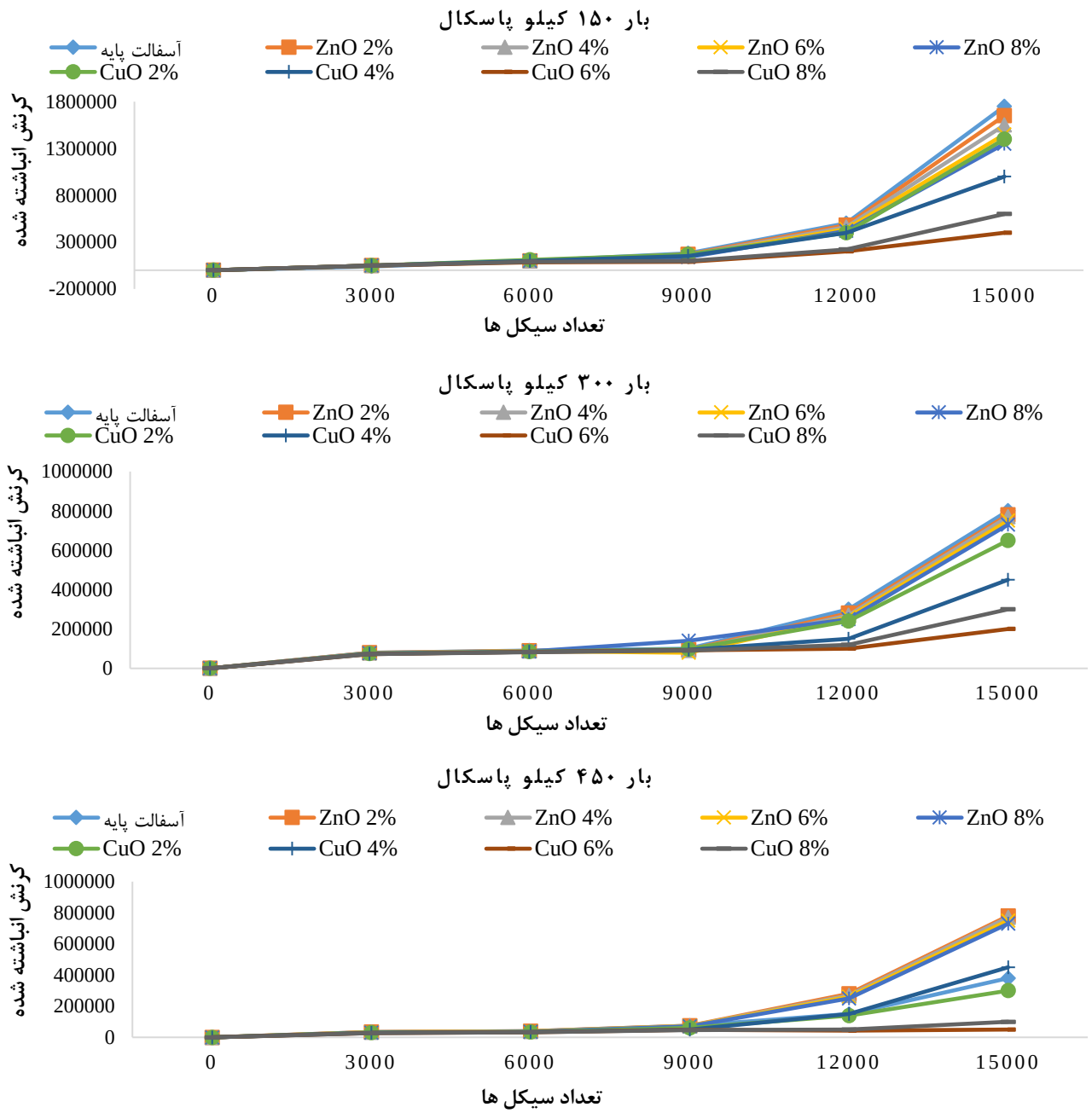
اختلاط نانو ذرات با قیر باید توسط یک دستگاه هم‌زن با دور چرخش بالا، حداقل ۲۰۰۰ rpm انجام شود. مدت زمان و دمای اختلاط مهم‌ترین موارد قابل‌توجه در بحث اختلاط نانوذرات در چسبنده قیری است. بسیاری از تحقیقات نشان داده‌اند که دمای قیر در هنگام اختلاط نانومواد باید بین ۱۳۰ تا ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان اختلاط باید بین ۳۰ تا ۴۰ دقیقه باشد (Badroodi et al., 2020). هم‌چنین برای اختلاط همگن نانوذرات در قیر از یک حلال استفاده می‌کنند که این حلال باید قابلیت نانو مواد در دمای پایین و متوسط را داشته باشد بدون این‌که بر خواص نانومواد تاثیر داشته باشد. برای اختلاط یکنواخت نانومواد در قیر، حلال باید دارای ویسکوزیته کم در دمای اتاق باشد (Badroodi et al., 2020). در این تحقیق از یک دستگاه هم‌زن با دور بالا با دور چرخش تا ۵۰۰۰ rpm و هم‌چنین از کروزن به‌عنوان حلال استفاده شد. از طرفی اختلاط قیر به‌مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ rpm و سپس برای تسریع در تبخیرشدن حلال کروزن با مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۲۰۰۰ rpm انجام شد. در نهایت، ظرف قیر اصلاح شده برای خنک‌شدن سریع قیر و جلوگیری از ته‌نشینی نانو ذرات، در حمام آب سرد (۲۰ درجه) قرارگرفت.

۳- تحلیل نتایج

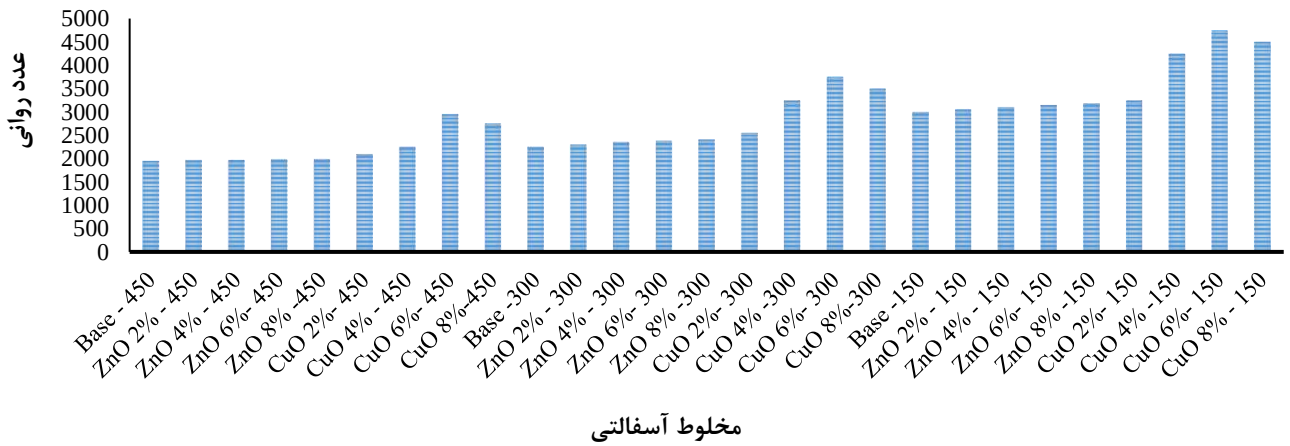
در این بخش ابتدا وضعیت تخلخل و مقاومت نمونه آسفالت متخلخل حاوی نانو اکسیدهای روی و مس بررسی می‌شود. سپس نمودارهای کیفی مربوط به تاثیر غلظت نانو اکسیدهای روی و مس بر کاهش آلایندگی پارامترهای محیط‌زیستی نیترات، سولفات، جامد معلق، کل مواد جامد معلق در آب، مجموع مواد آلی و غیرآلی در محلول آب، فسفات، سرب، روی ارائه می‌شود. در انتها کاهش آلایندگی دو نانو اکسید اشاره مقایسه می‌شود. همچنین لازم‌به ذکر است که ساخت و آزمایش مقاومتی آسفالت در آزمایشگاه آزماگستر پی و آزمایش‌های محیط‌زیستی در آزمایشگاه پیرایه‌زیست کاسپین در شهرستان رشت انجام شده است.

۳-۱- نتایج آزمایش خزش دینامیکی از عملکرد آسفالت

در این تحقیق برای آزمایش خزش دینامیکی از دستگاه UTM استفاده شد که تحت بارگذاری نیمه سینوسی با تکرار ۰/۵ هرتز و براساس استاندارد Australian code AS 2891-12 انجام شد. نتایج آزمایش خزش دینامیکی در شکل‌های ۳ و ۴ به‌ترتیب پاسخ‌های مربوط به بار ترکیبات و عدد روانی (FN) مخلوط‌های آسفالتی متخلخل با نانو ذرات اکسید مس و روی را نشان می‌دهند. از شکل ۴ استنباط می‌شود که افزودن نانو اکسید مس به مخلوط‌های آسفالتی متخلخل معمولی باعث شده است که مقدار FN آن‌ها به‌طور متوسط ۱۵٪ در کل بارگذاری‌ها افزایش یابد. این روند در درصدهای بالاتر نانومواد بیشتر نمایان می‌شود، اما با افزودن نانواکسید مس مقدار حدود ۳٪ ناچیز بود. این امر به‌دلیل بهبود قابلیت تحمل بار مخلوط‌های آسفالتی متخلخل اصلاح‌شده با نانوذرات مس رخ داد، زیرا مخلوط‌های اصلاح‌شده، نیاز به تحمل سیکل‌های بیشتری از تغییر شکل نسبت به مخلوط‌های آسفالتی معمولی دارند.



شکل ۳- پاسخ‌های مربوط به بار ترکیبات مختلف مخلوط‌های آسفالتی متخلخل با بارهای مختلف



شکل ۴- نتایج عدد روانی

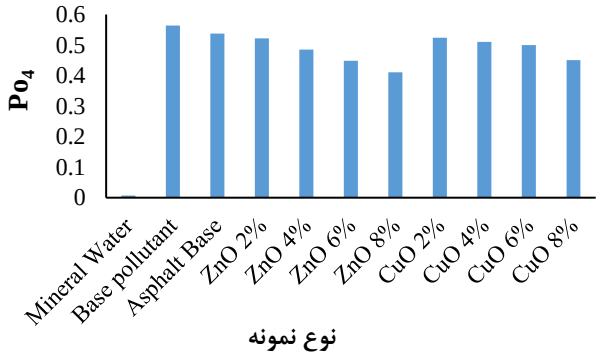
می‌توان نتیجه گرفت که افزودن نانو اکسید مس به مخلوط‌های آسفالتی متخلخل، مقاومت آن‌ها را در برابر شیارشدگی افزایش می‌دهد، اما افزودن نانو اکسید روی چندان موفق آمیز نبوده است. این امر به‌دلیل تشکیل شبکه‌ای در ساختار قیر پس از افزودن نانو اکسید مس رخ داده است، که در آن برهم‌کنش قوی بین نانوذرات و ساختار مولکولی قیر ایجاد می‌شود. تاثیر افزودن نانو مواد مس به مخلوط‌های آسفالتی متخلخل بر افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌ها در ۸٪ نانومواد کمتر از ۶٪ بود. این بدین علت است که در درصدهای زیاد نانومواد افزودن نانومواد باعث می‌شود ذرات نانومواد مابین ذرات قیر قرارگیرند و در نتیجه تاثیر افزودن نانو مواد اکسید مس به مخلوط‌های آسفالت متخلخل بر افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌ها در ۸٪ نانومواد کمتر از ۶٪ بود.

۳-۲- مقایسه میزان کاهش آلایندگی در نانو اکسیدهای روی و نانو اکسید مس

در این تحقیق برای آزمایش کاهش آلاینده از دستگاه فوتو رآکتور براساس استاندارد ASTM-D5116 استفاده شد. از طرفی آسفالت متخلخل به‌دلیل دارابودن درصد فضای خالی نسبتا زیاد (بالای ۲۰٪)، قدرت زهکشی بسیار بالایی دارد و سریعا رواناب سطحی ناشی از بارندگی را از خود عبور می‌دهد. لذا در این بخش میزان جاذب آلایندگی در نانو اکسیدهای روی مس در ۷ پارامتر مختلف مقایسه شد. بدین منظور ۱۱ نمونه درنظر گرفته شد که ابتدا آسفالت پایه (آسفالت بدون نانومواد) ساخته شد. سپس ۴ نمونه آسفالت متخلخل حاوی نانو اکسید روی و ۴ نمونه آسفالت متخلخل حاوی نانو اکسید مس در درصدهای ۲-۴-۶-۸ ساخته شد. هم‌چنین محلول آلاینده پایه برای درک بهتر میزان تغییرات جذب آلایندگی توسط نانومواد با ترکیبی از نمک‌های فلزی شامل سدیم کلراید، پتاسیم دی هیدروژن فسفات، کلرید روی، نیترات سرب و سدیم سولفات در آب معدنی مشخصی به نسبت‌های مختلف برطبق استاندارد آب و فاضلاب ایران تشکیل و از ۹ نمونه آسفالتی عبور داده شد. لازم‌به ذکر است که استفاده آب معدنی با یک برند مشخص در این تحقیق به‌دلیل بالاتر بردن دقت و وضوح بهتر در روند انجام آزمایش بوده است. بنابراین ۱۱ نمونه آب عبوری از ۹ آسفالت متخلخل به‌همراه ۱ نمونه آب معدنی (نمونه شاهد) و ۱ نمونه محلول آلاینده پایه برای تعیین پارامترهای مختلف تحویل آزمایشگاه محیط‌زیست شد.

۳-۲-۱- پارامتر فسفات

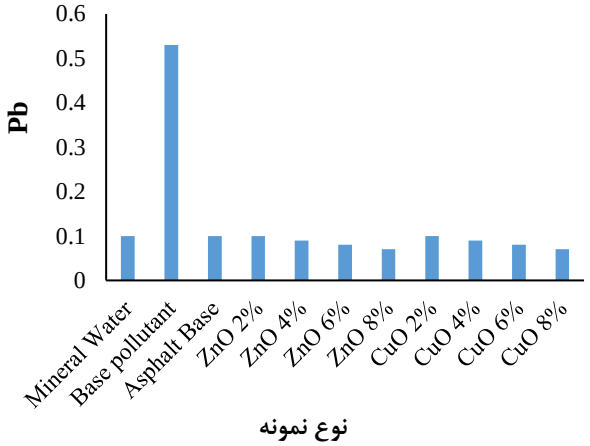
شکل ۵ مقایسه میزان کاهش آلایندگی در نانو اکسیدهای روی و نانواکسید مس در درصدهای مختلف ۲ تا ۸٪ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده پایه و آب معدنی در پارامتر فسفات را نشان می‌دهد. لازم‌به ذکر است که برای شفافیت در مقایسه‌ها، آب معدنی با برند مشخص به‌عنوان نمونه شاهد برای جلوگیری از اعمال نقش املاح آب شهری و هم‌چنین محلول آلاینده پایه برای درک بهتر تغییرات قبل و بعد از عبور از نمونه آسفالتی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پارامتر فسفات در آب معدنی بسیار ناچیز بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۰/۵۵ ppm برآورد شده است که با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانومواد)، میزان آلایندگی فسفات حدود ۴/۷ درصد کاهش یافت. هم‌چنین در این شکل رابطه معکوس غلظت نانو اکسید روی در آسفالت متخلخل با آلایندگی فسفات برقرار است، به‌طوری‌که بیشتر کاهش آلایندگی فسفات مربوط به غلظت ۸٪ با مقدار کاهش ۲۷٪ همراه است. ازطرفی این مقدار کاهش آلایندگی حداکثر در نانو اکسید مس در غلظت ۸٪ با مقدار ۲۰٪ است.



شکل ۵- مقایسه میزان کاهش آلایندگی در نانو اکسید روی و نانواکسید مس در پارامتر فسفات

۳-۲-۲- پارامتر سرب

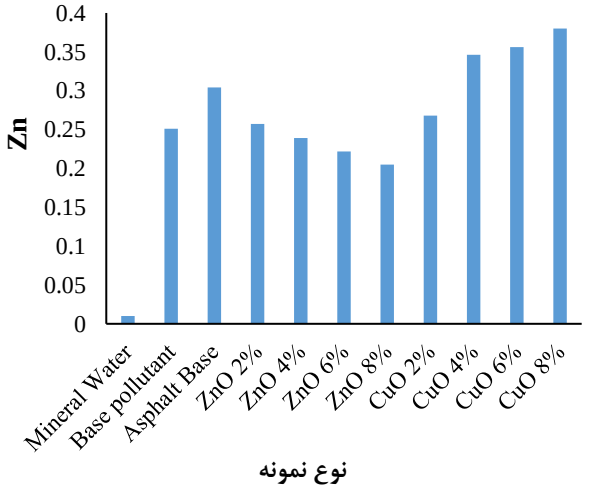
شکل ۶ مقایسه میزان کاهش آلایندگی در نانو اکسیدهای روی و نانو اکسید مس در درصدهای مختلف ۲ تا ۸٪ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی در پارامتر سرب را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که پارامتر سرب در آب معدنی حدود ۰/۱ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۰/۵۳ ppm برآورد شده است که با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانومواد)، میزان آلایندگی سرب حدود ۸۰ درصد کاهش یافت. هم‌چنین در این شکل رابطه معکوس غلظت نانواکسید روی و مس در آسفالت متخلخل با آلایندگی فسفات برقرار است، به‌طوری‌که بیشتر کاهش آلایندگی سرب مربوط به غلظت ۸٪ با مقدار کاهش ۸۴ و ۸۱ درصدی همراه است.



شکل ۶- مقایسه میزان کاهش آلایندگی در نانو اکسید روی و نانو اکسید مس در پارامتر سرب

۳-۲-۳- پارامتر روی

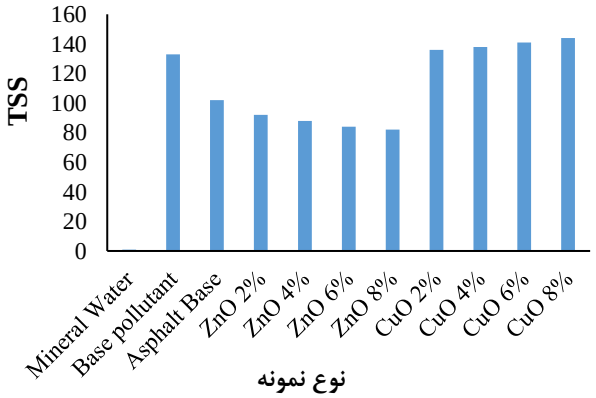
شکل ۷ مقایسه میزان کاهش آلایندگی در نانو اکسید روی و نانو اکسید مس در درصدهای مختلف ۲ تا ۸٪ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی در پارامتر روی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که پارامتر Zn در آب معدنی حدود ۰/۰۱ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۰/۲۵۱ ppm برآورد شده است که با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانومواد)، میزان آلایندگی Zn حدود ۲۱ درصد افزایش یافت. همچنین در این شکل رابطه معکوس غلظت نانواکسید روی در آسفالت متخلخل با آلایندگی Zn برقرار است، به‌طوری‌که حداکثر کاهش آلایندگی مربوط به غلظت ۸٪ با مقدار کاهش ۱۸٪ همراه است. البته تغییرات آلایندگی با غلظت آسفالت حاوی نانو اکسید مس رفتار رابطه مستقیم دارد، به‌طوری‌که با افزایش درصد غلظت نانو اکسید مس میزان آلایندگی حدود ۵۱٪ افزایش یافته است.



شکل ۷- مقایسه میزان کاهش آلایندگی در نانو اکسید روی و نانواکسید مس در پارامتر روی

۳-۲-۴- پارامتر مجموع کل مواد آلی وغیرآلی محلول در آب (TSS)

شکل ۸ مقایسه میزان کاهش آلایندگی در نانو اکسیدهای روی و نانو اکسید مس در درصد های مختلف ۲ تا ۸٪ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی در پارامتر مجموع کل مواد آلی وغیرآلی محلول در آب را نشان می دهد. مشاهده می‌شود که پارامتر TSS در آب معدنی حدود ۱ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۱۳۳ ppmبرآورد شده است که با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانو مواد)، میزان آلایندگی TSS حدود ۲۳ درصد کاهش یافت. همچنین در این شکل رابطه معکوس غلظت نانواکسید روی در آسفالت متخلخل با آلایندگی TSS برقرار است، به‌طوری‌که حداکثر کاهش آلایندگی مربوط به غلظت ۸٪ با مقدار کاهش ۳۸٪ همراه است. البته تغییرات آلایندگی با غلظت آسفالت حاوی نانواکسید مس روند افزایشی دارد، به‌طوری‌که تا درصد آلایندگی ۸/۲ درصد نیز خواهد رسید.

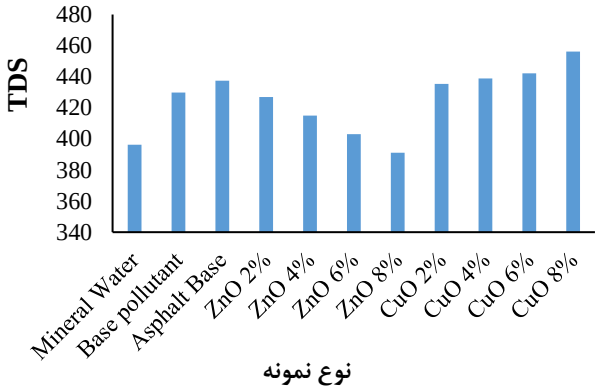


شکل ۸- مقایسه میزان کاهش آلایندگی در نانو اکسید روی و نانواکسید مس در پارامتر مجموع کل مواد آلی وغیرآلی محلول در آب

۳-۲-۵- پارامتر کل مواد جامد معلق در آب

شکل ۹ مقایسه میزان کاهش آلایندگی در نانو اکسید روی و نانو اکسید مس در درصدهای مختلف ۲ تا ۸٪ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی در پارامتر کل مواد جامد معلق در آب را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که پارامتر TDS در آب معدنی حدود ۳۹۶ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۴۳۰ ppm برآورد شده است و با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانومواد)، میزان آلایندگی TDS حدود ۱/۷ درصد افزایش یافت. همچنین در این شکل رابطه معکوس غلظت نانو اکسید روی در آسفالت متخلخل با آلایندگی TDS برقرار است، به‌طوری‌که حداکثر کاهش آلایندگی مربوط به غلظت ۸٪

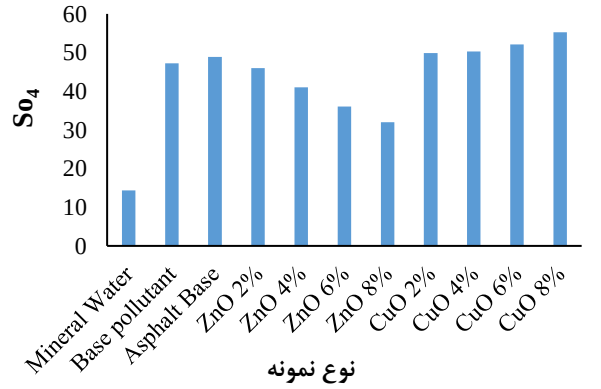
با مقدار کاهش ۳۹/۵٪ همراه است. البته تغییرات آلایندگی با غلظت آسفالت حاوی نانواکسید مس رفتار افزایشی را تجربه می‌کند، به‌طوری‌که در بیشترین غلظت، مقدار الایندگی ۶٪ افزایش نشان می‌دهد.



شکل ۹- مقایسه میزان کاهش آلایندگی در نانو اکسید روی و نانواکسید مس در پارامتر کل مواد جامد معلق در آب

۳-۲-۶- پارامترسولفات

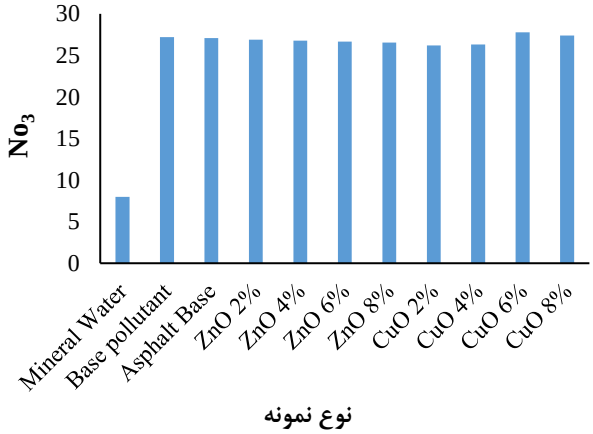
شکل ۱۰ مقایسه میزان کاهش آلایندگی در نانو اکسید روی و نانو اکسید مس در درصدهای مختلف ۲ تا ۸٪ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی در پارامتر سولفات را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود پارامتر سولفات در آب معدنی حدود ۱۴/۳۶ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۴۷/۲۱ ppm برآورد شد که با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانومواد)، میزان آلایندگی سولفات حدود ۴ درصد افزایش یافت. هم‌چنین در این شکل رابطه معکوس غلظت نانواکسید روی در آسفالت متخلخل با آلایندگی سولفات برقرار است، به‌طوری‌که حداکثر کاهش آلایندگی مربوط به درصد غلظت ۸٪ با مقدار کاهش ۳۱٪ همراه است. البته تغییرات آلایندگی با غلظت آسفالت حاوی نانو اکسید مس رفتار افزایشی را تجربه می‌کند، به‌طوری‌که در بیشترین غلظت، مقدار آلایندگی ۵۵٪ افزایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- مقایسه میزان کاهش آلایندگی در نانو اکسید روی و نانواکسید مس در پارامتر سولفات

۳-۲-۷- پارامتر نیترات

شکل ۱۱ مقایسه میزان کاهش آلایندگی در نانو اکسید روی و نانو اکسید مس در درصدهای مختلف ۲ تا ۸٪ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی در پارامتر نیترات را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود پارامتر نیترات در آب معدنی حدود ۸ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۲۷/۱۸ ppm برآورد شده است که با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانومواد)، میزان آلایندگی نیترات حدود ۰/۴ درصد کاهش یافت. هم‌چنین در این شکل رابطه معکوس غلظت نانو اکسید روی در آسفالت متخلخل با آلایندگی نیترات برقرار است، به‌طوری‌که حداکثر کاهش آلایندگی مربوط به غلظت ۸٪ با مقدار کاهش ۲/۴٪ همراه است. البته تغییرات آلایندگی با غلظت آسفالت حاوی نانو اکسید مس رفتار مشخصی نشان نمی‌دهد و بازه تغییرات آن کمتر از ۱ درصد است.



شکل ۱۱- مقایسه میزان کاهش آلایندگی در نانو اکسید روی و نانواکسید مس در پارامتر نیترات

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای ارتقای عملکرد مکانیکی آسفالت متخلخل و کاهش آلاینده های موجود در رواناب سطحی از نانومواد CuO و ZnO استفاده شد. این نانومواد‌ها به مخلوط آسفالتی اضافه و نمونه‌های آسفالتی متخلخل جدید ساخته شدند. برای بررسی و ارزیابی عملکرد نمونه‌ها بر روی آن‌ها آزمایش‌های عملکردی شیارشدگی و درصد کاهش آلایندگی انجام شد و مورد تحلیل قرارگرفت. از طرفی شاخص‌های اندازه‌گیری جاذب آلایندگی گسترده‌ای نظیر نیترات، فسفات، سولفات، TDS، TSS، روی، سرب مطرح شدند که دلیل به‌کارگیری این تعداد شاخص، ضرورت و اهمیت رواناب سطحی شهری است، به‌طوری‌که با

شناخت هرچه بیشتر و اندازه‌گیری دقیق‌تر آب‌های عبوری از معابر آسفالتی در سطح شهر، بتوان رفتار و خصوصیات آن‌ها را بهتر شناسایی کرد. نتایج موردی تحقیق عبارت است از:

- با توجه به نتایج آزمایش خزش دینامیکی، افزودن نانو اکسید CuO به مخلوط‌های آسفالتی متخلخل باعث افزایش قابل‌توجه ظرفیت باربری و عدد روانی (FN) شد که برای مقاومت در برابر شیارشدگی مفید بود. مقادیر FN مخلوط‌های آسفالتی متخلخل در تمام بارها به‌طور متوسط ۱۵٪ افزایش یافت.
- تأثیر نانو CuO بر بهبود قابلیت تحمل بار مخلوط‌ها در قسمت‌های سوم نمودار عملکرد خزش دینامیکی آشکارتر بود. لازم‌به ذکر است که در کل بارها، نمونه‌های آسفالتی اصلاح‌شده با نانو ۶ درصد نانو اکسید مس دارای مقادیر FN بالاتری بود. اما در نمونه‌های آسفالتی حاوی نانو اکسید ZnO تغییرات ناچیزی مشاهده شد.
- مقایسه نتایج کیفی با درنظرگیری غلظت ۸٪، برای پارامتر نیترات تفاوت چشمگیری حاصل نشد. اما در سایر پارامترها نتایج حاکی از برتری نانو اکسید روی نسبت به مس بود به‌طوری‌که در کاهش آلایندگی فسفات برای نانو اکسید روی و مس به‌ترتیب ۲۷٪ و ۲۰٪ بود. در پارامتر سرب نیز کاهش آلایندگی برای نانو اکسید روی و مس ۸۴٪ و ۸۱٪ بود. برای پارامتر روی نیز آلایندگی برای نانو اکسید روی با ۱۸٪ کاهش و نانو اکسید با ۵۱٪ افزایش همراه بود.
- پارامتر TSS برای نانو اکسید، کاهش آلایندگی ۳۸٪ و برای نانو اکسید مس نیز با افزایش ۸٪ همراه بود. هم‌چنین نتایج در پارامتر TDS نیز برای نانو اکسید روی با مقدار کاهش ۳۹/۵ درصد و برای نانو اکسید مس ۶٪ افزایش نشان داد. برای پارامتر سولفات نیز نانو اکسید، آلایندگی مقدار ۳۱٪ کاهش و برای نانو اکسید مس افزایش ۱۷٪ را نشان داد.
- در مجموع در بخش آزمایش مکانیکی، نمونه آسفالتی حاوی نانو اکسید مس با غلظت ۶٪ بهترین عملکرد را داشته و در بخش محیط‌زیستی، نمونه آسفالتی حاوی نانو اکسید روی با غلظت ۸٪ بهترین عملکرد را داشت.

محدودیت‌های این تحقیق مربوط به پارامترهایی نظیر دما بود که با توجه به شرایط حاکم بر تحقیق به‌صورت ثابت درنظر گرفته شد. هم‌چنین برای پیشنهادات در تحقیقات آتی می‌توان به بررسی سایر نانومواد‌های موجود در زمینه بهبود مقاومت و کاهش آلایندگی و بررسی تغییرات پارامترهای محیط‌زیستی نظیر میزان اسیدی و دما اشاره کرد.

۵- پی‌نوشت‌ها

1- Volatile Organic Compound (VOC)
2- Binder
3- Persons with Disabilities

۶- مراجع

پروین‌نیا، م.، رخشنده‌رو، غ.، و منجمی، پ.، (۱۳۸۷)، "بررسی کیفیت و احیای سیلاب‌های شهری در شهر شیراز"، *دومین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط‌زیست*، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

موسوی‌راد، س.، عامری، م.، و کامبوزیا، ن.، (۱۴۰۰)، "امکان‌سنجی بهبود هم‌زمان قابلیت جذب آلاینده‌ها از رواناب سطحی و عملکرد مکانیکی روسازی‌ها با کاربرد مخلوط آسفالتی متخلخل اصلاح‌شده با نانومواد فوتوکاتالیست"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

نیک‌نژاد، د.، (۱۳۹۲)، "آلودگی منابع آب و خاک و محیط‌زیست بر اثر باران اسیدی"، *اولین همایش ملی توسعه پایدار کشاورزی با کاربرد الگوی زراعی*، همدان، ایران.

ASTM D5116-17, (2017), *Standard guide for small-scale environmental chamber determinations of organic emissions from indoor materials/products*, ASTM International, West Conshohocken, USA.

Anand, R., Raina, A., Haq, M., Mir, M., Gulzar, G., and Wani, M., (2021), "Synergism of TiO_2 and graphene as nano-additives in bio-based cutting fluid, An experimental investigation", *Journal of Tribology Transactions*, 64(2), 350-366, https://doi.org/10.1080/10402004.2020.1842953.

Badroodi, S.K., Keymanesh, M.R., and Shafabakhsh, G., (2020), "Experimental investigation of the fatigue phenomenon in nano silica-modified warm mix asphalt containing recycled asphalt considering self-healing behavior", *Journal of Construction and Building Materials*, 246, 117558, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117558.

Kafi, M., Gasperi, J., Moilleron, R., Gromaire, M.C., and Chebbo, G., (2008). "Spatial variability of the characteristics of combined wet weather pollutant loads in Paris", *Journal of Water Research*, 42(3), 539-549, https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.08.008.

Kamboozia, N. Mousavi Rad, S., and Saed, S., (2022), "Laboratory Investigation of the effect of nano-znO on the fracture and rutting resistance of porous asphalt mixture under the aging condition and freeze–thaw cycle", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(5), 04022052, https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-

(2017), "Durability of epoxy-bonded tior-modified aggregate as a photocatalytic coating layer for asphalt pavement under vehicle tire polishing", J*ournal of Wear*, 382(1), 1-7, https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.04.004.

Winter, M., and Breitsamter, Ch., (2016), "Efficient unsteady aerodynamic loads prediction based on nonlinear system identification and proper orthogonal decomposition", *Journal of Fluids and Structures*, 67(1), 1-21, https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2016.08.009.

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

5533.0004187.

Klenzedrof, B., Eck, B., Charbeneau, J., and Barrbeet, M., (2012), "Quantifying the behavior of porous asphalt overlays with respect to drainage hydraulics and runoff water quality, *Journal of Environmental & Engineering Geoscience*, 10(1), 99-111, https://doi.org/10.2113/gseegeosci.18.1.99.

Li, R., Xiao, F., Amirkhanian, S., You, Z., and Huang, J., (2017), "Developments of nano materials and technologies on asphalt materials-A review", *Journal of Construction and Building Materials*, 143(1), 633-648, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.158.

Lopes Afonso, M., Almeida, M., and Sena Fael, C., (2017), "Study of the porous asphalt performance with cellulosic fibers", *Journal of Construction and Building Materials*, 135, 104-111, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.222.

Masri, Kh., Zali, N., Jaya, R., and Hasan, M., (2022), "The influence of nano titanium as bitumen modifier in stone mastic asphalt", *Journal of Advances in Materials Science and Engineering*, 22(1), 1-19, https://doi.org/10.1155/2022/4021618.

Roseen, R., Ballestero, T., Houle, J., Briggs, J., and Houle, K., (2012), "Water quality and hydrologic performance of a porous asphalt pavement as a storm-water treatment strategy in a cold climate", *Journal of Environmental Engineering*, 138(1), 81-89, https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000459.

Sambito, M., Severino, A., Freni, G., and Neduzha, L.A., (2021), "Systematic review of the hydrological, environmental and durability performance of permeable pavement systems", *Journal of Sustainability*, 13(8), 4509, https://doi.org/10.3390/su13084509.

Shafabakhsh, Gh., Jafari Ani, O., and Mirabdolazimi, S.M., (2021), "Rehabilitation of asphalt pavement to improvement the mechanical and environmental properties of asphalt concrete by using of nano particles", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 9(2), 1-20, https://doi.org/10.22075/JRCE.2019.17407.1326.

Standards Australia, (1995), *Methods of sampling and testing asphalt determination of the permanent compressive strain characteristics of asphalt*, Dynamic Creep Test, AS 2891.12.1, Sydney, Australia

Tanzadeh, J., Tanzadeh, R., Nazari, H., and Kamvar, N., (2017), "Fatigue evaluation of hot mix asphalt (HMA) mixtures modified by optimum percent of Tio nanoparticles", J*ournal of Advanced Engineering Forum*, 24(1), 55-62, https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.24.55.

Thomas, B.B., Mark, H.S., Janelle, A., Brian, B., (2008), "Potential for localized groundwater contamination in a porous pavement parking lot setting in Thode Island", J*ournal of Environmental Geology*, 55(3), 571-582, https://doi.org/10.1007/s00254-007-1008-z.

Wang, Z. Leng, H., Yu, M., Hūben, J., and Kollmann, M.,

جناب آقای دکتر منوچهر وثوقی
استاد بازنشسته دانشگاه صنعتی شریف و عضو هیئت تحریریه نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب

*** لطفا معرفی مختصری از خود و سوابق فعالیت‌هایتان در حوزه آب و فاضلاب و توضیحی در خصوص مهم‌ترین دستاوردها و فعالیت‌های خود در این حوزه ارائه بفرمایید.**

- من استاد بازنشسته دانشکده مهندسی شیمی و نفت دانشگاه شریف هستم. از سال ۱۳۵۱ دوره کارشناسی را با گذراندن دروس در حوزه تصفیه آب و فاضلاب و انتخاب پروژه کارشناسی تحت‌عنوان طراحی و ساخت تانک‌های ته‌نشینی برای یک واحد لجن فعال در دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه شریف انجام دادم. سپس فعالیت در این حوزه در دوران سرباز امریه در مرکز تحقیقات مهندسی بیوشیمی و محیط‌زیست دانشگاه شریف تحت سرپرستی پروفسور مایدا از دانشگاه اوزاکا ژاپن و آقای دکتر عباس فاضلی ریاست مرکز تحقیقات ادامه یافت. در مرحله بعد در دانشگاه اینرا، تولوز فرانسه تحت سرپرستی پروفسور Navaro دوره کارشناسی ارشد پایان یافت و درجه دکترا را در زمینه زیست فناوری ادامه دادم. در سال ۱۳۶۲ به ایران مراجعت و فعالیت در دانشکده مهندسی شیمی و نفت دانشگاه شریف و مرکز تحقیقات مهندسی بیوشیمی را شروع کردم که تا این تاریخ با توجه به تخصص و تجربه مختصری که در این حوزه دریافت شد فعالیت دارم. حاصل این فعالیت‌ها تربیت و راهنمایی پایان‌نامه حداقل ۴۰ دانشجوی ارشد و ۱۵ نفر دانشجوی دکتری در دانشگاه‌های کشور و مشاوره در طراحی واحدهای تصفیه فاصلاب صنعتی در شرکت‌های مشاوره خصوصی و یا مراکز دولتی است.

*** با توجه به توسعه نگرانی‌ها و دغدغه‌ها در خصوص مباحث مرتبط با کیفیت آب و تامین ایمن آب به خصوص در شهرها، به نظر شما چه ملاحظاتی برای حصول اطمینان از کیفیت ایمن آب شرب موردنیاز است؟**

- در مورد کیفیت آب شرب در مرحله اول منبع اصلی برداشت آب باید مورد بررسی قرارگیرد. به‌عنوان مثال اگر آب‌های جاری است، ورود آلودگی‌های شهری و صنعتی ارزیابی و کنترل شود و اگر آب‌های زیرزمینی است، کیفیت آب به‌ویژه از وجود نیترات‌ها، فلزات سنگین و آلودگی‌های نفوذی نظیر پساب کارخانجات دارویی و..... مورد توجه قرارگیرد. تجهیز آزمایشگاه مرکزی به‌روز در مراکز استان‌ها از طرف شرکت‌های آبفا به‌منظور کنترل کیفیت آب مصرفی شهروندان، اجازه فعالیت به بخش خصوصی برای ایجاد آزمایشگاه‌های تعیین کیفیت آب و به‌روزرسانی استانداردهای کیفی آب توسط شرکت‌های آبفا از جمله مواردی هستند که باید مورد توجه جدی قرار بگیرند.

*** به نظر شما چالش‌های اصلی آموزش کشور در حوزه امور آب چه مواردی هستند؟**

با توجه به تجربیات به‌دست آمده از آموزش و پژوهش و فناوری در این حوزه مهم‌ترین چالش‌ها را می‌توان به‌شرح زیر دسته‌بندی نمود :

۱- توجه به موضوع آب و آلودگی آن با آموزش در دوران کودکی، دبستان، دبیرستان و ...

۲- ارائه دوره‌های تحصیلات عالی در دانشگاه‌های کشور و تربیت کاردان، طراح، پژوهشگر و افرادی با مهارت کافی در زمینه حفاظت، نحوه مصرف در بخش‌های مختلف، و آشنایی با روش‌های مختلف تصفیه به‌منظور بازچرخانی و استفاده مجدد از آب.

*** به‌نظر شما در پاسخ به چالش‌های موجود حوزه آب و فاضلاب کشور، چه مواردی نیاز به توجه جدی مسئولین و متخصصان دارد؟**

- آشنایی مسئولین، فارغ‌التحصیلان، مهندسین مشاور و کلیه افرادی که مصرف آب دارند، از جمله کشاورزان، صنایع، شرکت‌های آبفا و ... با روش‌های تامین و حفظ منابع آب کشور و آموزش و ایجاد فرهنگ لازم برای تاب‌آوری و این‌که آب یک ماده مقدس است و مصرف بی‌رویه آن می‌تواند یک نوع

نافرمانی باشد، منابع آب حفظ شود، سهمیه آب برای محیط‌زیست در کشور منظور شود و با توجه به شرایط منابع آب کشور، لزوم تامین آن به‌هر طریق علمی و اقتصادی باید مورد توجه همه افراد جامعه باشد.

ارزش اقتصادی، تقدس و احترام و فرهنگ استفاده از آب در همه جا آموزش داده شده و اجرای دستورهای صرفه‌جویی الزامی باشد.

توجه کافی به آب‌های غیرمتعارف، خاکستری و روش‌های تامین منابع آب‌های زیرزمینی از طریق روش‌های علمی، آبخیزداری و آب‌خوان‌داری و ...صورت‌گیرد.

*** به‌نظر شما چگونه نهادهای مستقل و تخصصی هم‌چون انجمن آب و فاضلاب ایران می‌توانند به تامین نیازهای صنعت کشور در بخش اب و فاضلاب کمک کنند؟**

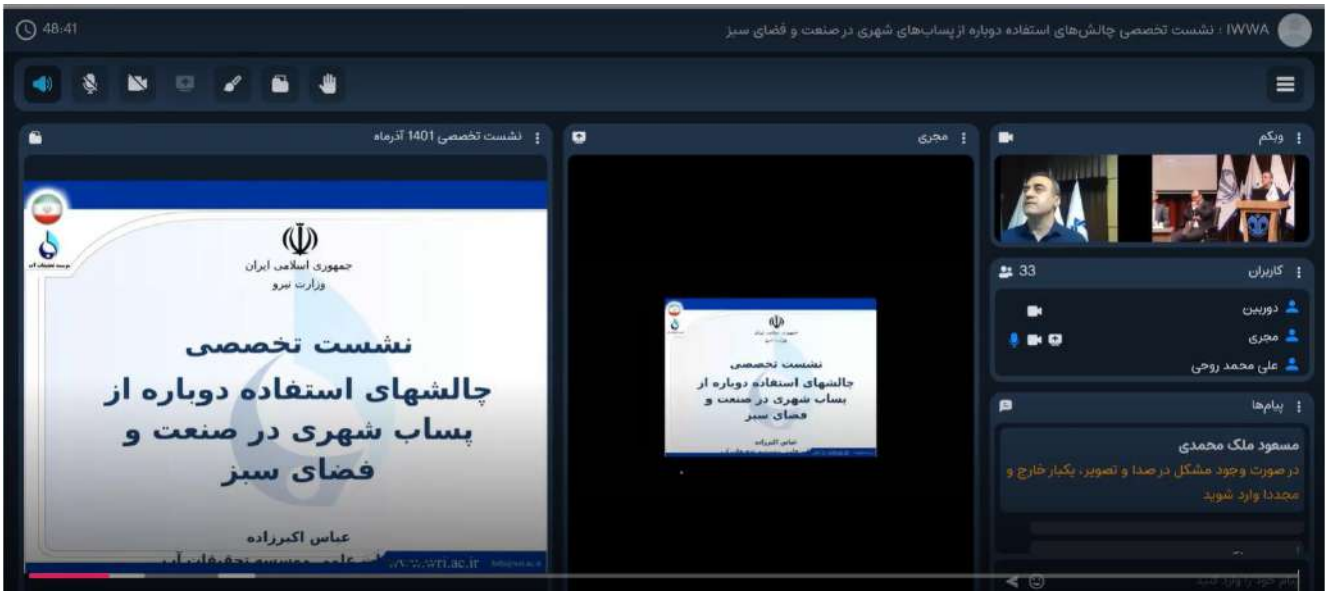
- انجمن های علمی در حوزه آب و فاضلاب به‌عنوان بازوی علمی تصفیه‌خانه و سایر مراکز توزیع آب شهری باید عمل نمایند. از آن‌جایی که معمولا انجمن‌ها خودشان فاقد امکانات آزمایشگاهی هستند، باید با ارتباط با دانشگاه‌ها و مراکز علمی و پژوهشی مرتبط، مشکلات شرکت‌های آبفا را مطرح و به‌طور مشترک پروژه‌های پژوهشی و کاربردی را تعریف کرده و فناوری‌های به‌روز با توجه به استانداردهای جدید را مشخص و برای اجرا به مراکز تصمیم‌گیر ارایه و پی‌گیری نمایند.

*** با توجه به توان علمی و تشکیلاتی انجمن، صنعت چه‌طور می‌تواند از این ظرفیت به نحو موثری استفاده نمایند؟**

- خوشبختانه برگزاری نشست‌ها، کنفرانس‌ها و کارگاه‌های آموزشی و تشویق دانشجویان این حوزه از طریق انتخاب پایان‌نامه و یا رساله برتر، روی تهیه آب سالم بسیار تاثیر گذاشته است. ولی لازم است با همین روش صنایع مرتبط با تهیه آب سالم را نیز مورد تشویق قرارداد. به‌عنوان مثال سازندگان دستگاه‌ها و تجهیزات لازم برای پایش، اندازه‌گیری و تصفیه آب و یا شرکت‌های مشاور و مجری تصفیه‌خانه‌ها را نیز مورد توجه، رصد و تشویق قراردهد.

نشست تخصصی چالش‌های استفاده دوباره از پساب‌های شهری در صنعت و فضای سبز
(چهارمین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران، ۱ تا ۳ آذرماه سال ۱۴۰۱ ، دانشگاه قم)

لینک فیلم نشست: https://www.aparat.com/v/41JAS



اعضای نشست:

دکتر عباس اکبرزاده (عضو هیئت علمی موسسه تحقیقات آب و مدیر مرکز تحقیقات آب و فاضلاب)

دکتر انوشیروان محسنی بندپی (استاد دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی)

مهندس آرش نیک‌خواه (وزارت مسکن و شهرسازی، شرکت عمران شهرهای جدید)،

دکتر اصغر جهانی بهنمیری (رئیس واحد محیط زیست و آب‌های غیرمتعارف شرکت مدیریت منابع آب ایران)

مهندس حمیدرضا ارومیه (رئیس هیئت مدیره شرکت مشاور پارس آرین آب)

دکتر اکبرزاده:

بسم الله الرحمن الرحیم عرض سلام و روز به‌خیر دارم خدمت همه حضار گرامی و همین‌طور دوستانی که از طریق محیط اسکای‌روم خدمتشان هستیم. امیدوارم جلسه‌ای که امروز تحت عنوان نشست چالش‌های استفاده دوباره از پساب‌های شهری در صنعت و فضای سبز به همت همه شما بزرگواران برگزار می‌شود بتواند کمک بکند به وضعیتی که در حوزه آب در کشور، هم در صنعت و هم در بقیه بخش‌هایی که مصرف‌کننده آب هستند در حال‌حاضر وجود دارد. من خیلی سریع دوستانی که افتخار دادند و در نشست ما حضور دارند را معرفی بکنم. عنوان بحث آقای دکتر محسنی جنبه‌های بهداشتی کاربرد پساب در صنعت و فضای سبز است. آقای دکتر مردان چالش‌های به‌کارگیری پساب در صنایع کوچک و شهرک‌های صنعتی را عنوان می‌کنند. آقای مهندس نیکخواه لزوم استفاده از پساب و بازچرخانی آب در ساخت شهرهای جدید را ارایه می‌کنند. آقای دکتر جهانی وضعیت کاربرد پساب برای فضای سبز در ایران و جهان را بیان می‌کنند. آقای مهندس ارومیه در ارتباط با روش‌های تکمیلی بازیافت آب از پساب شهری و پروژه‌های موردی که انجام شده مطالبی را ارایه می‌کنند.

من قبل از هر چیز خواهش می‌کنم که دوستان در بحث مشارکت بکنند. یک سوال اساسی که همیشه هنگام برگزاری همایش به‌عنوان یک نقد مطرح هست این است که حالا همایش برگزار کردیند چی شد؟ این سوال بسیار اساسی و درستی هست. من همین الان می‌خواهم یک خبر خوش را به همه حاضرین بدهم

که ما از سال ۱۳۹۵ که برای تهیه نقشه راه تصفیه فاضلاب کشور در موسسه تحقیقات آب دو تا نقشه راه داشتیم، نمک‌زدایی و تصفیه فاضلاب. وقتی در ۱۴۰۰ تمام شد اتفاقات جالبی افتاد که در مطالبی که امروز ارایه می‌کنم می‌بینید که این‌ها بحث‌هایی نیست که فقط به درد یک روز بخورد و بعد در جایی بایگانی بشود. به همت همه دوستانی که دغدغه این قضایا را داشتند موارد خوبی اتفاق افتاده که فکر می‌کنم از این منظر کشور ارتقائی پیدا بکند. عناصر اصلی استراتژی بازچرخانی آب را ملاحظه می‌کنید که اول پتانسیل این منابع جدید یا منابع غیرمتعارف باید در هر منطقه شناخته بشود. محدوده بررسی‌هایش در بازچرخانی بر اساس هر منطقه مشخص بشود. نهادهای حاکمیتی برای تعیین نقش و مسولیت در قبال مشکل کم آبی مشخص بشوند. ارزیابی هزینه‌ها انجام بشود و بعد ایجاد ظرفیت منابع انسانی متخصص و تشویق و حمایت از سرمایه‌گذاری بخش خصوصی. یعنی هر جایی می‌بینیم در حوزه استفاده مجدد از پساب اتفاق خوبی افتاده به این استراتژی‌ها توجه شده. مثال‌های مختلفی را از کشورهای مختلف داریم که در ادامه ملاحظه می‌کنیم. این عدد رقم‌هایی که ملاحظه می‌کنید فقط به جهت این هست که ما اهمیت کار را بیشتر نشان بدهیم. گزارش مربوط به ۲۰۲۰ فائو هست. ملاحظه می‌کنید که فقط در حوزه کشاورزی از محل فقط نوترینت‌ها یعنی ازت، فسفر و پتاسیم، ۱۳/۴ درصد نیاز کودها را پساب می‌تواند در کل جهان تامین بکند که یک بخش بسیار بزرگی هست و قابل‌توجه. شاخص‌هایی که در طراحی‌ها معمولا به آن توجه باید بشود شامل کیفیت آب، پایش آب و فاضلاب، تصفیه فاضلاب، نظارت عملیات بر پایش، رعایت استانداردها و شناسایی ذی‌نفعان هست. من به استانداردها و پایش و نظارت ورود نمی‌کنم .خواهش می‌کنم آقای دکتر محسنی که بعد از عرایض بنده انشاالله ارایه خواهند داشت این مسایل را مطرح بکنند و اساسا به‌عنوان یک منتقد این بحث را مطرح کنند چون بقیه دوستان نیاز خودشان را می‌گویند. حتما هر فناوری که استفاده می‌کنیم جنبه‌های مثبت و منفی دارد و قرار هست که آقای دکتر محسنی این بخشی که حالا اگر اسمش را معایب نگذاریم ولی مواردی هست که باید به آن توجه بکنیم. سازمان بهداشت جهانی و کمیسیون اروپا استانداردهای مختلفی را برای استفاده از پساب دارند. ولی نکته این است که هر کشوری براساس این‌ها باید استاندارد خودش را برای استفاده از پساب داشته باشد. نکته این هست که هیچ‌کدام از این‌ها توصیه نمی‌کنند که این موضوع را برای همه کشورها می‌توانیم استفاده بکنیم. چند تا کشور به‌عنوان نمونه خدمت شما معرفی می‌کنم. کشور چین، ژاپن و کره که می‌بینید ترندشان از ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۱ به چه‌صورت بوده، قوانین‌شان به چه‌صورت حرکت کرده و در حال‌حاضر در کشور چین بازچرخانی آب برای ساختمان‌هایی که بیش از ۳۰۰۰۰ مترمربع مساحت دارند اجباری هست. باز استانداردهای کیفی ژاپن را ملاحظه می‌کنید که به همین صورت هست. ملاحظه می‌کنید استفاده مجدد فاضلاب و تصفیه آب خاکستری برای ساختمان‌هایی با مساحت بیش از ۳۰ هزار مترمربع با تقاضای غیرقابل شرب بیش از ۱۰۰ مترمکعب در روز الزامی هست. ما یکی از دستاوردهایی که دنبالش بودیم ولی هنوز به این موضوع نرسیدیم همین است که این موضوع را به‌صورت قوانین الزام‌آور برای ساخت و ساز مسکن‌هایی که به‌صورت جمعی ساخته می‌شود، یا ساختمان‌های بلند مرتبه در کشور خودمان استفاده کنیم. مسائل ایران را در حوزه پساب آقای دکتر جهانی ارائه می‌کنند. من آن قسمتی که می‌خواستم خدمت شما عرض بکنم که پیگیری‌هایی که دوستانی که در حوزه پساب دغدغه داشتند منجر به چه قوانینی شد و الان به کجا رسیدیم. توجه شما را جلب می‌کنم به این جدول از ۱۳۶۴ تا ۱۴۰۰ و البته این همه مصوبات نیست، ولی چند تایی از آن‌ها که با اهمیت بودند را خدمت شما معرفی کردیم که آرام آرام داریم می‌رویم به سمت این‌که خودمان را برسانیم به کشورهای به اصطلاح جهان اول و استفاده از پساب.

آخرین موردی‌که تصویب شده ولی ابلاغ نشده و فکر می‌کنم جزء مسایلی باشد که بسیار در این حوزه افتخارآمیز هست که شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور و شرکت آب منطقه‌ای به‌صورت مشترک این دستورالعمل را مصوب کردند. دستورالعمل مشارکت عمومی خصوصی برای طرح‌های بازچرخانی آب هست که به‌زودی ضوابطش هم می‌آید و به‌صورت اجباری در صنعت و بقیه قسمت‌ها از آنش استفاده خواهد شد. ملاحظه می‌کنیم در این دستورالعمل اهدافی درنظر گرفته شده که با از مجموعه اهدافی که بعضی شاید به‌صورت کلی باشد بعضی از آن‌ها ملاحظه می‌کنید که کاملا مرتبط با بحث توسعه بازچرخانی آب در فرایندهای صنعتی و مصارف با کاهش برداشت از منابع آبی است. به‌عبارت دیگر وقتی که این مصوبه ابلاغ می‌شود صنایع کشور دیگر نمی‌توانند از آب‌هایی که به‌صورت آب سطحی رودخانه و یا آب‌های زیرزمینی هست استفاده کنند و ملزم می‌شوند به این‌که از پساب‌های شهری استفاده بکنند یا بازچرخانی آب را در سیستم خودشان داشته باشند و همین‌طور قیمتی که برای این موضوع تصویب شده کمک می‌کند که این مصوبه اجرایی بشود.

من همین‌جا ضمن تشکر از دوستان خود در وزارت نیرو در شرکت آب و فاضلاب و شرکت مدیریت منابع آب این را به فال

نیک می‌گیرم و به‌عنوان یک مژده برای همه عزیزانی که عاشق محیط‌زیست هستند و مسایل آب و فاضلاب را به‌عنوان دغدغه‌خود می‌شناسند خواستم مطرح بکنم که این اتفاق خوب دارد می‌افتد. طبق این دستوالعمل تخصیص خرد منابع آب تجدیدپذیر اعم از سطحی و زیرزمینی توسط شرکت به صنعت و فضای سبز ممنوع است. جدول دیگری هست که ترند بازچرخانی آب و استفاده از آب‌های خاکستری در ساختمان را نشان می‌دهد. اصفهان و مشهد در این حوزه پیشگام هستند و حتی موقعی که سازمان نظام مهندسی این را به‌عنوان الزام مطرح نکرده خودشان از طریق شورای شهر مصوب کردند و دارند استفاده می‌کنند. خوشبختانه در چند روز گذشته در ۱۴۰۱ طرح الزام شهرداری تهران هم به ارایه لایحه عملیات احیا و مدیریت بازچرخانی آب به شهرداری اعلام شد و در حقیقت معنی و مفهوم آن این است که شهرداری تهران هم الزاما باید این طرح را آماده و به‌صورت یک لایحه مصوب بکند و از این به‌بعد اگر ساخت و سازی قرار هست انجام بشود براساس این موقعی که دارد ساخته می‌شود در ساختمان باید برای آب‌های غیرشرب سیستم بازچرخانی داخلش دیده شود. خیلی ممنونم از توجه شما. سعی کردم که خیلی سریع و خلاصه مسایلی عرض بکنم که عمدتا در حوزه قوانین و خبری که از گذشته تا حال نشان می‌دهد که این پیگیری‌هایی که دوستانی که در همایش‌ها و در محل کار خودشان دارند انجام می‌دهند دارد اتفاقات خوبی را رقم می‌زند. سایر دوستانی که خدمتشان هستیم و از فرمایشاتشان استفاده خواهیم کرد خواهش می‌کنم خیلی کوتاه و مجمل مباحث خودشان را ارایه بکنند.

آقای دکتر محسنی بندپی

بسم الله الرحمن الرحیم عرض سلام و وقت به‌خیر دارم خدمت همه عزیزان و بزرگواران و تشکر قدردانی از برگزارکنندگان این همایش بسیار مهم و با اهمیت و تشکر ویژه از مدیر محترم پنل آقای دکتر اکبرزاده. مطلب اول در رابطه با اهمیت آب هست که بر کسی پوشیده نیست که رکن اصلی و اساسی توسعه یافتگی همه کشورها منوط به داشتن منابع آب هم به لحاظ کمی هم لحاظ کیفی مطلوب هست. متاسفانه این عنصر یا این کالا فعلا کمیاب هست و راه‌حل‌هایی برای بحث نشست تخصصی که امروز بازچرخانی آب و استفاده مجدد آب هست. ما اگر منابع آب دنیا را بررسی کنیم از صد درصد منابع آب ما ۹۷/۴ درصد آب اقیانوس‌ها و دریاها هستند که غیرقابل استفاده هستند. تقریبا ۲/۶ درصد آب مفید هست که از این مقدار بیشترش برمی‌گردد به آب‌های زیرزمینی و فقط مقدار بسیار کوچکی ۰/۰۱۴ آن قابل دسترسی آسان هست برای استفاده. در کشور ما هم که وضع بدتراست ما ۱/۱ خشکی‌های زمین را داریم ولی سهم آبمان از دنیا ۰/۳۶ درصد هست. یک سوم کشورهای جنوب‌غربی آسیا منطقه خاور نزدیک و تقریبا به‌لحاظ وسعت ۱۲ درصد مساحت ولی به‌لحاظ برخورداری از منابع آب تجدید شونده ۰/۲ درصد سهم دارند. باز در کشور ما در تابستان گذشته در ده استان با تنش آبی حتی در مازندران مواجه بودیم. تکیه هرمزگان بر دریا و آب‌شیرین‌کن‌ها است که واقعا می‌دانید که چقدر سخت است. بحران آب در همدان داشتیم، جدال یزد با کویر خشکسالی، چشم امید کرمان به خلیج‌فارس و در خراسان رضوی مناقشات آب هیرمند را داریم. ۲۰۰-۳۰۰ شهرمان در تنش آبی است و تا ۲۰۴۰ ایران جزو پرتنش‌ترین مناطق دنیا با تنش آبی بالای ۸۰ درصد هست و منابع آبی کمتر از ۹۰ میلیارد مترمکعب که سرانه آب تجدیدپذیر ما کمتر از ۱۰۰۰ مترمکعب خواهد بود. ما برعکس دنیا، کشاورزی‌مان ۸۸/۸ درصد آب را مصرف می‌کند در دنیا ۶۹ درصد است. صنعت ما ۲/۷۴ درصد که در دنیا ۲۳ درصد است. آب شرب اجتماعات شهری و روستایی‌مان ۸ درصد است که از این لحاظ خیلی فرقی نمی‌کنیم. آماری هست که نشان می‌دهد که وضعیت موجود بحرانی هست. وزارت نیرو در سال ۱۳۳۸ پانصد میلیارد مترمکعب را حاصل از بارش گزارش داده. باز وزارت نیرو در ۱۳۶۰ عدد ۴۰۰ میلیارد مترمکعب و در سال ۱۳۹۹ یعنی حدود ۶۰ سال بعد ۳۷۶ میلیارد مترمکعب اعلام کرده است. یعنی ما سالانه به‌طور متوسط روند نزولی ۲ میلیارد مترمکعب داریم. حالا در خانه آب سه جور آب داریم. یکی آب سفید است که در لوله‌ها جریان دارد، آب خاکستری که هم حمام، ظرفشویی و روشویی هست هم آب باقیمانده از سمومات آبکشی است و آب سیاه داریم که از فاضلاب هست که هنوز ما در کشورمان این دو تا با هم هست. یعنی دو و سه را با هم داریم. ما اگر حساب بکنیم که براساس آمار مرکز آمار کشور سال ۱۴۰۰ تعداد ۸۴۰۵۵۰۰۰ نفر جمعیت داشتیم، متوسط هم ۱۸۰ لیتر در روز مصرف داشته باشند، شهری و روستایی متوسط ۵/۵ میلیارد مترمکعب آب در سال برای مصارف خانگی مصرف می‌شود. با ضریب تبدیل ۸۰ درصد به فاضلاب یعنی ما ۴/۴ میلیارد مترمکعب آب داریم که می‌توانیم استفاده مجدد را در دستور کار خودمان داشته باشیم. این‌جاست که وارد آن بحثی که آقای دکتر اکبرزاده اشاره کردند

می‌شویم. ببینید ما در کشور مراحل تصفیه عمدتا فیزیکی اولیه و بعضا هم زیستی با راندمان متوسط داریم. در تصفیه فیزیکی آشغال‌گیر، دانه‌گیر، ته‌نشینی شما می‌بینید درصدی مواد معلق، BOD_5 ۳۵ درصد، کلی‌فرم ۶۵ درصد، ازت و فسفر بین ۵ تا ۱۰ درصد، فلزات سنگین ۵ درصد داریم. در تصفیه زیستی که لجن فعال و لاگون هوادهی باشد ما مواد معلق تا ۹۵ درصد، کلی‌فرم‌ها ۹۵-۹۹ درصد، BOD_5 ۸۵ درصد، ازت و فسفر حدود ۳۰-۴۰ درصد و ۵ درصد فلزات سنگین داریم. ما در مرحله تصفیه پیشرفته نیستیم یعنی ازت را نمی‌توانیم حذف بکنیم، فسفر را هنوز هم نرفتیم به سراغش، حذف فلزات سنگین نداریم. پس نهایتا این آبی که از تصفیه زیستی ما خارج می‌شه حاوی ازت، فسفر، فلزات سنگین و بعضی از پاتوژن‌هایی است که مقاوم هستند به عمل کلرزنی آب.

بازچرخانی موضوع بسیار مهمی هست در روند تبدیل فاضلاب به آب و برای اهدافی است که هم در فضای سبز، هم در کشاورزی، هم در صنعت، هم در تجارت، هم برای تغذیه گیاهان و هم تغذیه آبخوان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. سازمان جهانی بهداشت به‌دلایل زیر مجاز دانست یعنی گفته بروید به سراغ استفاده مجدد. واقعا کمبود آب و تنش حاصل از آن در دنیا به‌عنوان یک امر بسیار بسیار با اهمیتی دارد مطرح می‌شود. افزایش جمعیت داریم، مسایل مرتبط با امنیت غذایی را داریم، هم به‌لحاظ کیفی و هم به‌لحاظ کمی افزایش آلودگی‌های محیط‌زیستی ناشی از دفع فاضلاب داریم. اگر فاضلاب همین‌جور بدون تصفیه رها بشود هم خاکمان را هم آبمان را و هم اکوسیستم‌های آبی‌مان را دچار مشکلات شدید می‌کند. یک تجربه‌ای از ۱۹۴۰ در دنیا رواج پیدا کرده که ما بیایم براساس همین توصیه سازمان جهانی بهداشت و بحران‌های آبی که با آن مواجه هستیم، روند بازیابی و استفاده مجدد از فاضلاب رادر دستور کار خودمان قرار بدهیم که هم کشورهای توسعه‌یافته و هم کشورهای درحال توسعه (مثل مشهد، اصفهان و بعضی جاها) سه دلیل برای این کار درنظر گرفته‌اند: کاهش آلودگی ناشی از فاضلاب‌های تصفیه‌نشده است، استفاده از این منبع آب نامتعارف به‌عنوان راه‌کار مقابله با کم آبی، قابلیت رقابت فاضلاب تصفیه شده با برخی از منابع آب. هم‌چنین معایب و مزایای این منبع را و تا حدی روشن می‌کند. مهم‌ترین مزیت‌هایی که دارد کاهش تنش آبی هست، منبع مطمئن هست برای تمام فصول (رودخانه‌های ما بعضا فصلی هستند ولی آب روزانه دارد مصرف می‌شود. می‌توانیم روزانه این را تصفیه بکنیم و برای آبیاری فضای سبز صنعت استفاده کنند)، کاهش بار آلودگی در رودخانه‌ها، افزایش درآمد و کاهش نیاز به کودشیمیایی. آقای دکتراکبرزاده اشاره کردند ۱۳/۴ درصد نیاز ما را به مصرف مواد مغذی در مزارع‌مان کم می‌کند. آن چیزی که در ویژگی‌های فاضلاب شهری‌مان هست اکسیژن مورد نیاز بیو شیمیایی است. اکسیژن مورد نیاز شیمیایی است، کربن آلی است یعنی وجود دارد در این آب، نیتروژن، فسفر، یون کلراید، یون فسفات، قلیایت، فلزات سنگین، میکروارگانیزم‌ها یعنی باکتری‌ها و ... ویروس‌ها هستند. علی‌رغم همه این ویژگی‌هایی که اشاره کردیم استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده معایبی دارد که باید به آن خیلی توجه بکنیم. یکی این‌که خطرات بهداشت فردی دارد برای محصولات کشاورزی. خطر دارد برای مصرف‌کنندگان. اصلا اکوسیستم خاک ما را هم اگر واقعا دقت نکنیم این فلزات سنگین دچار مشکل می‌کند. یکی از عمده‌ترین جایی‌که حجم وسیعی از پساب می‌تواند استفاده بشود در کشاورزی است. از بین فاضلاب‌های خانگی فاضلاب‌های شهری اولویت بیشتری دارد. اگر ما بتوانیم فاضلاب خاکستری را از فاضلاب سیاه جدا کنیم که اولویت دارد (یعنی این‌هم می‌تواند به‌عنوان یک اولویت قرار بگیرد در استفاده از فاضلاب خانگی برای مصارف زراعی) توجه خاص بهداشتی از جمله به کلی‌فرم کل، کلی‌فرم مدفوعی، تخم انگل انگل‌های نماتودی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و از عوامل محدودیت‌زا در الگوی کشت است. شما یک سیستم آبیاری فاضلاب تصفیه شده را نگاه بکنید می‌گویم آن‌هایی که دارای تماس و دسترسی هستند، یعنی مستقیم هم به لحاظ تنفس، هم به‌لحاظ گوارشی می‌تواند هم کشاورزان و هم کارگران را دچار مشکل بکند. جذب این آلاینده‌ها که در قسمت‌های خوردنی گیاه وجود دارد می‌تواند مصرف‌کننده را دچار مشکل بکند. تجمع این آلاینده‌ها در آب‌های سطحی، زیرزمینی و خاک می‌تواند مشکل‌آفرین باشد. عبور این واترجنت‌ها باز می‌تواند در آب‌های سطحی و زیرزمینی مشکل‌آفرین باشد و چراگاه‌هایی که ما برای دام استفاده می‌کنیم، آن‌هایی که از گوشت این حیوانات مصرف می‌کنند می‌تواند ما را دچار مشکل کند. مخاطرات بهداشتی استفاده از پساب‌ها در عوامل میکروارگانیسم در موادشیمیایی می‌توانند سلامتی افرادی که مستقیما از محصولات این‌ها دارند استفاده می‌کنند را دچار مشکل کنند. مواد شیمیایی سمی عمدتا مشتمل بر فلزات سنگین هستند، کرم، برم و ... و شاخص‌هایی که درنظر گرفته‌شده برای این‌ها در کاربرد فاضلاب، برای آبیاری محصولات کشاورزی، با درنظر گرفتن طیفی از اقدامات ضروری به‌منظور حفظ جامعه. محصولات کشاورزی سه گروه هستند: محصولاتی که تنها حفاظت کارگران در آن‌ها ضروری است، محصولات صنعتی مانند پنبه و کنف حبوبات و محصولاتی

به‌صورت کنسرو، محصولاتی که ممکن است به اقدامات حفاظتی بیشتری نیاز داشته باشد، چراگاه‌ها علوفه‌های سبک، محصولات درختی میوه و سبزیجات و گروه جیم محصولاتی که انجام عملیات تصفیه تا رسیدن به رهنمودهای اینگلبرت برای آبیاری آن‌ها ضروری است. سبزیجات تازه، میوه‌های آبیاری و پارک‌ها و چمن‌زارها، میادین ورزشی است. آن چیزی که آقای دکتر اکبرزاده گفتند استاندارد این را دارد می‌گوید، این‌جا فلزات سنگین را گفته و بعد هم میزان مجاز کیفیت باکترویولوژیکی آب را برای کاربری‌های کشاورزی اشاره کرده. اما آن چیزی که ما می‌خواهیم رویش تاکید کنیم بیماری‌زایی درصورت استفاده از پسابی است که به‌درستی عوامل خطرسازش تصفیه نشده است. اگر این پساب به آن استانداردهایی که مدنظر سازمان جهانی بهداشت است و سازمان محیط‌زیست ما اعلام کرده، باید دقت بکنیم که دچار این عوارض نشوند. تب تیفویی هست ناشی از باکتری تیفو سالمونلا که بسیار شدید است. شایع‌ترین بیماری همراه با سالمونلا مسمومیت‌های غذایی هست. شگرلاز باکتری کمتر شایع است. باکتری ویبریوکوروال عامل بیماری است. تنها انسان میزبان این باکتری است و انتقال آن بیشتر از طریق آب صورت می‌گیرد. میکروباکتریکلوزی است که در فاضلاب خانگی وجود دارد. این باکتری‌ها شامل اشرشیاکلی و ... هستند. در ویروس‌ها بیش از صد ویروس روده‌ای قادر به ایجاد بیماری هستند. حتی تحقیقاتی که در همین دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی انجام شده انتقال کووید ۱۹ از طریق آب و پساب امکان‌پذیر بوده یعنی دیتکت شده. در کرم‌ها هم تنها با کلرزنی که حتما باید هضم غیرهوازی مزوفیلیک را داشته باشیم و فلزات سنگین که به‌هرحال تحقیقات زیادی نشون داده که فلزات سنگین دیدیم که تا مرحله تصفیه ثانویه ما تنها ۵ درصد آن‌ها را می‌توانستیم حذف کنیم اگر وارد آبیاری بشود. در ژاپن آب آبیاری شده با کادمیوم بیماری تیاتیا را ایجاد کرده، در چین هم همین‌طور. ما یک بررسی داشتیم در رابطه با آبیاری مزارع کشاورزی در هند و پاکستان، دیدیم که وجود آن‌را در محصولات برنج شاهد بودیم. نهایتا اثرات این‌ها بر محیط‌زیست، خاک و منابع آب هست. من جمع‌بندی بکنم صحبتم را. با توجه به وضعیت آب کشور و واقعیت خشک بودن اقلیم کشور ۸۵ درصد مساحت کشور خشک و نیمه خشک هستند. استفاده از آب بازیافتی پساب تصفیه شده در کشاورزی، فضای سبز، صنایع و تغذیه امر ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. همین‌که وزارت نیرو سیستم‌های تصفیه‌خانه آب و فاضلاب و شبکه را بخشیده خودش یک موضوع با اهمیتی است .این هدف‌گذاری و راهبردش درست تشخیص داده. اثرات سوء بهداشتی استفاده از آب بازیافت شده درصورت عدم دسترسی به استانداردهای توصیه‌شده می‌تواند خطراتی را برای سلامت فردی، سلامت محصولات کشاورزی، سلامت مصرف‌کنندگان و سلامت خاک به‌همراه داشته باشد. مطالعات نشان داده بعضی از فلزات سنگین در اندام‌های هوایی گیاهی، در دانه گندم، در کاهو و برگش، در کلم، اسفناج و پیاز خاصیت تجمعی پیدا می‌کنند که موجب بیماری‌های قلبی عروقی، اختلال در سیستم عصبی، سرطان و تاثیر بر رشد اندام‌ها به‌ویژه در کودکان است. مطالعات متعدد نشان داده که چندین اپیدمی مربوط به عدم دسترسی استانداردهای میکروبی توصیه‌شده نظیر وبا، تیفوئید، اسهال ناشی از اشرشیاکلی، اسهال عمومی، عفونت‌های ویروسی ناشی از مصرف سبزیجات را به‌همراه داشته است. واقعیت این است که روش‌های موجود در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری ما که نمی‌خواهم اسم ببرم، در بعضی جاها مطالعه صورت‌گرفته که تصفیه زیستی ما حتی کلی‌فرم کل و کلیفرم مدفوعی را به درجه استاندارد نمی‌تواند برساند و موارد توصیه شده را با علامت سوال مواجه ساخته که باید نظارت، دقت و مراقبتمان بیشتر باشد.

دکتر اکبرزاده:

خیلی ممنون. نکته جالبی که در فرمایشات آقای دکتر محسنی به‌نظرم آمد که ما سعی کردیم ایشان را به‌عنوان مخالف یا به‌عنوان کسی که هشدار می‌دهد که مثلا این موارد منفی را دارد که باید به آن توجه بکنیم، با مطالبی که در WHO مبنی بر موافقت با استفاده از پساب در زمینه‌های مختلف ارایه کردند، این موضوع فکر می‌کنم یک مقداری تحت‌الشعاع قرارگرفت، مثل بقیه دوستان شد. به‌هر حال خدا را شکر می‌کنم که تمامی دوستانی که این‌جا حضور دارند ضمن این‌که مسایل را سعی می‌کنند به‌صورت علمی و با رعایت ملاحظات بهداشتی و محیط‌زیستی دنبال بکنند، لزوم استفاده از بازچرخانی را مدنظر قرار می‌دهند.

خواهش می‌کنم آقای مهندس ارومیه مطالب خودشان را ارائه بدهند. ایشان مهندس مشاور هستند و سالیان سال در حوزه تصفیه فاضلاب و بازچرخانی کار کرده‌اند. از ایشان خواستم که مطالعات موردی موفقی که در صنعت اجرا کرده‌اند را ارایه بکنند. می‌دانید که هر چقدر راجع به خوبی و بدی موضوع و از استانداردها صحبت بکنیم آخر سر باید یک سیستمی وجود داشته باشه که بتواند اآن کار را انجام بدهد و خروجیش به لحاظ فنی و اقتصادی هم قابل دفاع باشد. انشاالله مطالب ایشان این موضوع را به‌وضوح نشان بدهد.

آقای مهندس ارومیه:

من عرض سلام دارم خدمت شما و تمامی اعضای محترم پنل و سروران گرامی که حاضر هستند با توجه به فرصتی که به من داده شده من عموما روی بحث نمونه‌های اجرا شده سیستم‌های بازیافت آب از پساب‌های شهری و صنعتی صحبت می‌کنم. همان‌جور که دیگر دوستان هم فرمودند کمبود آب باعث شده که بازیافت چه از پساب شهری و چه از پساب‌های صنعتی به‌عنوان یک اصل مطرح بشه. ولی قاعدتا آن چیزی که مشخصه بازیافت آب از پساب‌های شهری و صنعتی دارای چالش‌های تکنیکی، قانونگذاری و یا مالی بیشتری نسبت به منابع دیگر هست، با توجه به این‌که دامنه کاربرد متفاوتی را هم دارد از بخش کشاورزی تا بخش صنعت و گزینه‌های مختلفی هم در قسمت تصفیه‌اش به‌کار می‌آید. حالا از تصفیه ثانویه بگذریم این‌که یک بخش متعارف تصفیه فاضلاب‌های شهری هست روی تصفیه‌های پیشرفته از فیلتراسیون می‌تواند شروع شود تا حالا بیس‌های بیولوژیکی فیلتراسیون و حذف‌های مواد آلی و ... من خیلی سریع بخش‌هایی را به‌عنوان نمونه آوردم. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید ما منابع آب‌های نامتعارف متفاوتی داریم. آن چیزی که الان مدنظر هست بخش فاضلاب خانگی است که با توجه به کارهای مطالعاتی که در سال‌های گذشته انجام شده آقای دکتر محسنی هم فرمودند ما چیزی حدود چهار میلیارد مترمکعب در سال فاضلاب خانگی را به‌عنوان یک بخش از آب‌های نامتعارف خواهیم داشت، به‌نوعی که می‌تواند قابلیت استفاده در اپلیکیشن‌های مختلف از کشاورزی تا صنعت و حتی شرب را البته نه در حال‌حاضر داشته باشد، به‌نوعی که در کشورهای دیگر هم این را به‌نوعی مورد استفاده قرار دادند. نکته‌ای که هست از بخشی که الان ما در بازیافت آب از آب‌های نامتعارف داریم، بخش آب‌های شور بخش غالب‌تری هست. بخش استفاده از فاضلاب‌های شهری درحال گسترش است چه در ایران چه در کشورهای دیگر. توضیحی از میزان بازیافت آب از منابع مختلف را به‌صورت خلاصه روی مناطق مختلف ارائه می‌کنم. سه بخش اصلی Seawater و Berkish و Basewater هست که ملاحظه می‌کنید Basewater در حال رشد است. اما در هند، چین و سنگاپور به‌شکل ویژه‌ای از منابع فاضلاب برای تامین حتی ورودی به سیستم آب شرب هم استفاده می‌شه. قاعدتا همین میزان هم همان‌طور که آقای دکتر محسنی هم فرمودند ما در بخش تصفیه ثانویه هستیم و یکی از معیارهای اصلی ما برای انتخاب فرایندهای بازیافت یا تکنولوژی‌های مناسب بازیافت برمی‌گردد به این‌که ما در بحث تصفیه ثانویه تا چقدر نزدیک شدیم به اهداف تصفیه ثانویه و این می‌تواند روی هزینه‌هایی که روی تصفیه پیشرفته و نوع تکنولوژی‌هایی که می‌خواهیم استفاده بکنیم و ضرورت‌هایی که هست تاثیرگذار باشد. در آمار ۲۰۱۰ به‌صورت جهانی آن بخشی که به‌عنوان تصفیه پیشرفته مورد استفاده قرار گرفته تقریبا کمتر از ۱۰ درصد هست و نزدیک حدود ۴۰ درصدش در بخش صنعت و فضای سبز مورد استفاده قرار گرفته. در این بخش سیستم‌های شوری‌زدایی بسته به این‌که آن کیفیت مورد مصرف چی هست، به‌عنوان یکی از عنصرهای اصلی بخش بازیافت هست. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید ما در کل چیزی حدود ۱۰۰ میلیون مترمکعب آب را داریم از سیستم‌های نمک‌زدایی عبور می‌دهیم و آب را با آن کیفیتی که مدنظر هست تولید می‌کنیم برای بخش شوری‌زدایی گزینه‌های مختلفی هست از جمله MAD, MSF, Viper Compersion, Berkish, RO Seawater که این‌ها رنج‌های متفاوتی از انرژی مصرفی را دارند برای دو بخش Berkish از ۰/۳ تا ۲/۸ و برای پساب‌هایی که شوری بالایی تا حدی شوری آب دریا دارند از ۲/۵ تا ۴ و همین‌طور برای هزینه آب تولیدی که از ۰/۵ تا ۳ دلار این هزینه متفاوت هست. ما اگر جایگزین‌های مختلفی برای تولید آب مورد نیاز بخواهیم مطرح کنیم انرژی‌های متفاوتی را نیاز دارد. اگر از تصفیه سنتی برای آب دریا استفاده کنیم تا ۰/۴ و همین‌طور برای Berkish تا ۱/۵، خود نمک‌زدایی که از دریا باشد تا ۴ کیلووات ساعت به‌ازای هر مترمکعب آب مصرفی هست. یک کاری در مرکز پژوهش‌های مجلس انجام شده که هزینه گزینه‌های مختلف را متناسب با نوع گزینه ارایه کرده که در نهایت به این نتیجه رسیده که اگر بخواهیم این تامین آب را صرفا از آب شور بکنیم (به‌طور ویژه برای دریاها) بیشترین هزینه را به خودش اختصاص می‌دهد. در پروژه‌هایی که کار شده یک جدول هزینه‌ها و برق مصرفی از گزینه‌های کار شده یک مشاور در سه بخش اصلی هست از ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ مترمکعب بر روز داده‌هایش برداشت شده، واحدهای پیشرفته در تبدیل پساب به آب بازیافتی هست که این‌ها می‌تواند از یک فیلتراسیون ساده متعارف شروع بشه و یا با فیلتراسیون ممبرانی همراه بشه و با روش‌های گندزدایی و روش‌هایی که بتونه پساب را در حد کیفیت مورد نیاز مصرف تامین بکنه. ملاحظه می‌کنید برای بخش اول ما از ۶۱۰۰۰ ریال تا ۸۲۰۰۰ ریال به‌ازای هر مترمکعب هزینه این بخش هست. در بخش پیشرفته که شامل

این واحدها هست این تا ۶۶۰۰۰ ریال هم افزایش پیدا می‌کنه و اگر این شوری‌زدایی را هم باهاش تجمیع بکنیم از پساب صنعتی و یا پساب‌های شهری با TDS کمتر از ۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر از ۹۷۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰۰ ریال می‌تونه تغییر پیدا کنه و این دو بخش به‌عنوان جمع آیتم‌های دو و سه به‌عنوان بخش تکمیلی برای استفاده روی فاضلاب‌ها و پسآب‌های نامتعارفی که پساب‌های صنعتی و شهری می‌تونه بین ۱۳۰۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰۰ ریال در هر مترمکعب باشه. روی کیلووات مصرفی هم برای بخش یک از ۰/۷۵ تا ۱/۵ کیلو وات به‌ازای هر مترمکعب و برای بخش شوری‌زدایی از ۱/۱ تا ۲/۲ رنج میزان برق مصرفی هست. محاسباتی که برای بخش هزینه‌ها به‌ازای هر مترمکعب شده برای یک دوره ۱۵ ساله با کلیه هزینه‌های بهره‌برداری مربوط به آن واحد هست.

ما تکنولوژی‌هایی که داریم عموما اگر تصفیه ثانویه را به‌عنوان هدفی که تصفیه ثانویه داشته به‌عنوان معیار درنظر بگیریم و فرض را بر این بگذاریم که تصفیه ثانویه دارد کار خودش را به‌عنوان این بخش به‌نحو احسن انجام می‌دهد و خروجی‌های متناسب با تصفیه ثانویه را به ما ارایه می‌کنه، ما در مجموع چه برای استفاده مجدد شرب و غیرشرب دو سری از فرآیندها را می‌توانیم داشته باشیم. یک‌سری پایه ممبرانی دارند که از سیستم‌های اولترافیلتریشن، ماکروفیلتریشن و مجموع تصفیه مقدماتی وابسته به این‌ها سیستم‌های نمک‌زدایی که برای کاهش کل جامدات محلول هست می‌تونه کنار این سیستم قرار بگیره و یا سیستم‌هایی که پایه ممبرانی ندارند یعنی از بخش‌های شیمیایی اکسیداسیون تشکیل می‌شوند یا می‌توانند قسمت‌های فیلتر زیستی یا جذب سطحی را هم با خودشان همراه داشته باشند. در مجموع ترکیب این فرایندها بسته به مشخصات کیفی پساب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها به‌عنوان یک منبع نامتعارف برای تامین آب هست تا این‌که تا چه درجه‌ای از تصفیه و برای چه کاربردی بخواهد استفاده بشود. این گزینه‌ها می‌تواند گزینه‌های متفاوتی باشد. به‌طور مثال برای استفاده مجدد شرب ما گزینه‌های مختلفی را داشتیم که تقریبا همه هم دارند از پساب استفاده می‌کنند.تصفیه این آب ترکیبی از روش‌های ممبرانی و گندزدایی هست و یا حتی شناورسازی و فیلتراسیون و اکسیداسیون که قاعدتا با توجه به‌نوع مصرف می‌تواند متفاوت باشد. جالبه این مدل تا ۲۴۰۰۰ مترمکعب در روز هست. همین ترتیب را استفاده کردند که یک بخش شیمیایی و جداسازی جامدات را داشتند و تا یک بخش این‌که فیلتر بیولوژیکی برای حذف آن بار آلی پایین باقی‌مانده تا جذب سطحی و فیلتراسیون نهایی با اولترافیلتریشن و این را به‌عنوان ورودی به سیستم تامین آبشان درنظر گرفتند. یک نکته‌ای که در همین انتخاب تکنولوژی‌ها به‌نظرم گفتنش مناسب هست با توجه به صحبت‌هایی که آقای دکتر محسنی کردند ما به این جدول خیلی باید دقت بکنیم. ما در روش‌های تصفیه ثانویه عموما مشخصات کیفی برای پارامترهای اصلی داریم، این‌که شما چه انتخاب تکنولوژی‌هایی بعد از تصفیه ثانویه برای تامین آب چه در بخش صنعت، چه در بخش فضای سبز، انتخابش با تحلیل این پارامترها همراه خواهد بود. صرفا این را عرض می‌کنم که تفکیک COD و TSS در واحدهای پایین‌دستی تصفیه می‌تونه بسیار مهم باشه. این مقایسه‌ای هست که بین تصفیه ثانویه هست با این‌که شما تصفیه شیمیایی انجام بدهید. این‌که تا چه درصدی از ذرات را می‌تونه بخش فیلتراسیون برای شما قابلیت حذف را داشته باشه. رفرنس‌های مربوط هست در مورد این‌که برای هر مصرفی چه مشخصات کیفی مدنظر هست. به‌طور مثال برای برج‌های خنک کننده که سرجمع یک تصفیه پیشرفته خاصی درنظر گرفتند. انتخاب تکنولوژی‌ها هم می‌تونه براساس این باشه که ما چه بخش از مواد آلوده کننده در آب را می‌خواهیم حذف بکنیم. ترکیبی از بخش‌های بیولوژیکی ممبرانی فیلتراسیون و یا اکسیداسیون می‌تونه مدنظر باشه. اما با توجه به این‌که ازن‌زنی یکی از تکنولوژی‌های مناسب در تامین آب مورد نیاز برای مصارف مختلف علی‌الخصوص صنعت هست. ما پایلوت خاصی روی پساب‌های شهری انجام دادیم و با یک رنجی از غلظت به این نتیجه رسیدیم که تا ۶۰-۷۰ درصد COD باقی‌مانده در پساب می‌تونه توسط یک سیستم ازن‌زنی کاهش پیدا بکنه. همین‌طور سیستم‌های ممبرانی که من از این‌ها می‌گذرم که روی نمونه‌ها توضیح بدهیم. ما روی بخش استفاده مجدد در صنعت چه تامینش از پساب‌های شهری و چه از پساب‌های صنعتی. برای فضای سبز و صنعت من چند مدل کارهای انجام شده را خدمت شما توضیح می‌دهم. مورد اول طرح استحصال آب صنعتی از فاضلاب شهری به‌عنوان یک آب نامتعارف خود پساب خروجی تصفیه‌خانه مطرح نبوده. فاضلاب شهری یک مجموعه‌ای برای ظرفیت ۵۴۰ مترمکعب بر ساعت برای برج خنک‌کننده حرارتی در اصفهان کار شده که یک نیروگاهی هست ۸۴۰ ظرفیت کاری داره. با توجه به محدودیت منابع آبی منجر به این تصمیم که از

فاضلاب خام ما بتوانیم آبی را برای برج خنک‌کننده این نیروگاه تامین کنیم. ملاحظه می‌کنید رنجی از فاضلاب ورودی هست به مجموعه سیستم و این مشخصات کیفی مورد نیاز نیروگاه هست. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید مثلا COD کمتر از ۱۵ یا BOD کمتر از ۵ میلی‌گرم بعدی و هم‌چنین شاخص‌های شیمیایی دیگری که در مجموع تصفیه مقدماتی ثانویه و ثالثه برای این پروژه درنظر گرفته‌شده است. این روند هست و در نهایت این هم کیفیت پساب خروجی هست پروسه‌ای که برایش درنظر گرفته ترکیبی از سیستم‌های بیولوژیکی CSBR که پیوسته است، هست ترکیبش با بخش شیمیایی برای حذف بیشتر جامدات. هم‌چنین اکسیداسیون با ازن و فیلتراسیون ثقلی تند در نهایت تصفیه ثانویه مجدد با سیستم ازن‌زنی و تا حدی حذف سختی و ورود به سیستم برج خنک‌کننده نیروگاه. این واحدهای مختلفی هست که برای این پروژه درنظر گرفته‌شده. واحدهای فیزیکی اولیه و واحدهای تصفیه ثانویه ما هست که تقریبا خروجی زیر ۲۵ را می‌دهد. یعنی نزدیک به تصفیه ثانویه ذکر شده در مراجع است. برای افزایش راندمان از سیستم‌های شیمیایی ما بد استفاده شده و این همراه شده با فیلتریشن و ازن‌زنی که مجموعه سیستم‌های فیلتراسیون و ازن‌زنی آن در کار هست و ما یک خروجی را با کیفیت مناسب ارائه می‌کنیم. این از بخش شیمیایی ما هست و این هم از فیلتراسیون تندی که برای فرآیند تکمیلی هست برای جامدات و کاهش COD از آن بهره برده شده و همراه شده با این آنالیزی که در یک سال و نیم گذشته ما از مجموعه پارامترها از COD، TSS، آمونیاک اخذ کردیم. تمام شاخص‌ها را با کمتر از استاندارد هم به ما تحویل می‌دهد این پساب خروجی. به‌طور نمونه به‌طور متوسط COD کمتر از ۱۵ میلی‌گرم در لیتر را در خروجی این تصفیه‌خانه داریم. نمودارهای مربوطه هست که راندمان‌ها برای بخشی به‌طور مجزا و بخش تصفیه BOGT، شیمیایی و ازن‌زنی تا رسیدن به کیفیت مدنظر همچنین به تفکیک در این جدول آورده شده. به‌طور نمونه بین ۷ و ۱۵ برای بخش COD هست. کلیه آلاینده‌های فلزات سنگین در رنج استاندارد قرارگرفته و یک سال و نیم هست در مجموعه بخش نیروگاه. ما چند نمونه پساب شهری داریم که این برای تامین آب مصرفی مورد استفاده قرارگرفته که ترکیبی از سیستم‌های شناورسازی و ازن‌زنی است. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید به‌نوعی کیفیت مدنظر را برای ما محقق کردند. این‌هم مشخصات ظاهری پساب هست که با ترکیبی از سیستم ازن‌زنی و شیمیایی به این کیفیت رسیدیم برای صنعت دارد استفاده می‌شود. مورد دیگر هم قالب MBR داشته که در مجموع سیستم تصفیه با استفاده مجدد همراه شده. بخش MBR هست که این را هم به‌عنوان یک پروژه ۱۵۰ مترمکعب بر ساعت طراحی و اجرا شده. سیستم‌های ممبرانی خروجی پسابی را با کیفیت بالا برای استفاده در صنعت در این‌ها ممبران‌هایی هست که مخزن قرار داده و کیفیت خروجی را برای ما تامین می‌کنه در شهرک صنعتی در شرق تهران که این ترکیبی از مجموعه MBR سیستم‌های ازن‌زنی، فیلتراسیون، کربن فعال در مجموع برای ما توانسته پسابی را با قابلیت استفاده در صنعت تامین بکند. پروژه‌های دیگری هم کار شده که من می‌گذرم.

فقط چند موضوع هست که خیلی کلی ارایه می‌کنم. موضوعاتی که فکر می‌کنم در این چند وقت باهاش روبرو بودیم بحث قیمت آب هست در بخش‌های مختلف حالا چه صنعت و غیرصنعت. ارزیابی ریسک این موضوع پیش روی هست. مصرف کننده‌های نهایی هست که به‌نظرم روی موفق بودن این توانسته موثر باشه و سرمایه‌گذاری در بخش ارتقای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب موجود. همان‌جور که فرمودند فرایند تصفیه‌خانه‌ها در تصفیه ثانویه خودشونبا مشکل همراه هستند و این بخش نباید انتقال پیدا کند که تصفیه تکمیلی و بخشی که برای بازیافت آب هست نگاه به آینده است با تمرکز بر طراحی با قابلیت استفاده مجدد نه طراحی برای این‌که تصفیه فاضلاب را انجام بدهیم. عموما اگر فاضلاب‌ها در همان بخش ثانویه با قابلیت‌تر طراحی بشود و صرفه‌جویی انرژی را هم داشته باشه با توجه به ریسک‌هایی که هست، نوع پیمان‌هایی که می‌خواهد مطرح باشد دسترسی به تکنولوژی‌های مناسب و بومی‌سازی در راستای کاهش مصرف انرژی و استفاده مجدد از انرژی تولیدی به‌خصوص در بخش نمک‌زدایی. موضوع دیگری که هست مشکلات محیط‌زیستی ناشی از زائدات تولید آب بازیافتی. به‌هر ترتیب آن بخش‌هایی که در مرکز قرار دارند اگر به‌سمت نمک‌زدایی هم بروند کاهش زهاب‌ها و تصمیم‌گیری و مدیریت زهاب‌ها می‌تواند به‌عنوان یک موضوعات پیش روی این کار باشه. هم‌چنین نیاز به پروتکل‌های مربوط به نمونه‌برداری کیفیت در جهت اطمینان هم رسیدن به اهداف.

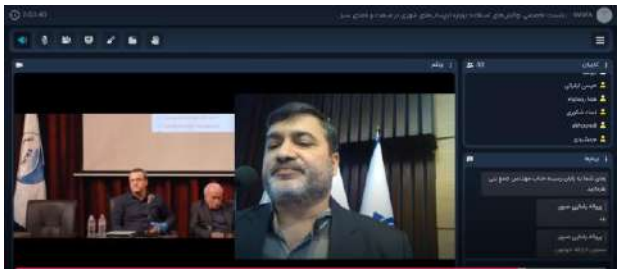
آقای دکتر جهانی:

بسم الله الرحمن الرحیم عرض ادب و احترام دارم خدمت حضار محترم بزرگوار و دانشجویان گرامی و از بانیان برگزاری نشست. من چون از حوزه معاونت آب و آبفای وزارت نیرو خدمت شما

هستم و سعی می‌کنم خلاصه‌ای از وضعیت بحث مدیریت پساب در کشور را خدمت حضار گرامی عرض بکنم. مستحضر هستید که دوستان هر کدام در بحث محدودیت منابع آب اشاره‌ای گذرا به وضعیت کشور داشتند. در خصوص محدودیت منابع آب فقط این را می‌خواهم خدمتتان عرض کنم کشوری هستیم که یک درصد مساحت ایران بارش بیش از هزار میلی‌متر را تجربه کرده و حدود ۳۰ درصد مساحت کشورمان با بارش کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر هست که یکی از چالش‌های ما هست. سهم آب تجدیدپذیر ما از ۷۰۰۰ لیتر برای هر نفر در سال ۱۳۳۵ رسیده به کمتر از ۱۳۰۰ مترمکعب در سال ۱۴۰۰ یعنی ۷ برابر کاهش داشتیم. این می‌طلبد بحث بازچرخانی خصوصا بازچرخانی چندباره در صنعت در بحث استفاده مجدد از پساب‌ها. اگر بخواهم سیر تاریخی وضعیت مدیریت پساب‌ها را در کشور خدمتتان عرض بکنم ما در ۱۵ سال پیش که بحث مدیریت و برنامه‌ریزی استفاده از پساب‌ها را داشتیم تدوین می‌کردیم حدود ۵۰۰ میلیون مترمکعب در سال ظرفیت تصفیه‌خانه های ما بود. حدود ۲۴۰ تصفیه‌خانه شهری در کل کشور با ظرفیت دو میلیارد و هفتصد میلیون مترمکعب در سال و ظرفیت بهره‌برداری حدود ۱/۵ میلیارد مترمکعب از پساب. در ۱۵ سال پیش بالاخره کشور به‌سمتی داشت می‌رفت که ما با افت سطح آب زیرزمینی مواجه شدیم. این موضوع منجر به این شد که از حدود ۲۰ سال پیش تا امروز که خدمتتان هستیم ما بتوانیم از پساب برای بحث تعادل‌بخشی آبخوان استفاده کنیم. در بحث تغذیه مصنوعی و بحث جایگزینی با مصارف کشاورزی. منتها در ادامه راه دیدیم که با چالش‌های بسیار متعددی مواجه هستیم. خصوصا بحث بخش کشاورزی و ۹۰ درصد مصرفمان کشاورزی هست. دیدیم که زور ما در بحث استفاده از پساب در بحث جایگزینی به مصارف کشاورزی نمی‌رسد و اگر اتفاق بیفتد درصد جبران که خواهد کرد بسیار متفاوت خواهد بود. امروز که خدمتتان هستیم سیاستگذاران در بحث برنامه‌ریزی منابع آب رفتیم به سمت جایگزینی. چون یکی از چالش‌های ما در کشور بحث دغدغه‌هایی که موجود هست، بحث تامین آب شرب کشور هست. چون مستحضر هستید که امروزه با تنش‌های بسیار زیادی مواجه هستیم در تامین آب. در برخی از شهرها از جمله قم که خدمتتان هستیم چند صدکیلومتر ما آب را از سرشاخه‌های دز می‌آوریم به شهر. وزارت نیرو حدود ۱۰۰ میلیون مترمکعب در سال تخصیص آب شرب را از همین سرشاخه‌های دز به شهر قم داده و ۴۰ میلیون مترمکعب تخصیص به بخش صنعت استان قم. منتهی امروز طبق آمار خود دوستان شرکت آب و فاضلاب مصرف‌مان از ۱۰۰ میلیون مترمکعب گذشته و چالش‌های ما هم در بحث صنعت هست. صنایع زیادی در همین استان هستند که با چالش کمبود آب مواجه هستند و بحث بازچرخانی آب و پساب که در همین شهر قم که طرح پایدار برای شرب ندارد چه از منابع آب زیرزمینی و چه از منابع آب سطحی که از کیلومترها دورتر آب را منتقل می‌کنیم. در بحث زیرزمینی از چند محدوده مطالعاتی فکر کنم فقط محدوده مطالعاتی کهک آب با کیفیتی دارد. اگر ۶۰-۷۰ میلیون پساب بتوانیم تولید کنیم که امروزه در شهر قم ما ۲۰ میلیون در مدول اول تصفیه‌خانه پساب داریم که به‌زودی به ۴۰ میلیون مترمکعب در سال خواهد رسید که لازم است که در مسئولین استانی بحث برنامه‌ریزی دقیق برای استفاده از پساب در صنعت و فضای سبز داشته باشیم. ما برای شهر قم سال ۱۳۹۵ از ۲۰ میلیون مترمکعب حدود ۵ میلیون مترمکعب در سال تخصیص پساب را برای فضای سبز به شهرداری قم تخصیص دادیم. در آخرین بازدیدی که داشتم متاسفانه هنوز اهدافی که از پساب و فضای سبز شهر قم انتظار می‌رفت محقق نشد و از مسئولین انتظاراست که این موضوع را پیگیر باشند که من فکر می‌کنم در شهر قم با آن ارزش اقتصادی آب که از چند صد کیلومتر که آب را از سرشاخه‌های دز می‌آوریم لزوم پرداختن به بحث بازیافت آب و ارزش اقتصادی پساب و آب باید مد نظرتان باشد. از یک میلیارد و پانصد میلیون مترمکعب در سال پساب‌هایی که تولید میشه حدود ۹۰۰ میلیون مترمکعب در حال‌حاضر برنامه‌ریزی کردیم که به مصارف تخصیص پیدا بکند که ۲۵ میلیون مترمکعب آن در بخش صنعت برنامه‌ریزی شده، ۳۰۷ میلیون در بخش کشاورزی، ۲۲۰ میلیون مترمکعب در سال در فضای سبز، احیای تالاب‌ها و دریاچه‌ها، ۱۶۸ میلیون عمده تخصیصی که به بحث تالاب‌ها اختصاص داده شده است. در حال‌حاضر ۵۰۰ میلیون مترمکعب درسال از یک میلیارد و پانصد میلیون رسیده به بحث مصرف. از این آمار که خدمتتان دادم ۶۵ درصد در قالب طرح‌های جایگزینی تغذیه مصنوعی و تامین حقابه تالاب‌ها است که برنامه‌ریزی شده. افق طرح کشور این است که انشالله با توسعه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کشور اگر بتونیم ظرفیت از یک میلیارد و پانصد میلیون در سال به ۳ میلیارد مترمکعب در سال برسانیم ظرفیت پسابمان، برنامه‌ریزی بحث استفاده از پساب، بحث جایگزینی، افق را ۷۵ درصد دیدیم با توجه به وضعیت کشور.

ما اسناد بالادستی را بحث استفاده از پساب در فضای سبز شهری داریم. مهم‌ترین برنامه‌اش ماده دو قانون هوای پاک است. ماده ۲۲ قانون هوای پاک اشاره دارد که شهرهای با جمعیت بالای ۵۰ هزار نفر موظفند که تامین آب فضای سبزشان را از همین

پساب تامین‌کنند. منتها آن قانون اشاره دارد به بحث الگوی کشت. جا دارد که خصوصا کلان‌شهرها و شهرهای بزرگ به این ماده قانونی توجه بکنند و ظرفیت‌ها را به سمت استفاده از پساب ببرند که شهر قم هم باید سرعت بیشتری ببخشد به این موضوع. آماری که از ۲۲۳ میلیون خدمتتان عرض کردم حدود ۱۴۰ میلیون مترمکعب فقط برای بحث واگذاری در کلانشهر تهران هست. تفاهم‌نامه‌ای که وزارت نیرو در سال ۱۳۹۹ با شهرداری منعقد کرد در ۱۴۱۰ از ۲۵۰ میلیون باید ۱۴۰ میلیون مترمکعب آب را از پساب‌ها در نقاط مختلف شهر تهران تامین بکنند. طبق آخرین آماری که ما از دوستان گرفتیم سرعت این روند و این اقدامات بسیار کند است که باید توجه بشه به بحث فضای سبز.



آقای مهندس نیک‌خواه:

سلام عرض می‌کنم. الان در سطح کشور ۲۳ شهر جدید عمدتا در کنار مراکز با تمرکز بالای جمعیتی احداث شده و در حال بهره‌برداری است. این ۲۳ تا شهر در میزان توسعه با هم بسیار تفاوت دارند. یعنی ما شهری داریم کاملا توسعه یافته مثل شهر اندیشه و شهری داریم در مراحل ابتدائی توسعه مثل شهری نزدیک زابل. در کنار این سه تا شهر حدود ۱۶ تا دردست مطالعه است. یعنی عملا بخش زیادی از کارهای توسعه شهرهای جدید باقی‌مانده و عملا در مرحله انجام شدن در این شهرهای جدید قرار نداریم. حالا بخواهم خلاصه کنم به سراغ چالش‌ها بروم آب خودش بزرگترین چالش توسعه شهرهای جدید هم به‌لحاظ این‌که ما خیلی جاها در کنار مراکز جمعیتی برای کنترل حاشیه‌نشینی شهر یا مهار سرریز جمعیتی شهرهای بزرگ می‌رویم شهرهای جدید را احداث می‌کنیم. شهرهای بزرگ ما الان با چالش آب مواجه هستند. در خیلی از جاهای کشور. نکته این است که خود این چالش در شهرهای جدید بخشی این است که ما در زمینه تقدم و تاخر خدمات‌رسانی به شهرهایمان دچار مشکل هستیم. یعنی گاهی اوقات ما ساختمان‌سازی‌مان انجام شده، متقاضی‌مان آماده رفتن به خانه‌اش است، اما متاسفانه آب را ما نرساندیم به محل مصرف. مورد دیگری در این زمینه وجود دارد که گاهی اوقات نه ساختمان‌ها ساخته شده و حتی آب شرب هم آماده است. اما بنا به دلایلی متقاضی قصد رفتن داخل این خانه را ندارد. فضای سبز برایش ایجاد نکردیم، فضای آموزشی ایجاد نکردیم و این وظیفه دستگاه‌های خدمات‌رسان است. طبق قانون مثلا ما باید زمین در اختیار آموزش و پرورش قرار بدهیم، زمین را در اختیار شرکت‌های آب و فاضلاب قرار بدهیم این شرکت‌ها بیایند برای ما زیرساختها را احداث کنند. ما گاهی اوقات ساخت مسکن را به انتها می‌رسانیم، متقاضی هم آماده رفتن به مسکن است اما ما آب را به شهر نرساندیم و گاهی اوقات چون جمعیت شهر ما هنوز خیلی کمه ما برای تامین آب فضای سبز هم در این شهر کوچک‌مان دچار مشکل هستیم. یعنی یک‌دفعه با یک شهری مواجه‌ایم که ساختمان ساخته‌شده خیلی محدوده، اما میزان فضای سبز رقمش درشت می‌شه. این‌جا علی‌القاعده باید برویم به سمت استفاده از پساب. یک بخشی از این چالش‌ها برمی‌گردد به مقاومتی که مشاورین طراحی یا حتی شرکت‌های خدمات‌رسان ما در مقابل طرح‌های تصفیه محله‌ای دارند. یعنی کماکان اصرار می‌کنند که ما تمام فاضلاب شهر را در یک نقطه تصفیه کنیم و بعد پساب را اگر بخواهیم و در اختیار ما قرار بدهند برگردد شهر استفاده کنیم. این یک جاهایی هزینه‌های سرسام‌آوری دارد. یعنی اگر زمینی پیدا کنیم و تمام تصفیه فاضلاب شهر را در آن زمین انجام بدهیم مجبوریم از شهر فاصله بگیریم. از شهر که فاصله می‌گیریم آن وقت برگرداندن این پساب به شهر و استفاده به لحاظ اقتصادی اصلا خیلی وقت‌ها توجیهی ندارد که نهایتا مثلا برای تغذیه سفره زیرزمینی ازش استفاده می‌شود. یکی از مشکلاتی که ما داریم اینه که تنها شهرهای جدید را بدون تعارف عمدتا برای قشر کم‌برخوردار جامعه احداث می‌کنیم و اگر ما هزینه‌های احداث را بالا ببریم با توجه به این‌که بخشی از هزینه‌ها به‌عهده همین قشر کم‌برخوردار است عملا آن رسالت‌مان را دچار تناقض کردیم. نقض‌غرض این‌جا انجام می‌شه. ما می‌خواهیم مسکن ارزان تولید کنیم و در اختیار مصرف‌کننده قرار بدهیم از طرف دیگر بیاییم مثلا می‌گوییم هزینه بازچرخانی آب هزینه تصفیه پساب را به‌آن اضافه کنیم. یعنی در کشوری که ما صحبت می‌کنیم که چالش آب داریم این‌جا ما خبری از مشوق‌های دولتی در این زمینه نداریم. این دو تا نکته و چالش مهمی بود که بنده عرض کردم. موارد دیگری هم وجود دارد ما در طرح‌های جدیدمان طرح‌های خوبی بابت این بازچرخانی پساب اجرا کردیم. به‌عنوان مثال حالا اشاره کردند شهرهای مشهد و اصفهان جلو هست. در شهرهای جدید هم به‌همین منوال است. ما مثلا در شهر جدید گلبهار یک شبکه کاملا مجهز برای آبیاری فضای سبز داریم که مجزا است از آب شرب. یعنی آن‌جا شبکه آبیاری فضای سبز و آب شرب یکی نیست و شبکه‌اش جداگانه است.

رتبه اول مسابقه پایان‌نامه برتر سال ۱۴۰۲ در مقطع کارشناسی ارشد (بخش شبکه آب و فاضلاب)
(برگزار شده توسط انجمن آب و فاضلاب ایران)

دانشکدگان فنی، دانشکده مهندسی عمران

عنوان: ارزیابی اثرات مدیریت تقاضا بر سامانه‌های فاضلاب

نگارش: هانیه صفرپور

استاد راهنما: دکتر مسعود تابش

تاریخ: مردادماه ۱۳۹۹

چکیده

اعمال سیاست‌های مدیریت مصرف که راه‌حلی برای مقابله با کمبود آب شناخته می‌شود، بر بخش‌های مختلف چرخه آب شهری مانند سامانه‌های فاضلاب اثر می‌گذارد. سامانه‌های فاضلاب یکی از ضروری‌ترین تاسیسات مورد نیاز جوامع بشری هستند که نقش مهمی در سلامت و بهداشت جامعه دارند. براساس مطالعات پیشین، عموما تحقیقات، بخش آبرسانی شهری را به‌عنوان محل اثر اتخاذ سیاست‌های مدیریت مصرف آب درنظر گرفته‌اند و سامانه‌های فاضلاب در تحقیقات کمی وارد شده است.

علاوه‌بر این، در این زمینه خلاء تحقیقاتی بزرگی از لحاظ مدیریت و ارزیابی یکپارچه نتایج حاصل از اعمال سیاست‌های مدیریت مصرف وجود دارد. یکی از مهم‌ترین اهداف این تحقیق ارزیابی اهمیت درنظر گرفتن تاثیرات جامع هر تصمیم و عدم غفلت از بخش یا بخش‌هایی از اثرات است. در این تحقیق، ارزیابی یکپارچه‌ای در همه جنبه‌های فنی، اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی در ارتباط با سامانه فاضلاب در شهر بهارستان (واقع در استان اصفهان) انجام شده است. بهارستان، شهری تازه تاسیس است که به‌دلیل کمبود آب، مدیریت فشار و فرهنگ‌سازی در آن اعمال شده است. در این راستا پنج سناریو، سناریوی پایه بدون تغییر در میزان فاضلاب تولیدی و سناریوی آخر با افزایش حداکثری درصد کاهش، درنظر گرفته شده‌اند و ارزیابی‌های مختلف نام‌برده بر روی آن‌ها اعمال شده است.

یکی از این ارزیابی‌ها، ارزیابی هیدرولیکی است که با استفاده از نرم‌افزار SewerGems انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که سرعت انتقال فاضلاب با کاهش ۶۸ درصدی دبی فاضلاب حدود ۱۲٪ نسبت به حالت پایه (بدون کاهش دبی) کاهش می‌یابد. هم‌چنین درصد پرشدگی لوله که از مهم‌ترین پارامترهای فنی-هیدرولیکی در شبکه فاضلاب است نیز کاهش یافته است. با استفاده از نتایج حاصله از جمله دبی هر لوله، میزان گازهای خروجی از شبکه شامل متان و هیدروژن سولفید، محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد میزان گازهای خروجی با کاهش میزان فاضلاب تولیدی افزایش می‌یابد، زیرا از طرفی غلظت مواد آلاینده آن تغییر می‌کند و از سویی دیگر زمان ماند فاضلاب در لوله‌ها افزایش می‌یابد.

با به‌کارگیری مفهوم تفکر چرخه حیات، سایر ارزیابی‌های مدنظر در این تحقیق شامل ارزیابی محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی انجام شده است. ارزیابی چرخه حیات محیط‌زیستی (LCA)[1] با کمک نرم‌افزار SimaPro به دو صورت گروه اثرات میانی و پایانی با روش ReCipe انجام شده و مقایسه‌ای نیز بین فازهای مختلف شبکه فاضلاب، تصفیه‌خانه و سناریوها انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که سناریویی با بیشترین کاهش در

[1] Life Cycle Assessment

تولید فاضلاب، دارای اثرات محیط‌زیستی بر روی سلامت انسان به‌میزان ۱/۴۸ Mpt در مقابل ۱/۸۱ Mpt در شرایط پایه است و این نتیجه اثرات مثبت کاهش فاضلاب تولیدی بر روی اثرات محیط‌زیستی را تایید می‌کند. ارزیابی اقتصادی که به‌روش LCC[۲] و با درنظر گرفتن تمامی هزینه‌ها و درآمدهای مربوطه انجام شده است نشان می‌دهد که کاهش درصد زیادی از فاضلاب تولیدی هزینه‌ها را افزایش و درآمد را کاهش می‌دهد.

درنظر گرفتن اثرات اجتماعی اعمال سیاست‌های مدیریت مصرف بر سامانه فاضلاب راهی به سوی جوامع و تصمیمات پایدار است. ارزیابی اثرات اجتماعی با تفکر چرخه حیات و به‌روش SLCA[۳] انجام می‌شود. سه گروه اثر کارگران و کارمندان (نیروی انسانی)، جامعه و جوامع محلی و مصرف‌کنندگان پساب و لجن درنظر گرفته می‌شوند. با مصاحبه و پر کردن پرسشنامه به روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)[۴] وزن زیرشاخص‌های هر گروه محاسبه شده و با توجه به شدت اثر هر یک از زیرشاخص‌ها، امتیاز هر سناریو محاسبه می‌شود. بهترین سناریو از این لحاظ، سناریوی پایه بوده که کمترین تغییرات از حالت پیش‌بینی شده را دارد.

در نهایت برای کمک به تصمیم‌گیران و جمع‌بندی نتایج مطرح شده در هر بخش از این بررسی همه‌جانبه و یکپارچه از روش ارزیابی پایداری چرخه حیات (LCSA)[۵] استفاده شده است. نتایج ارزیابی پایداری نشان می‌دهد که مجموع نمره پایداری سناریوی پایه (۰/۸۳) بیشتر از سایر سناریوها است و کمترین نمره پایداری مربوط به سناریوی چهار (بیشترین کاهش درصد فاضلاب تولیدی) با نمره پایداری ۰/۶۳ است.

کلمات کلیدی: مدیریت مصرف آب، سامانه‌های فاضلاب، ارزیابی محیط‌زیستی چرخه حیات (LCA)، ارزیابی اقتصادی چرخه عمر (LCC)، ارزیابی اجتماعی چرخه حیات (SLCA)، ارزیابی پایداری چرخه حیات (LCSA).

[2] Life Cycle Cost
[3] Social Life Cycle Assessment
[4] Analytical Hierarchy Process
[5] Life Cycle Sustainability Assessment

رتبه دوم مسابقه پایان‌نامه برتر سال ۱۴۰۲ در مقطع کارشناسی ارشد (بخش شبکه آب و فاضلاب)
(برگزار شده توسط انجمن آب و فاضلاب ایران)

دانشکده عمران و حمل و نقل
گروه مهندسی عمران

عنوان: تحلیل هیدرولیکی شبکه آبرسانی به‌منظور مکان‌یابی بهینه نصب دستگاه‌های پایش‌کیفیت آب

نگارش: محمدرضا نجارزادگان
استاد راهنما: دکتر رامتین معینی

تاریخ: شهریورماه ۱۴۰۱

چکیده

در حالت کلی شبکه‌های آبرسانی به‌منظور ارائه آب به مصرف‌کنندگان مختلف با کیفیت استاندارد و کمیت مناسب طراحی می‌شوند. لیکن مجموعه وسیعی از تهدیدها می‌تواند باعث کاهش امنیت شبکه آب و نارضایتی و حتی باعث آسیب‌رساندن به مصرف‌کنندگان شود. از جمله شبکه‌های توزیع آب شرب مستعد انتشار آلودگی‌هایی با منشاهای مختلف اعم از آلودگی عمدی یا غیرعمدی (ناشی از شکست لوله) هستند که موجب به‌خطر افتادن سلامت مصرف‌کنندگان و محیط‌زیست، قطعی آب و شیوع بیماری‌ها می‌شود. بدین منظور لازم است که ابتدا وجود آلودگی تشخیص داده شود. به‌عبارت دیگر باید، انواع آلودگی‌های احتمالی منتشرشده در شبکه توزیع آب، بررسی و پایش شود تا علاوه‌بر جلوگیری از عواقب انتشار آلودگی، از هزینه‌های ناشی از تصفیه‌های مکمل آب جلوگیری شود. علاوه‌براین، با تعیین محل ورود آلودگی، از ادامه انتشار آن جلوگیری شود. ازجمله روش‌های پایش‌کیفی شبکه‌های توزیع آب و کنترل و اطلاع‌رسانی سریع ورود آلاینده‌های مختلف می‌توان به استفاده از حسگرهای تشخیص آلودگی‌ها اشاره نمود. در این راستا لازم است که جانمایی بهینه حسگرهای تشخیص آلودگی تعیین شود. در این تحقیق، حداقل تعداد حسگرهای کیفی، به‌منظور افزایش میزان پوشش و کاهش میزان مصرف آب آلوده در شبکه توزیع آب در الگوهای مصرف مختلف تعیین می‌شود. بدین منظور، از ارتباط مدل شبیه‌ساز و تحلیل کمی و کیفی EPANET و الگوریتم بهینه‌سازی سنجاقک (DA[1]) استفاده می‌شود. به‌عنوان مطالعه موردی، شبکه لی و دینینگر در حالت استفاده از یک حسگر و حداقل دو حسگر در الگوهای مصرف متفاوت و شبکه‌های نمونه دوم و سوم نرم‌افزار EPANET با استفاده از یک حسگر و حداقل دو حسگر در الگوی مصرف بیست و چهار ساعته، انتخاب و عملکرد روش پیشنهادی بررسی می‌شود. بررسی نتایج نشان‌دهنده آن است که میزان پوشش شبکه لی و دینینگر، در حالت یک حسگر در یک الگوی مصرف مقدار ۷۰ درصد و در حالت دو الگوی مصرف مقدار ۵۰ درصد و در حالت استفاده از حداقل دو حسگر، مقدار ۱۰۰ درصد است. هم‌چنین در حالت استفاده از یک حسگر و حداقل دو حسگر در شبکه دوم EPANET میزان درصد پوشش به‌ترتیب مقادیر ۳۱ درصد و ۶۳ درصد است. هم‌چنین، در حالت استفاده از یک حسگر و حداقل دو حسگر در الگوی مصرف بیست و چهار ساعته برای شبکه سوم EPANET، مقادیر میزان پوشش به‌ترتیب ۱۸ درصد و ۲۶ درصد است. لیکن در شبکه لی و دینینگر، مقادیر میزان آب آلوده مصرفی در حالت یک حسگر و برای یک الگوی مصرف ۲۷۵ واحد و با کاهش ۲۷/۶۳٪ حجم آب آلوده مصرف شده در حالت بدون حسگر، درحالت یک حسگر در دو الگوی مصرف مقدار ۲۷۰ واحد و با کاهش ۳۱/۶۴٪ حجم آب آلوده مصرف شده در حالت بدون

[1] Dragonfly Algorithm

حسگر، در حالت دو حسگر و برای یک الگوی مصرف ۱۰۰ واحد و کاهش ۷۳/۶۸٪ حجم آب آلوده مصرف شده در حالت بدون حسگر و برای دو حسگر در دو الگوی مصرف مقدار ۹۲/۵ واحد و با کاهش ۷۶/۵۸٪ حجم آب آلوده مصرف شده در حالت بدون حسگر، است. هم‌چنین، میزان آب آلوده مصرفی در شبکه دوم نرم‌افزار EPANET، در حالت استفاده از یک حسگر و برای الگوی مصرف بیست و چهار ساعته، مقدار ۲۰۵۷۵/۱ مترمکعب و با کاهش ۵۳/۲۵٪حجم آب آلوده مصرف شده در حالت بدون حسگر و در حالت دو حسگر مقدار ۶۱۰۹/۸۹ مترمکعب و با کاهش ۷۵/۱۱٪ حجم آب آلوده مصرف شده در حالت بدون حسگر و درنهایت، برای شبکه سوم EPANET میزان آب‌آلوده مصرفی در حالت استفاده از یک حسگر برای الگوی مصرف بیست و چهار ساعته، مقدار ۳۶۴۰۸۶/۲۱۵ مترمکعب و با کاهش ۴/۶۱٪ حجم آب آلوده مصرف شده در حالت بدون حسگر و در حالت دو حسگر مقدار ۳۵۹۱۴۹/۷۱۴ مترمکعب و با کاهش ۵/۹۱٪ حجم آب آلوده مصرف شده در حالت بدون حسگر است.

کلیدواژه‌ها: شبکه آبرسانی، پایش‌کیفی، منبع‌آلودگی، مکان‌یابی حسگرها، الگوریتم سنجاقک.

رتبه سوم مسابقه پایان‌نامه برتر سال ۱۴۰۲ در مقطع کارشناسی ارشد (بخش شبکه آب و فاضلاب)
(برگزار شده توسط انجمن آب و فاضلاب ایران)

دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست

عنوان: بهینه‌سازی هم‌زمان فشار خروجی شیرهای فشارشکن در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی

نگارش: نیوشا هدایتی مرزونی
استاد راهنما: دکتر محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده

تاریخ: اسفندماه ۱۳۹۹

چکیده

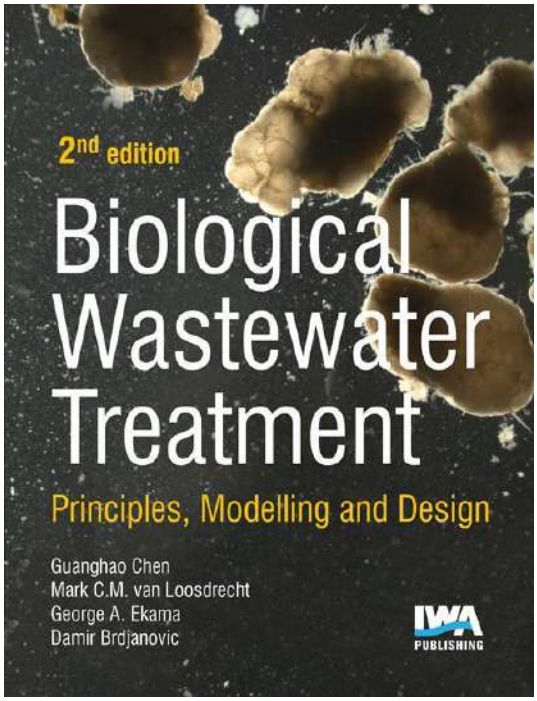
با توجه به اهمیت آبرسانی در شرایط مطلوب و استاندارد، بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب، با به‌کارگیری استراتژی‌های مدیریت مؤثر فشار همراه شده است. در این پایان‌نامه، مبانی مدل‌های هوشمند مدیریت فشار با کاربرد مجزا و ترکیبی شیرهای فشارشکن و بر پایه سه مدول مبتنی بر زمان، دبی و گره بحرانی بررسی شده است. هم‌چنین استفاده هم‌زمان از ترکیب شیرهای فشارشکن با دیگر تجهیزات مانند پمپ‌های دور متغیر و شیرهای تنظیمی در شبکه‌های توزیع آب مورد ارزیابی قرارگرفته است. در این مطالعه، بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در ترکیب با مدل شبیه‌ساز و هم‌چنین با هدف کمینه‌سازی نوسانات زمانی و مکانی مقادیر فشار در گره‌های شبکه، انجام شده است. برای ارزیابی نیز، هر کدام از ایده‌های پیشنهادی، در شبکه نمونه (شبکه حلقوی دارای سه شیر کنترل فشار) و هم‌چنین یک شبکه واقعی در شهر مشهد (پهنه I-1) شبیه‌سازی شد. شاخص‌های عملکردی هیدرولیک شبکه از جمله شاخص نوسانات فشار گره‌ای (میانگین انحراف فشارهای گره‌ای از فشار مطلوب در طول شبانه‌روز) و درصد پوشش فشار مطلوب (نسبت تعداد گره‌های دارای فشار در بازه مطلوب به تعداد کل گره‌های شبکه) در این پایان‌نامه، معرفی و مقادیر این شاخص‌ها برای سناریوهای مختلف و در هر دو شبکه مورد مطالعه، محاسبه شد. در شبکه نمونه، تکنیک استفاده ترکیبی از شیرهای فشارشکن و پمپ دور متغیر با تأمین کاهش شاخص نوسانات و رشد درصد پوشش به‌ترتیب برابر ۷۵ و ۱۰ درصد، به‌عنوان مؤثرترین رویکرد در میان مجموعه روش‌های مبتنی بر زمان معرفی شد. استفاده هم‌زمان از شیرهای فشارشکن و پمپ دور متغیر در شبکه واقعی نیز با تأمین کاهش ۳۶ درصدی برای شاخص نوسانات به عنوان بهترین گزینه ارزیابی شده که در این حالت، پارامترهای رشد درصد پوشش (۱۰ درصد) و کاهش نشت (۷ درصد) نیز در بیشینه‌ترین مقدار به‌دست آمد. رویکرد مبتنی بر پایش گره‌های بحرانی نیز با درنظر گرفتن مقادیر مختلف سرعت حرکت زبانه شیر فشارشکن مورد تحقیق قرار گرفت؛ زیرا این پارامتر یک عامل مؤثر در سرعت واکنش شیر فشارشکن به تغییر فشار در گره بحرانی است. در این حالت، عملکرد رویکرد کنترل برخط فشار با سرعت‌های زبانه مختلف بررسی شد که بهترین گزینه، سرعت زبانه معادل ۰/۹ میلی‌متر بر ثانیه بوده و مقادیر شاخص‌های مرتبط با درصد کاهش حداکثر انحراف فشار گره‌ای و میانگین نوسانات فشار در گره‌های بحرانی متناظر با آن نیز به‌ترتیب برابر با ۵ و ۷۳ درصد در شبکه نمونه و ۳۱ و ۸۷ درصد در شبکه واقعی به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: مدیریت فشار، شیر فشارشکن مبتنی بر زمان، شیر فشارشکن مبتنی بر جریان، کنترل برخط فشار، پمپ دور متغیر، شیر تنظیم جریان، مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز، الگوریتم ژنتیک.

عنوان: تصفیه بیولوژیکی فاضلاب: اصول، مدل‌سازی و طراحی

ناشر: انجمن بین‌المللی آب (IWA)

زمان انتشار: سال ۲۰۲۳



کتاب‌های کلاسیک محدودی در خصوص تصفیه فاضلاب وجود دارند که یکی از آن‌ها را می‌توان اثر حاضر برشمرد. کتاب حاضر در خصوص اساسی‌ترین و مهم‌ترین جنبه‌های تصفیه بیولوژیکی فاضلاب است که نشان‌دهنده تعادل دقیق بین موارد تئوری و عملی است. هر فصل از این کتاب، به موضوع خاصی اشاره دارد؛ ولی کل کتاب به‌صورت یکپارچه تهیه شده است. هر فصل از این کتاب توسط متخصصان مشهور جهان در زمینه مربوطه تألیف شده و این یکی از ویژگی‌های بارز کتاب مذکور است. ویرایش قبلی این کتاب، به‌عنوان یک مرجع توسط پژوهشگران و علاقمندان مختلفی از سراسر جهان مورد استفاده قرارگرفت. در سال‌های اخیر، با رشد پیوسته الزامات تصفیه، افزایش آلاینده‌های نوظهور و نیاز فوری به خنثی‌سازی ردپای کربن و کاهش انتشار مواد کربنی، علم و فناوری‌های موجود در زمینه آب، به‌سرعت توسعه یافته است. ویرایش حاضر کتاب مذکور با مشارکت متخصصان مختلفی از سراسر جهان (با سابقه بیشتر از ۱۰ سال) ویرایش و بازبینی شده و می‌تواند به این نیاز پاسخ دهد.

فهرست مطالب این کتاب به قرار زیر است:

۱) توسعه تصفیه فاضلاب؛ ۲) متابولیسم و میکروبیولوژی پایه؛ ۳) ویژگی‌های فاضلاب؛ ۴) حذف مواد آلی؛ ۵) حذف نیتروژن؛ ۶) حذف بیولوژیکی اصلاح‌شده فسفر؛ ۷) تصفیه نوآورانه فاضلاب مبتنی بر گوگرد؛ ۸) گندزدایی فاضلاب؛ ۹) هوادهی و اختلاط؛ ۱۰) حجیم‌شدن لجن؛ ۱۱) لجن دانه‌ای هوازی؛ ۱۲) تصفیه نهایی؛ ۱۳) بیورآکتورهای غشایی؛ ۱۴) مدل‌سازی فرآیندهای لجن فعال؛ ۱۵) کنترل فرآیند؛ ۱۶) تصفیه بی‌هوازی فاضلاب؛ ۱۷) مدل‌سازی بیوفیلم و ۱۸) رآکتورهای بیوفیلم.

این کتاب به‌صورت رایگان از لینک زیر قابل دریافت است:

https://iwaponline.com/ebooks/book/791/Biological-Wastewater-TreatmentPrinciples

دومین همایش ملی مدیریت کیفیت آب
و
چهارمین همایش ملی مدیریت مصرف آب
با رویکرد کاهش هدررفت و بازیافت
۷ تا ۹ آذرماه ۱۴۰۲

دومین همایش ملی مدیریت کیفیت آب و چهارمین همایش ملی مدیریت مصرف آب با رویکرد کاهش هدررفت و بازیافت در تاریخ ۷ تا ۹ آذرماه ۱۴۰۲ از سوی انجمن آب و فاضلاب ایران و با همکاری دانشکده مهندسی عمران دانشکدگان فنی دانشگاه تهران به صورت حضوری و مجازی برگزار شد. آن‌چه در پیش رو دارید خلاصه‌ای از روند برگزاری و برنامه‌های اجرا شده در همایش است.

شورای سیاست‌گذاری همایش:

در اولین گام برنامه‌ریزی همایش، شورای سیاست‌گذاری همایش تعیین شدند. اعضای شورا عبارت بودند از:

- دکتر مسعود تابش « دبیر همایش و رئیس شورای سیاست‌گذاری»
- دکتر سارا نظیف «دبیر کمیته علمی»
- دکتر زهرا اکبری «دبیر کمیته اجرایی»

تشکیل دبیرخانه و تهیه و ارسال ارسال فراخوان:

پس از انجام صحبت‌های مقدماتی، در بهمن‌ماه ۱۴۰۱ تفاهم‌نامه همکاری بین انجمن آب و فاضلاب ایران و دانشکده مهندسی عمران دانشکدگان فنی دانشگاه تهران به امضا رسید. در همین راستا ساختار سازمانی نهایی همایش مشخص و شورای سیاست‌گذاری در اواخر بهمن‌ماه تشکیل شد و طی ۱۱ جلسه تا ۶ آذرماه نسبت به برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری‌های لازم اقدام کرد. هم‌چنین دبیرخانه همایش در محل دفتر انجمن آب و فاضلاب شروع به‌کار کرد.

پس از آماده‌سازی‌های اولیه، از وب‌سایت همایش به نشانی www.iwwa-conf.ir رونمایی شده و اطلاعات مربوط به همایش به‌صورت روزانه از طریق وب‌سایت، به اطلاع مخاطبان علاقه‌مند رسید. اطلاعات سایت به‌طور روزانه به‌روزرسانی می‌شد، که این امر تا روز همایش نیز ادامه یافت. در حوزه اطلاع‌رسانی و تبلیغات، پس از طراحی و نهایی شدن پوستر همایش، اطلاع‌رسانی به‌تمامی معاونین پژوهشی دانشگاه‌ها و مراکز آموزشی و پژوهشی کشور، تمامی شرکت‌های آبفای استان‌ها و شهرستان‌ها و سازمان‌های آب منطقه‌ای استان‌ها، ادارات کل محیط‌زیست استان‌ها، وزارتخانه‌های نیرو، راه و شهرسازی، کشور، بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، علوم تحقیقات و فناوری، و صنعت، معدن، تجارت و مهندسین مشاور و پیمانکاران کشور در زمینه‌های آب و فاضلاب از طریق ایمیل، دورنگار و سامانه یکپارچه اطلاع‌رسانی وزارت علوم صورت پذیرفت. هم‌چنین اطلاعات مربوط به همایش از طریق حدود ۱۰۰۰۰ ایمیل و پیامک در چندین نوبت ارسال شد. در این مرحله برای استفاده حداکثری از فضای مجازی، معرفی همایش اطلاعات مربوط به همایش در سایت‌های Civilica، Symposia، callforpapers.ir، conferenceyab.ir و ISC قرارداده شد. کانال و گروه تلگرامی و واتساپی همایش نیز با عضویت صدها نفر تشکیل و هم‌چنین از تمام شبکه‌های اجتماعی انجمن آب و فاضلاب ایران نیز استفاده شد.

محورهای همایش:

با توجه به رسالت همایش و اهداف آن، تلاش شد تا محورها به نحوی تبیین شوند که حوزه‌های مختلف دانش و فناوری مرتبط با کیفیت آب، مدیریت مصرف آب، کاهش هدررفت و توسعه بازیافت آب را با توجه به نیازها و چالش‌های موجود در کشور پوشش دهند. برای حصول این منظور ۴ محور در حوزه مدیریت مصرف، ۵ محور در حوزه کاهش هدررفت، ۹ محور در حوزه بازیافت آب و ۹ محور در حوزه مدیریت کیفیت آب و در مجموع ۲۷ محور برای همایش تعریف شدند.

الف) مدیریت مصرف آب

۱- روش‌های مهندسی (کاهنده‌های مصرف، بازچرخانی آب، آب خاکستری، جداسازی آب شرب از آب بهداشتی و ...)

۲- دیدگاه‌های فرهنگی (آموزش، آگاهی رسانی، مشارکت بخش خصوصی، نقش زنان و ...)

۳- دیدگاه‌های اقتصادی (اقتصاد آب، قیمت گذاری، مدیریت تعرفه و...)

۴- الزامات قانونی و مدیریتی (مباحث نظام مهندسی، جریمه و تشویق، قراردادها و برون سپاری، حاشیه نشینی، مدیریت مصرف در شرایط بحرانی، آسیب شناسی و ...)

ب) هدررفت

۱- هدررفت واقعی در شبکه های توزیع آب

۱-۱- مدیریت نشت (روش‌های جدید نشت‌یابی، اقتصاد نشت، مدیریت فشار، استقرار DMA، قراردادهای نشت‌یابی، تامین مالی، برون‌سپاری و ...)

۱-۲- مدیریت حوادث و اتفاقات (رفع حوادث، قراردادها و ...)

۱-۳- بازسازی، تعویض و تعمیر شبکه‌ها

۱-۴- سرریز مخازن

۱-۵- تجهیزات و شیرآلات جدید

۲- هدررفت ظاهری در شبکه‌های توزیع آب

۲-۱- کنتور و دبی سنج‌ها، قرائت کنتورها، خطاهای اندازه‌گیری، مدیریتی و بهره‌برداری

۲-۲- اتصالات غیرمجاز (روش‌های شناسایی، راه‌کارهای فرهنگی، راه‌کارهای قانونی، قراردادها و برون‌سپاری ...)

۳- مصارف مجاز بدون درآمد

۳-۱- مصارف آب در تاسیسات و تصفیه‌خانه‌ها

۳-۲- شستشوی شبکه و مخازن

۴- مدیریت هوشمند شبکه‌های توزیع آب

۴-۱- تله‌متری و اسکادا

۴-۲- مدل‌سازی و نرم‌افزارها

۴-۳- کاربرد GIS

۴-۴- مدیریت انرژی

۴-۵- مدیریت کیفیت

۵- کاهش مصرف و ارتقای بهره‌وری آب در بخش صنعت

۵-۱- به‌کارگیری فناوری پینچ آبی به‌منظور کاهش مصرف آب در صنایع

۵-۲- بهینه‌سازی شبکه آب و فاضلاب در صنایع

۵-۳- سنتز شبکه آب و فاضلاب صنایع (Water Network Synthesis)

۵-۴- نقش سیستم‌های کنترلی و ابزار دقیق در کاهش مصرف آب و پیشگیری از هدررفت در صنایع

ج) <u>بازیافت</u>

۱- پیوند آب-انرژی در بازیافت پساب

۱-۱- تحلیل چرخه عمر سیستم‌های بازیافت پساب

۱-۲- راه‌کارهای تولید انرژی در فرآیند بازیافت پساب

۱-۳- توسعه روش‌های با حداقل مصرف انرژی به‌منظور بازیافت پساب

۱-۴- الزامات پیاده سازی رویکرد کاهش، بازاستفاده و بازیافت (3R: Reduce, Reuse, Recovery) در صنایع

۲– فناوری‌های ساده و ارزان‌قیمت بازیافت پساب

۲-۱- توسعه فناوری‌های ساده بازیافت پساب در مناطق روستایی و جوامع کوچک

۲-۲- بومی‌سازی فرآیندهای ساده و ارزان‌قیمت بازیافت پساب

۳- پایش کمی و کیفی پساب بازیافتی

۳-۱- ابزارهای اندازه‌گیری جریان پساب

۳-۲- شاخص‌های کیفی در ارزیابی بازیافت پساب

۳-۳- دستورالعمل پایش کیفیت در بازیافت پساب

۳-۴- آیین‌نامه‌های پایش کمی و کیفی بازیافت پساب

۴- استفاده ایمن از پساب و کاهش ریسک آن

۴-۱- مخاطرات ناشی از استفاده از پساب

۴-۲- نقش آموزش و فرهنگ‌سازی در استفاده ایمن از پساب

۴-۳- تحلیل ریسک استفاده از پساب در مصارف مختلف و اولویت‌بندی گزینه‌های مصرف

۴-۴- روش‌های مدیریت ریسک استفاده از پساب

۵- مدیریت فاضلاب و پسماند حاصل از فرایندهای بازیافت

۵-۱- بازیافت پسماندهای جامد با ارزش

۵-۲- مصرف پسماند بازیافت به‌عنوان سوخت و ماده پرکننده

۵-۳- روش‌های تولید انرژی از فرآیند بازیافت پساب

۵-۴- روش‌های مدیریت فاضلاب تولیدی در فرآیند بازیافت پساب

۵-۵- راه‌کارهای دستیابی به حداقل پساب در فرایندهای تصفیه (Zero Liquid Discharge)

۶- مدیریت و بازیافت زهاب‌های کشاورزی
۶-۱- مصارف ممکن برای زهاب‌های کشاورزی
۶-۲- روش‌های مدیریت و بازیافت زهاب کشاورزی
۶-۳- تحلیل اقتصادی و فنی گزینه‌های مصرف دوباره زهاب کشاورزی
۶-۴- اثرات بازیافت زهاب کشاورزی بر کیفیت منابع آب، خاک و محصولات تولیدی
۶-۵- بررسی روش طبیعی تصفیه پساب و شیرین‌سازی منابع آب لب‌شور برای مصرف کشاورزی
۷- رویکردهای اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و حقوقی در مدیریت مصرف و استفاده از پساب
۷-۱- تحلیل اقتصادی گزینه‌های مختلف بازیافت پساب
۷-۲- چالش‌های اجتماعی در پذیرش استفاده دوباره از آب
۷-۳- الزامات آموزش و فرهنگ‌سازی به‌منظور مصرف ایمن پساب
۷-۴- الزامات قانونی در فرآیند بازیافت پساب و خلاءهای موجود
۷-۵- نقش تعرفه در کاهش مصرف آب
۷-۶- خلاءهای قانونی برای کاهش هدررفت ظاهری و واقعی
۷-۷- نقش آموزش، فرهنگ و تبلیغات در کاهش مصرف آب
۷-۸- چالش‌های اجتماعی در کاهش هدررفت آب
۸- فناوری‌های نو در حوزه بازیافت
۹- استانداردها و ضوابط کمی و کیفی آب و فاضلاب
۹-۱- نقاط ضعف و قوت استانداردهای موجود
۹-۲- بازنگری و بومی‌سازی استانداردها
۹-۳- تدوین استانداردهای جدید

د) مدیریت کیفیت آب

۱- برنامه ایمنی آب
۲- ارزیابی و آسیب‌شناسی روش‌های جایگزین در مدیریت کیفیت آب (دستگاه تصفیه خانگی، آب بسته‌بندی، سیستم دوگانه و...)
۳- مدیریت و راهبری تصفیه‌خانه‌های آب
۳-۱- چالشهای تصفیه آب
۳-۲- چالشهای تصفیه‌خانه‌های آب ایران و روش‌های ارتقای عملکرد تصفیه‌خانه‌ها
۳-۳- روش‌ها و فناوری‌های نوین در تصفیه آب
۳-۴- روش‌های نیترات زدایی، حذف فلزات سنگین و کاهش شوری، کدورت آب و حذف بو
۴- تاثیرات محیط‌زیستی پساب دستگاه‌های آب شیرین‌کن بر کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی منطقه محل تخلیه آن‌ها
۵- تاثیر تغییرات اقلیم بر کمیت و کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی
۶- مدیریت هوشمند کیفیت آب
۶-۱- استفاده از سنسورها و سیستم‌های GIS و اسکادا
۶-۲- استفاده از فن‌آوری‌های نوین در تصفیه و کنترل کیفیت و بهداشت آب و فاضلاب
۶-۳- چالش‌های رویکردهای نوین استفاده از آب‌های نامتعارف، آب انبارها و آب‌های لب‌شور از نظر کیفیت آب
۶-۴- مدل‌سازی کیفی شبکه‌های توزیع آب و منابع آب سطحی و زیرزمینی
۷- پایش کیفی اکوسیستم‌ها
۷-۱- راه‌های جلوگیری از زوال کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی

۷-۲- استفاده از بیو سنسورها (موجودات زنده مانند قورباغه، جلبک و ماهی) در ورودی آب خام تصفیه‌خانه‌ها برای شناسایی سموم و مواد آلی آلاینده

۸- آلاینده‌های ویژه و نوظهور در آب آشامیدنی و پساب

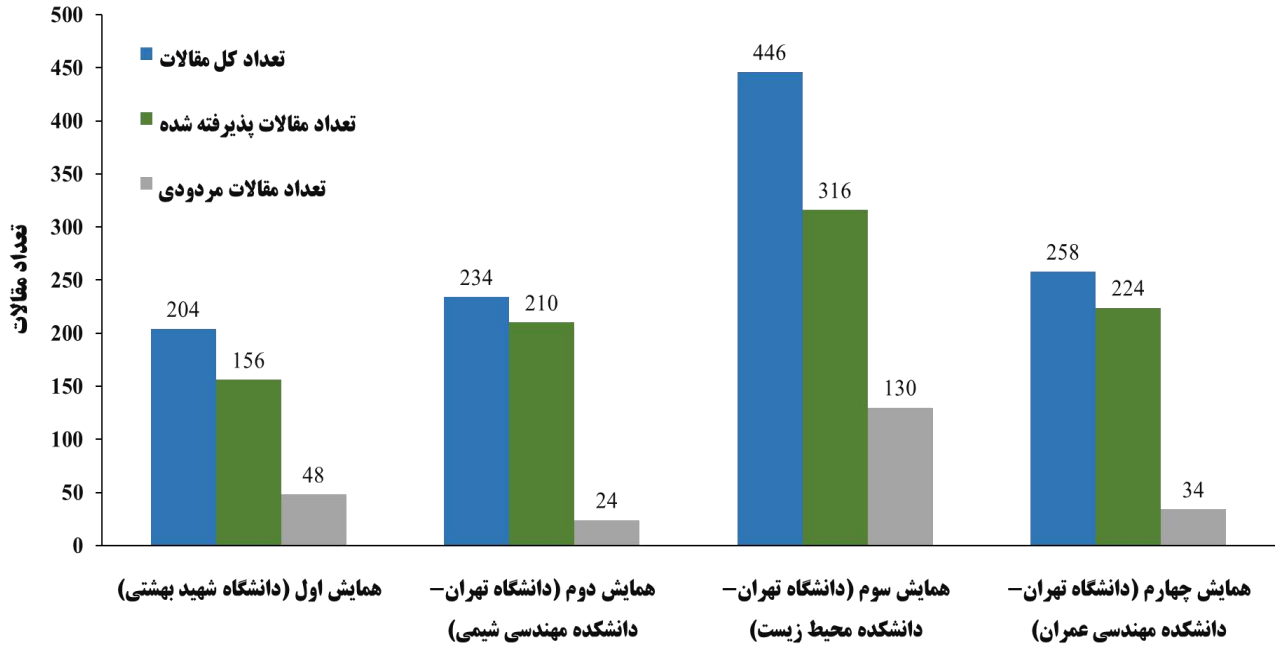
۹- اقتصاد و کیفیت آب

کمیته‌های علمی و اجرایی:

کمیته علمی همایش مشتمل بر ۷۰ نفر از اساتید و متخصصان صنعت آب و فاضلاب از سراسر کشور و با لحاظ کردن حوزه‌های مختلف دانش فنی تشکیل شد. این کمیته در تبیین محورهای همایش و نیز فرآیند ارزیابی و تصمیم‌سازی در مورد مقالات نقش کلیدی را ایفا نمود. کمیته اجرایی همایش نیز با مشارکت حدود ۱۶ نفر مسئول و ۴۳ نفر عضو کمیته ها از دانشجویان و فارغ التحصیلان رشته‌های مختلف مرتبط با حوزه آب و فاضلاب و از دانشگاه‌های مختلف سراسر کشور مسئولیت برگزاری این همایش را عهده‌دار بوده است و با برگزاری ۱۰ جلسه برای برنامه ریزی و هماهنگی، توانست در طول برگزاری همایش فضای مناسبی را برای استفاده شرکت‌کنندگان از همایش فراهم نماید.

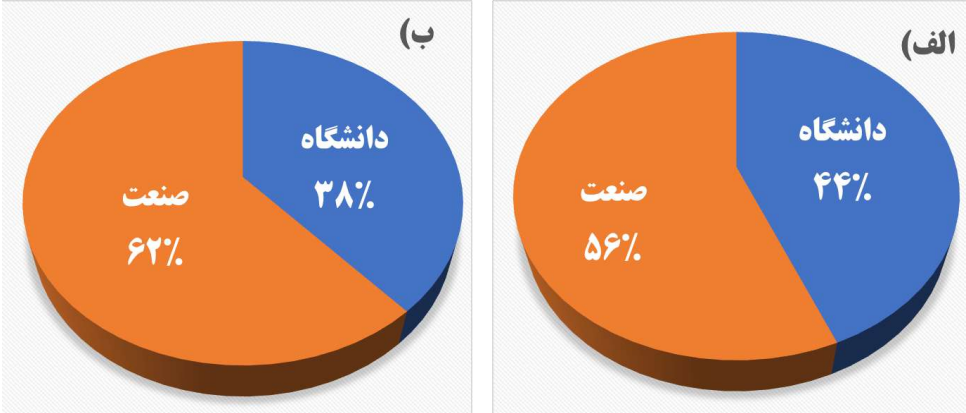
مقالات:

مقالات بسیاری در مدت‌زمان مشخص‌شده به سایت همایش ارسال و مهلت ارسال مقالات ۱ بار تمدید شد. در پایان مهلت ارسال مقالات، مجموعاً ۲۵۸ مقاله به دبیرخانه همایش ارسال شد که از این تعداد ۲۲۴ مقاله پذیرفته شد. از این تعداد، ۱۴۴ مقاله به‌صورت پوستر و ۸۰ مقاله به‌صورت شفاهی ارائه شد. این مقالات که دربرگیرنده‌ی محورهای بیست و هفتگانه همایش بود، مقالات شفاهی در ۱۷ جلسه که در دو بازه زمانی در چهارشنبه ۸ آذرماه، روز دوم همایش، به صورت مجازی ارائه شد. یک یا دو نفر از اعضا کمیته علمی مسئولیت مدیریت این جلسات را برعهده داشتند. مقالات پوستری در طول سه روز برگزاری همایش و در قالب ۴ جلسه موازی به صورت مجازی ارائه شد. اطلاعات آماری مقالات در شکل‌های ۱ تا ۷ ارائه شده‌اند.

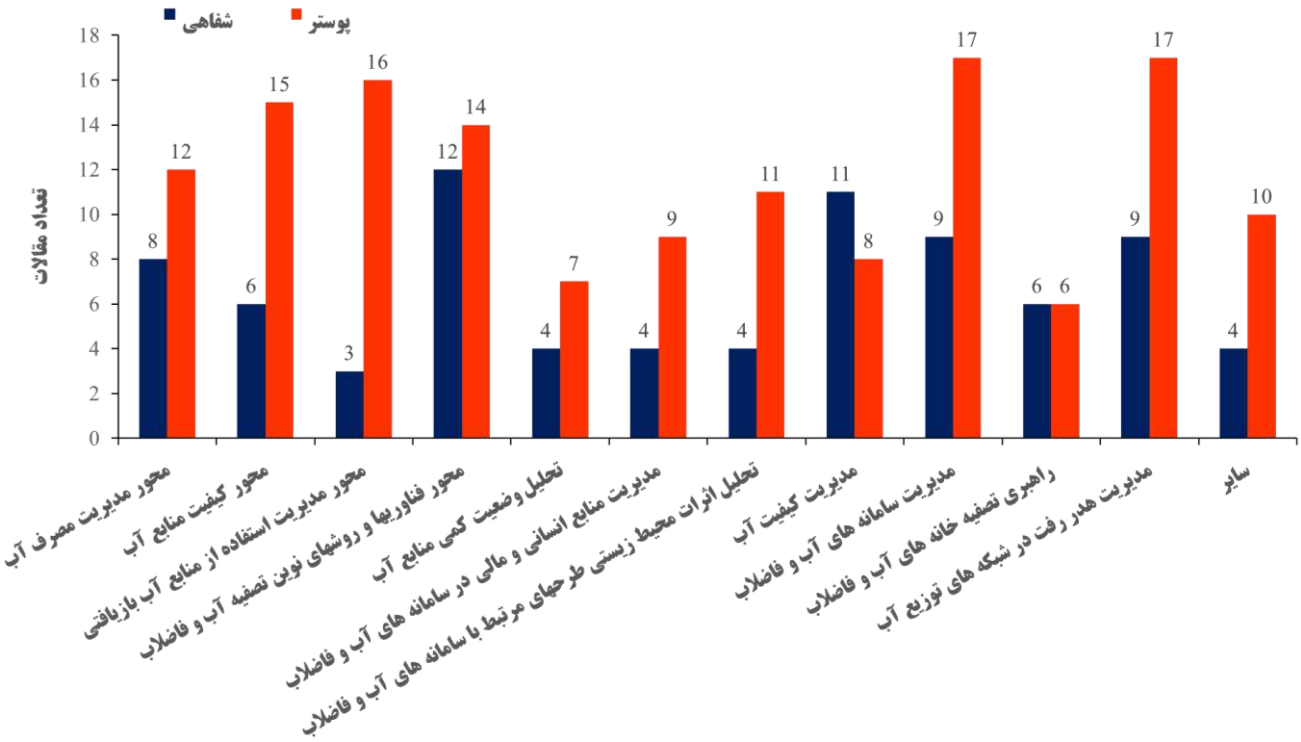


شکل ۱- تعداد مقالات ارسالی و پذیرش‌شده در چهار همایش تخصصی

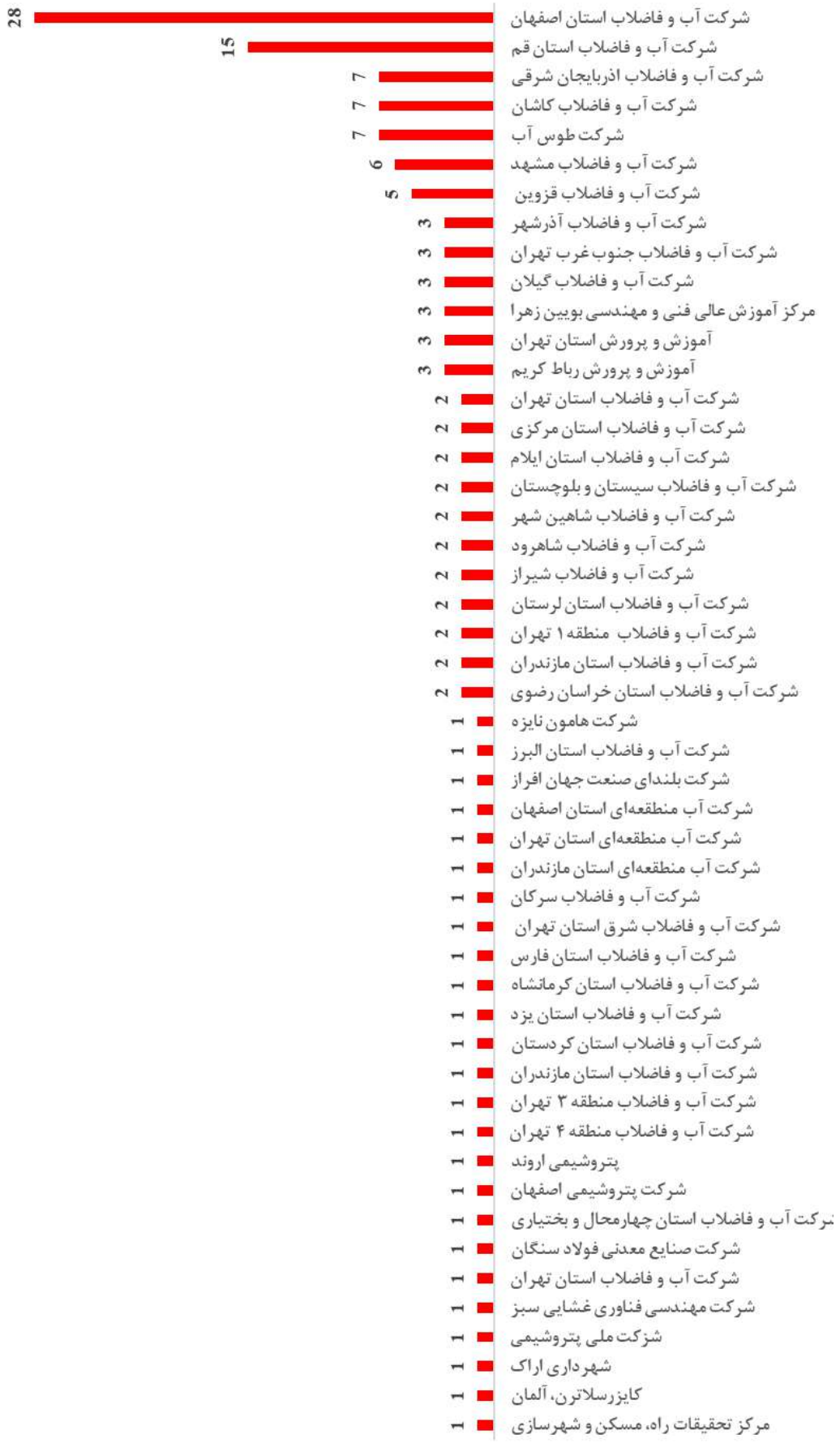
شکل ۲- تعداد مقالات پذیرفته شده از دانشگاه و صنعت



شکل ۳- توزیع مقالات الف) شفاهی و ب) پوستری بین صنعت و دانشگاه



شکل ۴- توزیع مقالات شفاهی و پوستری در محورهای مختلف



شکل ۵- مشارکت صنعت و شرکت‌های آب و فاضلاب مراکز استان‌ها در مقالات پذیرفته‌شده

شکل ۶- مشارکت دانشگاه‌های سراسر کشور در مقالات پذیرفته‌شده

شکل ۷- مشارکت پژوهشکده‌های سراسر کشور در مقالات پذیرفته‌شده

هیئت داوران:

هیئت داوران شامل ۹۶ نفر، از بین اساتید دانشگاه‌های سراسر کشور (۷۵ نفر) و متخصصین سازمان‌ها و ادارات دولتی و یا از متخصصین بخش خصوصی اعم از شرکت‌های مشاور و یا پیمانکاری سراسر کشور (۲۱ نفر) انتخاب شدند که در داوری مقالات مشارکت نمودند. هر مقاله حداقل برای ۲ داور ارسال شد و به‌طور متوسط هر داور ۶ مقاله را داوری کرد.

مراسم افتتاحیه:

در ابتدای مراسم آقای دکتر مهدی قاسمیه رئیس محترم دانشکدگان فنی دانشگاه تهران به‌عنوان میزبان همایش به حضار محترم خیرمقدم گفته و دیدگاههای خود را در رابطه با مباحث مربوط به کیفیت و بازیافت آب ارائه کرده و آمادگی دانشکدگان فنی برای پشتیبانی دائم از این همایش را اعلام کردند. سپس آقای دکتر مسعود تابش، دبیر همایش و رئیس هیئت مدیره انجمن آب و فاضلاب ایران، گزارشی از فعالیت‌های انجمن و برنامه‌های آتی آن را ارائه و ویژگی‌های همایش‌های انجمن و برنامه‌های این همایش را تشریح کردند. اولین سخنران کلیدی همایش جناب آقای دکتر مسعود تجریشی استاد محترم دانشگاه صنعتی شریف و معاون سابق سازمان حفاظت محیط زیست بودند که ضمن ارائه وضعیت محیط زیست و منابع آب و آب و فاضلاب در کشور، چالش‌های این حوزه را برشمردند. در ادامه خانم دکتر سمیه رفیعی رئیس فراکسیون محیطزیست مجلس شورای اسلامی چالش‌های موجود در بخش محیطزیست و آب و فاضلاب کشور را مطرح و موفقیت‌ها و ناکامی‌های مجلس شورای اسلامی در حوزه قانون‌گذاری و نظارت برای این بخش‌ها را برشمردند. در قسمت پایانی مراسم افتتاحیه آقای دکتر تابش دبیر همایش و رئیس هیئت مدیره انجمن آب و فاضلاب در خصوص چگونگی انتخاب پیشکسوتان برگزیده دانشگاه و صنعت توسط هیئت مدیره انجمن توضیح دادند. سپس کلیپ زندگینامه آقای دکتر محمدتقی منزوی (پیشکسوت برگزیده دانشگاه) پخش شد. در ادامه آقای مهندس عباس شفیعی مدیرعامل اسبق شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور نیز به‌عنوان پیشکسوت برگزیده صنعت معرفی شدند. ایشان ضمن ارائه مختصر زندگی‌نامه خود، دیدگاه‌های خود را درخصوص وضعیت آب و فاضلاب کشور بیان کردند.

پیشکسوتان برگزیده دانشگاه و صنعت

دکتر محمدتقی منزوی (دانشگاه تهران)

مهندس عباس شفیعی (شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور)

اولین نشست تخصصی در روز اول بعد از سخنرانی افتتاحیه برگزار شد. نشست‌های دوم و سوم نیز در بعدازظهر روز اول همایش پیش از مراسم اختتامیه برگزار شدند.

نشست‌های تخصصی

ردیف	عنوان نشست	اعضای نشست
۱	بررسی چالش‌ها و پیامدهای تغییر اقلیم و مداخلات انسانی بر کیفیت آب	دکتر کاظم ندافی، دکتر مسعود تجریشی، دکتر بنفشه زهرایی، دکتر حامد محمدی، دکتر مهتاب باغبان، دکتر غلامرضا شقاقی
۲	مدیریت بهینه مصرف آب با رویکرد الزام صنایع به استفاده از پساب	دکتر مهدی فرزاد کیا، دکتر عباس اکبرزاده، دکتر کتایون نعمت‌پور، دکتر مسعود باقرزاده، دکتر حسین نائب
۳	راه‌کار و چالش‌های سرمایه‌گذاری در کاهش هدررفت آب در سامانه‌های آبرسانی	مهندس سید حمیدرضا کشفی، دکتر جلیلی قاضی‌زاده، مهندس مهدی کمیلی، مهندس علی سیدزاده، مهندس حسین طلاچی

مراسم اختتامیه:

در این مراسم ابتدا گزارش علمی همایش توسط خانم دکتر نظیف، دبیر علمی، همایش ارائه شد. آن‌گاه آقای دکتر تابش رئیس هیئت مدیره انجمن آب و فاضلاب در خصوص تقدیر از سردبیر، دبیر تخصصی و داوران برگزیده نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب توضیح دادند. سپس برگزیدگان این سه بخش که توسط انجمن آب و فاضلاب ایران انتخاب شده اند به شرح زیر معرفی شدند.

دکتر حمیدرضا صفوی (سردبیر سابق نشریه)

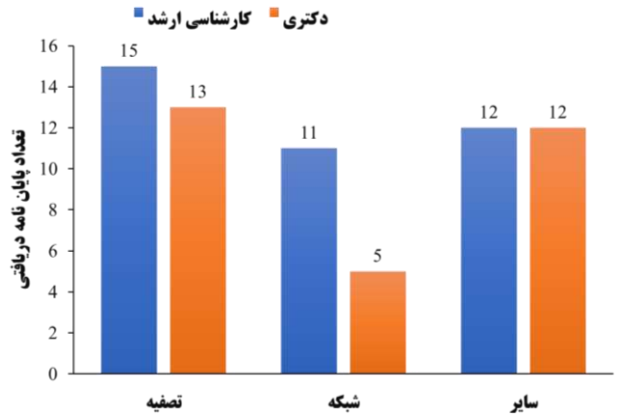
دکتر ناصر طالب بیدختی (دبیر تخصصی برگزیده)

دکتر مسعود طاهریون (داور برگزیده)

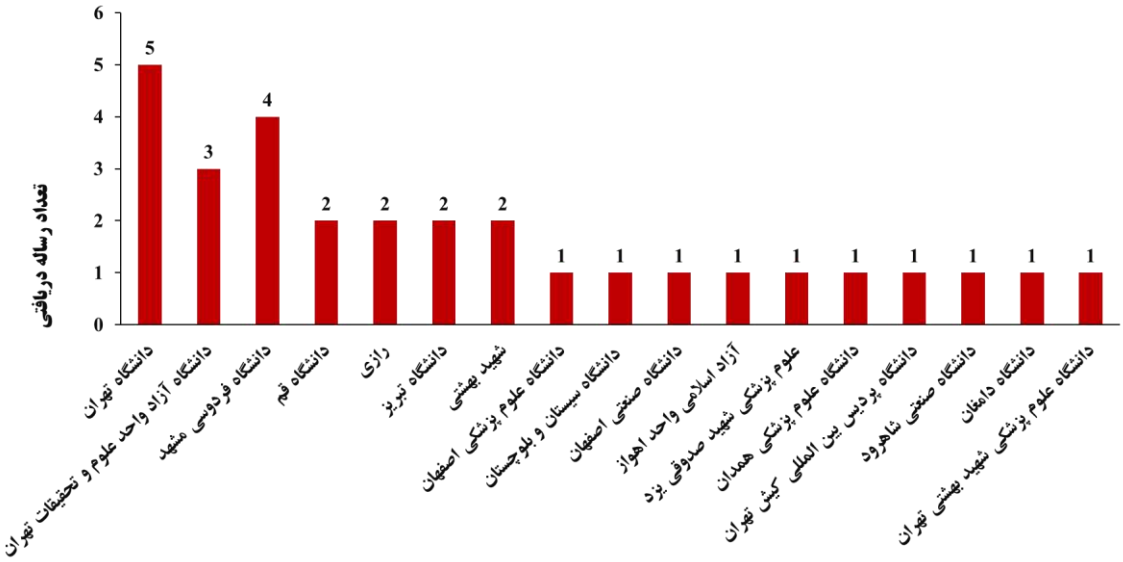
دکتر محمود فغفور مغربی (داور برگزیده)

تقدیر از برگزیدگان مسابقه انتخاب پایان نامه برتر در مقاطع کارشناسی ارشد و دکترا:

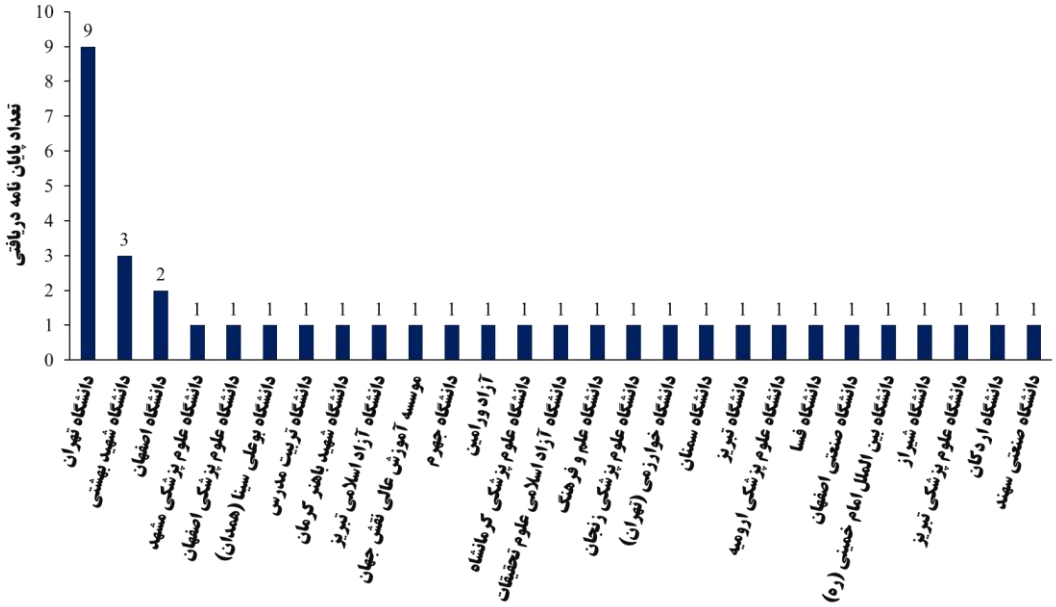
پایان‌نامه‌های دریافتی شامل، ۳۸ پایان‌نامه کارشناسی ارشد و ۳۰ رساله دکتری بودند که اطلاعات تفکیکی آن‌ها در شکل‌های ۸ تا ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۸- تعداد پایان‌نامه‌های دریافتی به تفکیک محور و مقطع تحصیلی



شکل ۹- تعداد پایان‌نامه‌های دریافتی مقطع دکتری به تفکیک دانشگاه



شکل ۱۰- تعداد پایان‌نامه‌های دریافتی مقطع کارشناسی ارشد به تفکیک دانشگاه

برندگان هشتمین دوره مسابقه پایان‌نامه برتر (سال ۱۴۰۲)

مقطع	محور	رتبه	نام و نام خانوادگی	عنوان	دانشگاه	استاد راهنما	زمان دفاع
کارشناسی ارشد	شبکه‌های آب و فاضلاب	۱	هانیه صفرپور	ارزیابی اثرات مدیریت تقاضا بر سامانه‌های فاضلاب	تهران	دکتر مسعود تابش	مرداد ۱۳۹۹
		۲	محمدرضا نجارزادگان	تحلیل هیدرولیکی شبکه آبرسانی به‌منظور مکانیابی بهینه نصب دستگاه‌های پایش‌کیفیت آب	اصفهان	دکتر رامتین معینی	شهریور ۱۴۰۱
		۳	نیوشا هدایتی مرزونی	بهینه‌سازی هم‌زمان فشار خروجی شیرهای فشارشکن در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی	شهید بهشتی	دکتر محمدرضا جلیلی قاضی زاده	اسفند ۱۳۹۹
	تصفیه آب و فاضلاب	۱	محمود ملکی	طراحی و ساخت سامانه‌های نمک‌زدایی آب خورشیدی بر پایه متمرکزسازی گرما با استفاده از نانو ساختارهای متخلخل جاذب نور و عایق حرارت	تربیت مدرس	دکتر سید مجتبی صدرعاملی و دکتر فرزانه عرب‌پور رق آبادی	خرداد ۱۴۰۰
		۲	مریم اله‌بخشی	حذف ترکیبات دارویی و رنگ‌زا از محیط آبی با قالب فلز-آلی نانوساختار بر پایه MIL-53(Fe)	علوم پزشکی تبریز	دکتر محمد مسافری	بهمن ۱۴۰۱
		۳	مرضیه رشید	سنتز یک فتوکاتالیست چند جزئی جهت تصفیه پساب‌های	شیراز	دکتر داریوش مولا	بهمن ۱۳۹۹
دکترا	شبکه‌های آب و فاضلاب	۱	سیامک رضازاده بقال	ریسک سیل و طغیان در سیستم‌های زهکش رواناب سطحی در حوضه‌های کوچک با درنظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی	فردوسی مشهد	دکتر سعیدرضا خداشناس	شهریور ۱۴۰۲
		۲	حمیده جعفری	توسعه الگوریتمی برای جانمایی بهینه حسگرها به‌منظور کمینه کردن اثرات ناشی از ورود آرسنیک در شبکه توزیع آب	قم	دکتر سارا نظیف	شهریور ۱۴۰۰
	تصفیه آب و فاضلاب	۱	زهرا رحیمی	CNP removal and water reclamation from industrial wastewater in an innovative single A2O airlift bioreactor combined by adsorption and membrane technologies	رازی	دکتر علی اکبر زینتی‌زاده	مهر ۱۴۰۱
		۲	ملیحه موذنی	سنتز و بررسی کارایی کامپوزیت‌های دوستدار محیط‌زیست در تجزیه و سمیت‌زدایی ترکیبات آنتی باکتریال از منابع آبی در حضور پروکسی مونوسولفات	علوم پزشکی اصفهان	دکتر افشین ابراهیمی	شهریور ۱۴۰۱

برندگان مقالات برتر

ردیف	محور	عنوان	نویسندگان	وابستگی نویسندگان	نوع ارائه
۱	مدیریت مصرف آب	طراحی و ارزیابی مدل فرهنگ مصرف بهینه آب شرب با رویکرد پژوهش آمیخته	سعید نفیسی فر؛ سید عبدالله حیدریه	دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان	شفاهی
۲	کیفیت منابع آب	تعیین منشا شوری با استفاده از رخساره‌های هیدروشیمیایی (HFE) و ایزوتوپی (H2 و O18) آب زیرزمینی دشت یزد	محمدحسین عارف؛ رحیم باقری	شرکت آب و فاضلاب استان یزد	شفاهی
۳	فناوری‌های نوین تصفیه	کنترل هدایت الکتریکی آب با تغییر طراحی راکتور پلاسمایی	فاطمه بهارلونژاد؛ محمدعلی محمدی؛ سیده ترگل نقیب‌زاده؛ محمدصادق ذاکرحمیدی	دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز	شفاهی
۴	کمیت منابع آب	تعیین سطح ریسک منابع تامین آب مجتمع روستایی امام علی (ع) شهرستان مشهد به‌روش FMEA	سمانه مقرب الهی؛ محمد سلطانی اصل؛ هاشم کوچک‌زاده دندانساز؛ حجت عباسی	شرکت آب و فاضلاب مشهد	شفاهی

۵	مدیریت منابع انسانی	اثر تغییر مدت زمان قرائت کنتور آب بر درآمد، دوره وصول مطالبات و هزینه شرکت آب و فاضلاب در شهر قم	قاسم امینی	شرکت آب و فاضلاب استان قم	شفاهی
۶	اثرات محیطزیستی	ردپای کربن و مصرف انرژی در تصفیه‌خانه فاضلاب از نوع USBF	محمد مسافری؛ سارا نیک‌مرام؛ غلامرضا نبی بیدهندی؛ ناصر مهردادی	دانشگاه علوم پزشکی تبریز	شفاهی
۷	مدیریت کیفیت آب	تشخیص آسان و ارزان آکریل آمید موجود در آب‌های آلوده به‌صورت کیفی با استفاده از کروماتو گرافی لایه نازک	سمانه خادمی مزده؛ شکیبا تکلو؛ ملیکا جهان‌تیغ؛ مریم فرحناک	گروه پژوهشی دبیرستان فرزانگان یک تهران/سمپاد	شفاهی
۸	مدیریت کیفیت آب	تعیین بهترین شبکه پایش آب زیرزمینی به‌وسیله بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک	سعید ایزدپناه؛ محمدحسین نیک‌سخن	دانشکده محیطزیست دانشگاه تهران	شفاهی
۹	مدیریت سامانه‌های آبفا	افزایش کارایی مدل‌های بهینه‌سازی و نوسازی چند هدفه شبکه آبرسانی با تولید پاسخ‌های اولیه نزدیک به بهینه	محمدمهدی ریاحی؛ امین بخشی‌پور؛ کارلو جودیچیانی؛ انریکو فورتوناتو کریاکو؛ علی حقیقی	دانشگاه شهید چمران اهواز	شفاهی
۱۰	راهبری تصفیه‌خانه	Simulation-based Approach for Minimizing Sludge Disposal and Achieving Sustainable Effluent Quality in Remote Towns	مهسا صادقی وزین؛ سید مهدی قاسمی؛ سیدجواد علوی؛ سیدمحسن کرابی	شرکت طوس آب	شفاهی
۱۱	مدیریت هدررفت	مقایسه روش‌های مختلف خوشه‌بندی برای ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری در شبکه‌های توزیع آب	محمد کاکش پور؛ محمدرضا جلیلی قاضی زاده؛ سید عباس حسینی؛ احمد شرافتی	دانشکده مهندسی عمران، آب و محیطزیست دانشگاه شهید بهشتی	شفاهی
۱۲	سایر	به‌کارگیری مفاهیم همبست آب، انرژی و محیطزیست در ارزیابی اقتصادی روش‌های انتقال آب به آبریز زاینده‌رود	فاطمه نظام‌زاده اژیه؛ حامد یزدیان؛ محمدعلی علیجانیان	دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان	شفاهی
۱۳	مدیریت کیفیت آب	سیمانتاسیون چاه‌ها: راه‌کاری جهت بهبود کیفیت آب استحصالی از منابع زیرزمینی	فهیمه مهرانفر؛ حسام خسروی؛ مهتاب باغبان؛ نوشین سهراب‌نیا؛ مریم‌السادات نبوی؛ حبیب محمدی	شرکت آب و فاضلاب استان تهران	پوستری
۱۴	مدیریت هدررفت	طرح بهینه تعویض کنتور آب مشترکین (مطالعه موردی استان اصفهان)	آسیه سادات ملاباشی؛ الهام امینی؛ سید محمد حسین صالح	شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان	پوستری

حامیان برتر

FAPCO
شرکت فرآیند ارقام پرداز

شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان

غرفه برتر

طوس آب
شرکت مهندسی مشاور

آقایان مهندس عزیزی و دکتر نی‌ریزی مدیران عامل شرکت‌های فرایند ارقام پرداز و طوس آب نیز ضمن تشکر از انتخاب خود به‌عنوان حامی و غرفه برتر دیدگاه‌های خود را با حضار درمیان گذاشتند. در انتها نیز از کادر اجرایی همایش تقدیر شد.

در ظهر روز دوم نیز برنامه کلینیک صنعت به‌شرح زیر برگزار شد.

برنامه کلینیک صنعت

موضوع	متخصصان
محور تلفات آب: طراحی و بهره برداری از شبکه توزیع آب و مدیریت مصرف	مهندس علی سید زاده، دکتر جلیلی قاضی زاده، دکتر عبدالمهدی میرسپاسی، مهندس حمیدرضا هنری، دکتر حریری اصلی، دکتر ستار صالحی
محور بازیافت آب: تصفیه و بازچرخانی فاضلاب شهری و صنعتی	با حضور: دکتر مجتبی فاضلی، دکتر حسین نایب، دکتر مجید حسین زاده
محور کیفیت آب: کیفیت آب و پساب	دکتر مهتاب باغبان، دکتر زهرا اکبری، مهندس مجید قنادی

کارگاه‌های آموزشی

ردیف	عنوان کارگاه	مدرس
۱	ارزیابی تاب‌آوری سامانه‌های آب و فاضلاب	دکتر سعید بشیری
۲	برنامه ایمنی آب	دکتر میترا قاسم شربیانی
۳	اینترنت اشیا (IoT) و مدل‌سازی شبکه توزیع آب	دکتر کاوه حریری اصلی
۴	بررسی پتانسیل بند س تبصره ۸ قانون بودجه ۱۴۰۲ در خصوص قراردادهای کاهش آب بدون درآمد	مهندس علی سید زاده، مهندس سعید تکیه و مهندس محسن داوودی سرشت
۵	بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌های آب از منظر کمی و کیفی	دکتر مهدی هاشمی شهرکی و دکتر مهسا تهرانی
۶	ارزیابی وضعیت شبکه توزیع براساس دستورالعمل ارتقای سامانه‌های آبرسانی(OP210)	مهندس محسن داودی سرشت و مهندس یاسر اسماعیلی
۷	بومی‌سازی دانش طراحی و ساخت سیستم پیش‌تصفیه DAF آب دریا در گروه مپنا	مهندس شهریار تیزبین، مهندس فائزه یادگاری و مهندس مهدی فهیمی راد
۸	طراحی سیستم اسمز معکوس با نرم افزارWAVE	دکتر مسعود طاهریون
۹	تصفیه فاضلاب صنعت نساجی	دکتر مسعود طاهریون
۱۰	مدلسازی شبکه‌های توزیع آب به‌منظور بهره‌برداری و بهسازی با استفاده از نرم‌افزارهای ARCGIS و WaterGEMs	مهندس محمد امین غیبی
۱۱	گذر از پایلوت به مقیاس بزرگ: مرور مبانی مفهومی و تکنیک‌های عملی بهبود بهره‌وری آب در سامانه‌های آبرسانی بزرگ مقیاس	مهندس کاوه جملی
۱۲	تجارب استقرار استاندارد ISO17025 در آزمایشگاه	مهندس نوشین سهراب‌نیا
۱۳	تجارب برگزاری آزمون مقایسات بین آزمایشگاهی	مهندس نوشین سهراب‌نیا
۱۴	درس آموخته هایی از تجارب بین‌المللی در استفاده از پساب به‌همراه خلاصه گزارش اولین طرح کاربردی پهنه‌بندی محلی پساب شهری در ایران	دکتر پژمان طاهری

۱۵	تعیین استراتژی بازسازی لوله‌های شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تحلیل احتمال و پیامد حوادث در لوله‌ها	دکتر ستار صالحی
۱۶	ارزیابی موانع و پتانسیل‌های بازیابی آب خاکستری به‌عنوان یکی از منابع جایگزین آب در ساختمان‌ها	کاوه جمالی
۱۷	آشنایی با مدل سیستم مدیریت بازدهی آب بر اساس استاندارد ایزو ۴۶۰۰۱	دکتر سید محمدرضا حسینیان
۱۸	آشنایی وتحلیل مودهای شکست، در لوله‌های شبکه توزیع آبرسانی	دکتر سهراب حنایی و مهندس احسان ثابتی
۱۹	ممیزی برنامه‌های ایمنی آب	مهندس غلام رضا شقاقی

نمایشگاه حضوری:

نمایشگاه حضوری این همایش در غرفه‌های متعدد به‌صورت حضوری در سالن دانشکده مهندسی عمران در روز اول همایش برگزار شد. شرکت‌کنندگان در نمایشگاه عبارت بودند از: انجمن آب و فاضلاب ایران، شرکت طوس آب، شرکت فرآیند ارقام پرداز، شرک بلندا، شرکت سنجش افزار آسیا، شرکت لوتوس.

حامیان معنوی و علمی همایش				
وزارت کشور	وزارت نیرو	وزارت صنعت، معدن و تجارت	وزارت علوم، تحقیقات و فناوری	وزارت جهاد کشاورزی
سازمان حفاظت محیط‌زیست	اتحادیه انجمن‌های علوم آب	شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور	موسسه آب	موسسه تحقیقات آب
پژوهشکده علوم و فناوری انرژی، آب و محیط‌زیست	کرسی یونسکو در بازیافت آب	مهندسین مشاور طرح و تحقیقات آب و فاضلاب	انجمن آبخیزداری ایران	انجمن علمی مدیریت و مهندسی بهداشت ایمنی و محیط زیست ایران
دانشگاه صنعتی قم	شرکت مهندسین مشاور یکم	دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان	دانشگاه بجنورد	پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو

دانشگاه علم و صنعت ایران	دانشگاه تربت حیدریه	دانشگاه شهید باهنر کرمان	دانشگاه کردستان	دانشگاه تفرش
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری دانشگاه فنی و حرفه‌ای				
دانشگاه فنی حرفه‌ای				

حامیان مالی همایش					
شرکت فرایند ارقام پرداز	شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان	شرکت مهندسین مشاور آبران	شرکت طوس آب	شرکت بهینه طراحی پرشیا	شرکت رعد آب
شرکت آب و فاضلاب استان همدان					

حامیان رسانه‌ای همایش		
Sponsored and Indexed by CIVILICA We Respect the Science	ISC Islamic World Science Citation Center	همایش های ایران symposia
Callforpapers.ir	کنفرانس یاب www.conferenceyab.ir	

اخبار و فعالیت‌های عمده انجام شده انجمن آب و فاضلاب ایران در سه ماهه سوم سال ۱۴۰۲ به‌شرح زیر است:

- صدور نامه جناب آقای دکتر امینی مدیرعامل محترم (و معاون بهره‌برداری وقت) شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور به شرکت‌های آبفای استان‌ها برای حمایت از همایش ۱۴۰۲ (۱۴۰۲/۰۷/۴)
- برگزاری جلسات سوم تا پنجم شورای سیاستگذاری همایش ۱۴۰۲ (۱۰ و ۱۷ و ۱۴۰۲/۰۴/۲۴)
- برگزاری جلسات چهارم و پنجم شورای اجرایی همایش ۱۴۰۲ (۵ و ۱۴۰۲/۰۷/۲۹)
- برگزاری جلسه هشتادم هیئت مدیره انجمن (۱۴۰۲/۰۷/۲۶)
- انتشار خبرنامه شماره ۹۳ انجمن (آذر ماه ۱۴۰۲)
- برگزاری جلسات ششم تا نهم شورای سیاستگذاری همایش ۱۴۰۲ (آبان‌ماه ۱۴۰۲)
- برگزاری جلسات ششم تا هشتم شورای اجرایی همایش ۱۴۰۲ (آبان‌ماه ۱۴۰۲)
- برگزاری جلسه اعضای هیئت مدیره با معاون محترم منابع انسانی شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور (۱۴۰۲/۰۸/۲۱)
- برگزاری جلسه نوبت اول مجمع عمومی عادی سالیانه و مجمع عمومی فوق‌العاده انجمن (۱۴۰۲/۰۸/۲۱)
- برگزاری جلسه هشتاد و یکم هیئت مدیره انجمن (۱۴۰۲/۰۸/۲۴)
- انتشار خبرنامه شماره ۹۲ انجمن (آبان ماه ۱۴۰۲)
- برگزاری جلسات دهم و یازدهم شورای سیاستگذاری همایش ۱۴۰۲ (آذرماه ۱۴۰۲)
- برگزاری جلسات نهم و دهم شورای اجرایی همایش ۱۴۰۲ (آذرماه ۱۴۰۲)
- برگزاری دومین همایش ملی مدیریت کیفیت آب و چهارمین همایش ملی مدیریت مصرف آب با رویکرد کاهش هدررفت و بازیافت (۷ تا ۱۴۰۲/۰۹/۹)
- تقدیر از آقای دکتر صفوی سردبیر محترم سابق نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب (۱۴۰۲/۰۹/۷)
- برگزاری سی و هشتمین وبینار تخصصی انجمن نیز با عنوان: «مطالعه ترکیبات مختل کننده غدد درون ریز (EDCs) در رودخانه کارون و تصفیه‌خانه فاضلاب» توسط آقای دکتر علی اکبر بابائی (۱۴۰۲/۰۹/۱۵)
- برگزاری جلسه نوبت دوم مجمع عمومی سالیانه و مجمع عمومی فوق‌العاده انجمن (۱۴۰۲/۰۹/۱۶)
- برگزاری جلسه هشتاد و دوم هیئت مدیره انجمن (۱۴۰۲/۰۹/۲۹)
- انتشار خبرنامه شماره ۹۳ انجمن (آذرماه ۱۴۰۲)
- انتشار شماره ۳، دوره ۸ نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب (پاییز ۱۴۰۲)

خبرنامه انجمن آب و فاضلاب ایران
IWWA
IWWA Newsletter
Vol. 8, No. 91, October 2023
سال هشتم، شماره نود و یک، مهرماه ۱۴۰۲
سخن اول

خبرنامه انجمن آب و فاضلاب ایران
IWWA
IWWA Newsletter
Vol. 8, No. 92, November 2023
سال هشتم، شماره نود و دو، آبان ماه ۱۴۰۲
سخن اول

خبرنامه انجمن آب و فاضلاب ایران
IWWA
IWWA Newsletter
Vol. 8, No. 93, December 2023
سال هشتم، شماره نود و سه، آذرماه ۱۴۰۲
سخن اول

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 مباحث الزامی جهت ساخت مسکن (دکتر عباس اکبرزاده و همکاران)	https://www.aparat.com/v/IFHhK?playlist=737673
		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 ولی پور 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 شبکه های 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 رضایی راد)	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
۲	نشست‌های تخصصی انجمن آب و فاضلاب ایران	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
		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 چالش های استفاده از آب‌های نامتعارف	https://www.aparat.com/v/Ax3cG?playlist=879646
		نمک‌زدایی آبهای شور و بازیافت آب بعنوان 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
۳	اولین کنگره	مراسم افتتاحیه	https://www.aparat.com/v/hcuQk?playlist=5771644

	علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران (۱۳۹۵)	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 مصرف و هدررفت آب (۱۳۹۶)	مراسم افتتاحیه	https://www.aparat.com/v/AmjKX
		نشست تخصصی اول؛ پنل مدیریت مصرف آب	https://www.aparat.com/v/PO35T
		نشست تخصصی دوم؛ پنل تلفات ظاهری آب	https://www.aparat.com/v/nBNj5
		نشست تخصصی سوم؛ پنل کاهش تلفات واقعی	https://www.aparat.com/v/s3lwQ
		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 زاینده رود	https://www.aparat.com/v/hEXdv
		نشست تخصصی دوم- مدیریت مصرف آب و سازگاری با کم آبی	https://www.aparat.com/v/dVKvu
		نشست تخصصی سوم- دستاوردها و چالش های استفاده از آب های 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	مراسم افتتاحیه	https://www.aparat.com/v/FWHLM
		نشست تخصصی اول: نمک‌زدایی آبهای شور و	https://www.aparat.com/v/xyr2O

	کیفیت آب و سومین همایش ملی مدیریت مصرف آب (۱۴۰۰)	بازیافت آب بعنوان منابع راهبردی در مقابله با تنش آبی کشور	
		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- محور کیفیت آب	https://www.aparat.com/v/16VTE
		کلینیک صنعت- محور شبکه‌های توزیع و هدررفت آب	https://www.aparat.com/v/PupUv
		کلینیک صنعت- 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

کنفرانس های داخلی

عنوان کنفرانس	برگزارکنندگان	محل برگزاری	تاریخ برگزاری	سایت کنفرانس
چهاردهمین کنگره ملی مهندسی عمران	دانشگاه زنجان	زنجان	۱ تا ۲ خرداد ۱۴۰۳	https://14ncce.ir/

کنفرانس های خارجی

عنوان کنفرانس	محل برگزاری	تاریخ برگزاری	سایت کنفرانس
9th IWA Water Resource Recovery Modelling Seminar	Notre Dame, USA	6 – 10 April 2024	https://wrrmod2024conference.nd.edu/
4th International Conference Waters in Sensitive and Protected Areas – Supported	Pula, Croatia	10 – 13 April 2024	https://www.wspa2024.org/eng-index.php
Water Loss 2024	San Sebastian, Spain	14 – 17 April 2024	https://www.waterloss2024.org/
Water Management in Changing Conditions – Supported	Munich, Germany	14 – 15 May 2024	https://wmcc2024.net/
IWA Conference on Sustainable Sludge Management	Beijing, China	17 – 20 May 2024	https://iwa-sludge-2024.casconf.cn/
15th International Conference on Hydroinformatics HIC 2024 – From Nature to Digital Water: challenges and opportunities	Beijing, China	27 – 31 May 2024	https://hic2024.scimeeting.cn/en/web/index/1661_
18th IWA World Conference on Anaerobic Digestion	Istanbul, Turkey	2 – 6 June 2024	https://iwa-ad18.org/
International Conference on Urban Drainage 2024	Delft, Netherlands	9 – 14 June 2024	https://icud2024.org/
13th IWA Micropol and Ecohazard Conference	Taipei, Chinese Taipei	16 – 20 June 2024	https://iwa2024micropol.org/
YWP European Conference 2024	Copenhagen, Denmark	16 – 19 June 2024	https://ywpeur2024.com/
International Conference On Wider- Uptake Of Water Resource Recovery From Wastewater Treatment – Supported	Palermo, Italy	18 – 21 June 2024	https://icwrr2024.org/
IWA Regional Membrane Technology Conference (supported)	Palermo, Italy	18 – 21 June 2024	https://icwrr2024.org/
LET2024: 19th IWA Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies	Essen, Germany	24 – 28 June 2024	http://iwa-let.org/
IWA World Water Congress & Exhibition, August 2024	Toronto, Canada	11 – 15 August 2024	https://worldwatercongress.org/
10th IWA Odour and Air Emission Conference	Tasmania, Australia	25 – 28 August 2024	https://odourconference2024.com/
IWA 14th Specialized Conference on the Design, Operation and Economics of Large Wastewater Treatment Plants, Budapest 2024	Budapest, Hungary	11 – 15 September 2024	https://lwwtp2024.org/
Water in Industry 2024	Nanjing, China	23 – 27 September 2024	https://www.iwa-win.org/
4th International Conference on Disinfection and DBPs	Almeria, Spain	7 – 10 October 2024	https://iwa-network.org/events/4th-international-conference-on-disinfection-and-dbps/
17th Small Water and Wastewater Systems and 9th Resource Oriented Sanitation	Curitiba, Brazil	7 – 10 November 2024	https://www.swwsrosconference2024.org/
Nutrient Removal and Recovery Conference 2024	Brisbane, Australia	17 – 21 November 2024	https://uqevents.eventsair.com/nrr24/

مهندسین مشاور آبران (سطح عضویت برنزی)

مهندسین مشاور آبران یکی از شرکت‌های پیش‌رو و نوآور مهندسی در ایران است که در زمینه های زیر فعالیت می‌نماید:

شبکه‌های آب و فاضلاب شهری و صنعتی، تصفیه‌خانه، ایستگاه‌های پمپاژ و خطوط انتقال؛ مدیریت آب؛ مخازن ذخیره و تعادل؛ طرح‌های جامع تامین، ذخیره‌سازی، توزیع و انتقال آب؛ شبکه‌های آبیاری و زهکشی؛ ساختمان‌های مسکونی، تجاری، صنعتی، نظامی و اداری؛ ارزیابی اثرات زیست‌محیطی پروژه؛ مقاوم‌سازی در مهندسی آب؛ مدیریت پروژه؛ مدیریت آب به‌حساب نیامده؛ سیستم‌های اسکادا، کنترل، مانیتورینگ و تله‌متری تاسیسات آب.

در حال‌حاضر، مهندسین مشاور آبران با بیش از ۱۰ دفتر نمایندگی در سراسر ایران و خارج از کشور و با بهره‌گیری از خدمات بیش از ۱۰۰ نفر مهندسین متخصص و مجرب در زمینه طراحی و نظارت، از طرف سازمان مدیریت و برنامه دارای پایه ۱ در تخصص آب و فاضلاب شناخته شده است.

ازجمله پروژه های شاخص شرکت، انجام مطالعات طرح جامع آب شرب و صنعت در سطح سه استان در کشور است که به‌صورت جداگانه و در قالب ۳ قرارداد شامل استان های قزوین، زنجان و اردبیل از سال ۱۳۸۷ انجام شده و به‌تدریج به مرحله اجرا درمی‌آیند.

بهینه طراحی پرشیا (سطح عضویت برنزی)

شرکت بهینه طراحی پرشیا (Persia Optimized Designing Co. - POD) با ۱۸ سال سابقه فعالیت، در طراحی و مدیریت پروژه تأسیسات آب و فاضلاب تمرکز داشته است. به پشتوانه سوابق درخشان و تخصص مؤسسین، طرح‌های برجسته‌ای در این شرکت با موفقیت به انجام رسیده است که از جمله آن‌ها می‌توان به طرح نمک‌زدایی آب دریای خزر برای مصارف نیروگاه شهید سلیمی نکا به ظرفیت: ۳,۸۰۰ مترمکعب در روز و طرح آبگیر سایت آب شیرین‌کن بندر جاسک به ظرفیت: ۲۰,۰۰۰ مترمکعب در روز اشاره کرد. شرکت بهینه طراحی پرشیا با استفاده از توان تخصصی در زمینه نرم‌افزاری، امکان توسعه برنامه‌های کاربردی مهندسی را مهیا نموده که طی این سال‌ها از این برنامه‌ها در بخش طراحی بهره برده است. بهینه‌سازی طراحی، افزایش دقت و ایجاد مدل‌های پیچیده از جمله اهداف اصلی توسعه نرم‌افزارهای تخصصی است که علاوه بر آن، صرفه‌جویی در زمان و هزینه را به همراه دارد. شرکت بهینه طراحی پرشیا به پشتوانه توان تخصصی مدیریتی و کارشناسی، خدمات حرفه‌ای شامل مطالعات مفهومی، مطالعات امکان‌سنجی، مطالعات پایه و تفصیلی را ارایه می‌دهد:

- طرح‌های جامع تأمین آب
- طراحی ایستگاه‌های پمپاژ، خطوط انتقال و شبکه‌های آبرسانی
- طراحی تصفیه‌خانه‌های آب
- طراحی سامانه‌های نمک‌زدایی
- مطالعات مدیریت مصرف و آب بدون درامد
- طرح‌های جامع فاضلاب
- طراحی شبکه‌های جمع‌آوری آب باران و فاضلاب
- طراحی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و پساب صنعتی
- مطالعات طرح‌های بازچرخانی
- توسعه نرم‌افزارهای سفارشی بنا به درخواست کارفرمایان

نام شرکت	سطح عضویت	لوگو
مهندسین مشاور آبساران	الماسی	آبساران مهندسین مشاور Absaran Consulting Engineers www.absaran-co.ir
فناور ایمن لوتوس	طلایی	شرکت فناور ایمن لوتوس
مهندسی مشاور طوس آب	طلایی	طوس آب شرکت مهندسی مشاور
مهندسین مشاور یکم	برنزی	
آبان بسپار پارسیان	برنزی	Parsian ABRAM ETTESAL
فراگیر انرژی و پالایش مادیار	برنزی	MGEG فراگیر انرژی و پالایش مادیار Madyar Global Energy And Water Treatmet Co
خط لوله هامون (هپیکو)	برنزی	هپیکو Hapico
مهندسین مشاور طرح و تحقیقات اصفهان	برنزی	

سنجش افزار آسیا	برنزی	S.A.A Sanjesh Afzar Asia Co. Ltd.
مهندسین مشاور آبران	برنزی	مهندسین مشاور آبران
آب و فاضلاب آذربایجان شرقی	برنزی	شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجان شرقی
مهندسین مشاور آینده میترا	برنزی	مهندسین مشاور آینده میترا
بهینه طراحی پرشیا	برنزی	POD Persia Optimized Designing شرکت بهینه طراحی پرشیا

انجمن آب و فاضلاب ایران
IWWA
Iran Water & Wastewater Association
SEWER
چهارمین دوره
المپیاد آب و فاضلاب
سال ۱۴۰۲
یادوارهٔ
دکتر سیمین ناصری
آخرین مهلت ثبت‌نام:
۲۰ بهمن‌ماه ۱۴۰۲
نحوه و زمان برگزاری:
مرحله اول: به صورت تستی
۲۶ بهمن‌ماه ۱۴۰۲
مرحله دوم: به صورت تشریحی
(متعاقباً اعلام می‌شود)
داوطلبان می‌توانند در یک یا هر دو بخش زیر، به انتخاب خود در المپیاد شرکت کنند:
گزینه اول: طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های آب، فاضلاب و آب سطحی
گزینه دوم: فرآیندهای تصفیه، طراحی و بهره‌برداری تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب
به نفر اول هر گزینه جایزه نفیسی اهدا خواهد شد.
برای اطلاع از آخرین تغییرات آیین‌نامه برگزاری المپیاد به سایت انجمن مراجعه فرمایید.
شرکت در المپیاد، برای عموم دانشجویان در تمامی مقاطع و متخصصین صنعت آب و فاضلاب مجاز است.
هزینه ثبت نام
اعضای انجمن: ۷۵ هزار تومان
سایرین: ۱۰۰ هزار تومان
علاقه‌مندان می‌توانند برای کسب اطلاعات بیشتر به وبسایت انجمن آب و فاضلاب ایران مراجعه کنند و یا با دفتر انجمن تماس حاصل فرمایند.
۰۲۱-۸۸۳۹۱۳۹۰
۰۹۹۶۰۳۹۹۹۳۷
irwwa.ir
info@irwwa.ir

idea
انجمن آب و فاضلاب ایران
IWWA
Iran Water & Wastewater Association
مهلت ارسال ایده
۳۰ بهمن‌ماه ۱۴۰۲
پنجمین دوره مسابقه ایده برتر در علوم و مهندسی آب و فاضلاب
در محورهای هدررفت آب، بازیافت آب، کیفیت آب و سایر موضوعات مرتبط
همراه با جوایز نقدی، لوح تقدیر و چاپ ایده در مجله علمی "علوم و مهندسی آب و فاضلاب" برای رتبه‌های برتر

برای دریافت فرمت مربوطه و فرم مشخصات به سایت انجمن به
نشانی irwwa.ir مراجعه کرده و پس از تکمیل به ایمیل
iwwa.competitions@gmail.com
ارسال گردد.
برای کسب اطلاعات بیشتر می‌تواند به وبسایت انجمن آب و فاضلاب
ایران مراجعه کنید و یا با دفتر انجمن تماس حاصل فرمایید.
۰۲۱-۸۸۳۹۱۳۹۰
۰۹۹۶۰۳۹۹۹۳۷

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 بالی 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 ۱۴۰۱ (به ازای هر سال)	۷۵۰۰۰۰
حق عضویت دو ساله (۱۴۰۲ - ۱۴۰۳)	۲۳۰۰۰۰۰
حق عضویت چهار ساله (۱۴۰۲ - ۱۴۰۵)	۳۷۵۰۰۰۰
حق عضویت دو ساله دانشجویی (۱۴۰۲ - ۱۴۰۳)	۱۵۰۰۰۰۰
عضویت دائمی	۱۳۰۰۰۰۰۰

هزینه چاپ آگهی در نشریات انجمن

نوع	مبلغ (ریال)
۱ صفحه در یک شماره	۱۲۵۰۰۰۰۰
۲ صفحه در یک شماره	۲۵۰۰۰۰۰۰
۱ صفحه در چهار شماره پیاپی*	۵۰۰۰۰۰۰۰
۲ صفحه در چهار شماره پیاپی*	۸۰۰۰۰۰۰۰

* شامل یک‌سال عضویت حقوقی انجمن

شماره حساب: ۱۳۵۷۲۰۶۲۳

شماره شبا: IR930180000000000135720623

شماره کارت مجازی: ۵۸۵۹-۸۳۷۰-۰۹۹۰-۳۱۰۱

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

لطفا اسکن فیش واریزی را به ایمیل انجمن (info@irwwa.ir) ارسال فرمایید.

جدول مزایای اعضای حقوقی طرح جدید

سطح عضویت (مبلغ پرداختی) / مزایای عضویت	برنزی (سالانه ۳ میلیون تومان)	نقره‌ای (سالانه ۴ میلیون تومان)	طلایی (سالانه ۶ میلیون تومان)	الماسی (سالانه ۱۰ میلیون تومان)
دریافت **اعتبار یک‌ساله** (نحوه استفاده از اعتبار دریافتی، در ذیل جدول شرح داده می‌شود)	سالانه ۲ میلیون تومان	سالانه ۳ میلیون تومان	سالانه ۵ میلیون تومان	سالانه ۹ میلیون تومان
درج **لوگوی شرکت** در نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب و خبرنامه و سایت انجمن (با مشخص بودن سطح عضویت) در مدت زمان عضویت	*	*	*	*
دریافت **اشتراک** یک ساله نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب به صورت رایگان (۴ شماره) در مدت زمان عضویت	*	*	*	*
درج رایگان **آگهی نیم صفحه** (با متن دلخواه) در یک شماره نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب در مدت زمان عضویت			*	*
ارائه ۵۰٪ تخفیف در **اجاره غرفه نمایشگاهی** همزمان با کنفرانس‌های سالانه انجمن در مدت زمان عضویت (در صورت داشتن اعتبار، مبلغ اجاره غرفه از اعتبار کسر خواهد شد)			*	*
امکان انتقال **نیمی از اعتبار** باقیمانده به سال آینده (در صورت تمدید عضویت)			*	*
امکان **برگزاری کارگاه و وبینار کاربردی (براساس 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	سطح عضویت حقوقی			
		برنزی	نقره‌ای	طلایی	الماسی
تخفیف شرکت در کنفرانس‌های انجمن	٪۲۰	٪۵	٪۱۰	٪۱۵	٪۲۰
تخفیف شرکت در نمایشگاه‌های انجمن	-	٪۵	٪۱۰	٪۱۵	٪۲۰
تخفیف شرکت در دوره‌های آموزشی انجمن	٪۲۰	٪۵	٪۱۰	٪۱۵	٪۲۰
تخفیف شرکت در کارگاه‌ها و بازدیدهای انجمن	٪۲۰	٪۵	٪۱۰	٪۱۵	٪۲۰
تخفیف چاپ مقالات در مجلات انجمن	-	٪۵	٪۱۰	٪۱۵	٪۲۰
تخفیف چاپ آگهی درمجلات انجمن	-	٪۲۰	٪۲۰	٪۲۰	٪۲۰

جدول مزایای حامیان (طرح جدید)

مزایای حمایت / سطح حمایت (مبلغ پرداختی)	برنزی (سالانه ۵ میلیون تومان)	نقره‌ای (سالانه ۱۰ میلیون تومان)	طلایی (سالانه ۱۵ میلیون تومان)	الماسی (سالانه ۲۰ میلیون تومان)
دریافت **اعتبار یک‌ساله** (نحوه استفاده از اعتبار دریافتی، در صفحه قبل شرح داده شد)	سالانه ۲/۵ میلیون تومان	سالانه ۵ میلیون تومان	سالانه ۷/۵ میلیون تومان	سالانه ۱۰ میلیون تومان
درج **لوگوی شرکت** در نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب و خبرنامه و سایت انجمن (با مشخص بودن سطح حمایت) به‌مدت یک سال	*	*	*	*
دریافت **اشتراک** یک ساله نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب به صورت رایگان (۴ شماره) به‌مدت یک سال	*	*	*	*
درج رایگان **آگهی نیم صفحه** (با متن دلخواه) در یک شماره نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب			*	*
ارائه ٪۵۰ تخفیف در **اجاره غرفه نمایشگاهی** هم‌زمان با کنفرانس‌های سالانه انجمن (در صورت داشتن اعتبار، مبلغ اجاره غرفه از اعتبار کسر خواهد شد)			*	*
امکان انتقال **نیمی از اعتبار** باقیمانده به سال آینده (در صورت تمدید حمایت)			*	*
امکان **برگزاری کارگاه و وبینار کاربردی (براساس پروژه ها و عملکرد محصولات و ...)** مشترک با انجمن (پس از ارائه پروپوزال و انجام هماهنگی‌های لازم)				*
امکان درخواست برگزاری **کارگاه یا دوره تخصصی-آموزشی درخواستی**	*	*	*	*
دریافت **پرچم رومیزی** انجمن آب و فاضلاب ایران	*	*	*	*
دریافت **گواهی حمایت** معادل مبلغ حمایت خالص	*	*	*	*

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./

❖ **تذکر مهم:**

با توجه به افزایش شدید هزینه‌های پردازش و انتشار نشریه در سال‌های اخیر، براساس مصوبه هیئت تحریریه و تایید هیئت مدیره انجمن آب و فاضلاب ایران، کلیه مقالاتی که از ابتدای سال ۱۴۰۲ به مجله ارسال می شود باید مبلغ دو میلیون و پانصد هزار ریال برای هزینه پردازش اولیه و مبلغ سه میلیون ریال برای هزینه انتشار به شماره کارت: ۳۱۰۱-۰۹۹۰-۸۳۷۰-۵۸۵۹ به‌نام انجمن آب و فاضلاب ایران در بانک تجارت شعبه اردیبهشت (کد ۱۸۶) واریز و فیش آن را به‌همراه فایل‌های مقاله در سایت نشریه بارگزاری کنند.

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering

Vol. 8, No. 3, Autumn 2023

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

Industrial Water and Wastewater Policy Council:

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

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

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال هشتم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲
انجمن آب و فاضلاب ایران

ISSN 2588-3941

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering

Volume 8, No. 3, Autumn 2023

Preface (Digital Peers, A Revolutionary Technology in Urban Water Management) 2
Ali Haghighi

Papers
Phosphate Drain Water Treatment Using Wheat Straw Bioreactors 4
Atena Nadery, Hadi Ramezani Etedali, Abbas Kaviani, Mohammad Bijankhan and Mojtaba Akram

Calibration of Water Distribution Networks by Considering the Uncertainty of Nodal Pressure 13
Mehdi Dini, Gholamreza Abbaspoor and Seyyedeh Atra Saghebian

Investigating the Performance of the Combined Dagging Method with the Hoeffding Tree Base Algorithm in the Qualitative Classification of Drinking Water 25
Mohammad Taghi Sattari and Sahar Javidan

Measuring and Evaluating Water-Energy Nexus in Iran's Electricity Export and Import Using Virtual Water Approach 35
Morteza Tahamipour Zarandi and Erfan Esmaiel Zadeh Hanjani

Optimizing Sulfate Radical Based Advanced Oxidation Process for Reducing Effluent Organic Matter of Pulp and Paper Mill Wastewater Using Response Surface Method 47
Ali Tahmasebi, Mohammad Hossein Sarrafzadeh and Seyed Behnam Ghaffari

A Laboratory Study of the Effect of ZnO Nanooxide and CuO Nanooxide on the Rutting Resistance and Absorption of Pollutants in Porous Asphalt in Urban Surface Runoff 59
Ramtin Sobhkhiz Fomani, Taher Rajaee and Esmaeil Fatehifar

General Section
Interview (Dr. Manouchehr Vosoughi) 70
Round-Table (Specialized Meeting on the Challenges of Reuse of Urban Wastewater in Industry and Green Areas) 72
Best Thesis 82
Book Presentation 87
Conference Report 88
IWWA News 104