



مروری بر کاربرد فناوری‌های نوین در مدیریت کیفیت منابع آب در چارچوب HSE

افشین محمدپور^۱، فروزان فرخیان^۲

۱، ۲. گروه محیط زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

*مسئول مکاتبات: afshin.mohammadpour@iau.ac.ir

چکیده

منابع آب به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین مؤلفه‌های توسعه پایدار، طی دهه‌های اخیر با چالش‌های فزاینده‌ای ناشی از آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و شهری مواجه شده‌اند. پژوهش حاضر با هدف تحلیل نظام‌مند رویکردهای نوین در چارچوب HSE (بهداشت، ایمنی و محیط زیست) برای مدیریت کیفیت منابع آبی طراحی شده است. این مطالعه با روش مرور نظام‌مند و تحلیل مضمون، به بررسی چندین مقاله علمی منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ پرداخته و نقش فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیاء (IoT)، کلان‌داده‌ها، یادگیری ماشین و ارزیابی چرخه حیات (LCA) را در بهبود عملکرد سیستم‌های HSE بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که ادغام این فناوری‌ها در چارچوب HSE منجر به شناسایی سریع‌تر منابع آلاینده، تصمیم‌گیری بلادرنگ، و افزایش اثربخشی سیاست‌های زیست‌محیطی می‌شود. در پایان، یک چارچوب عملیاتی تلفیقی با تأکید بر بومی‌سازی، مشارکت ذی‌نفعان، و چرخه تصمیم‌سازی PDCA برای کشورهای در حال توسعه پیشنهاد شده است.

واژگان کلیدی: مدیریت منابع آب، چارچوب HSE، آلودگی آب، پایش هوشمند، یادگیری ماشین، ارزیابی چرخه حیات (LCA).

مقدمه

آب به‌عنوان یکی از بنیادی‌ترین ارکان حیات، نقش بی‌بدیلی در پایداری اکوسیستم‌های طبیعی، رفاه انسانی، توسعه اقتصادی و امنیت غذایی ایفا می‌کند (Taheri, 2023). این مایع حیاتی نه تنها منبعی ضروری برای مصرف خانگی و کشاورزی است، بلکه زیربنای بسیاری از فعالیت‌های صنعتی و خدماتی نیز به شمار می‌رود. از این رو، کیفیت و کمیت منابع آبی به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی توسعه پایدار شناخته می‌شود. با این حال، در دهه‌های اخیر، فشارهای ناشی از رشد جمعیت، شهرنشینی سریع، تغییرات اقلیمی، و گسترش فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، موجب تخریب کم‌سابقه کیفیت منابع آب در بسیاری از نقاط جهان شده است (Aloui et al., 2023; Scanlon et al., 2023).

مطالعات گسترده نشان داده‌اند که منابع آب سطحی و زیرزمینی در معرض انواع آلاینده‌ها قرار دارند که مهم‌ترین آن‌ها شامل فلزات سنگین (مانند سرب، جیوه، کادمیوم)، ترکیبات آلی پایدار (نظیر PCB ها و PAH ها (نیترات‌ها و فسفات‌ها، بقایای دارویی و محصولات بهداشتی (PPCPs)، هورمون‌ها، میکروپلاستیک‌ها، و اخیراً ترکیبات PFAS (مواد شیمیایی پایدار معروف به "مواد شیمیایی ابدی") هستند (Andreu et al., 2016; Anh et al., 2023; Senthil Rathi et al., 2024). حضور این ترکیبات در منابع آبی، پیامدهای جدی برای سلامت انسان، آبزیان، و تعادل اکولوژیکی دارد. از سوی دیگر، پدیده‌هایی نظیر شور شدن منابع آب، ورود آلاینده‌های ناشی از رواناب‌های سطحی، و نشست فاضلاب‌های صنعتی بدون تصفیه به منابع طبیعی، بحران آلودگی را بیش از پیش تشدید کرده‌اند.

در واکنش به این بحران، مدیریت منابع آب با رویکرد زیست‌محیطی به‌عنوان ضرورتی انکارناپذیر در برنامه‌ریزی‌های کلان مطرح شده است. با این حال، روش‌های سنتی در مدیریت آلودگی آب که غالباً مبتنی بر واکنش به بحران‌ها پس از وقوع آن‌ها هستند، در بسیاری موارد ناکارآمد بوده‌اند (Mishra et al., 2021; Swatuk, 2021). این شیوه‌های دیر هنگام و اغلب پرهزینه، نه تنها توان پیشگیری مؤثر از آلودگی را ندارند، بلکه ظرفیت پاسخ‌گویی به پیچیدگی‌ها و پویایی‌های روزافزون منابع آبی را نیز از دست داده‌اند.



در این میان، توجه به رویکردهای نوآورانه، پیش‌نگر و یکپارچه برای پایش، پیش‌بینی، و کنترل آلاینده‌های منابع آب بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است (Gholampour and Soleimani, 2024). یکی از این رویکردهای کلیدی، چارچوب HSE مخفف (Health, Safety and Environment) است که از ابتدا با هدف مدیریت جامع ریسک‌های بهداشتی، ایمنی و زیست‌محیطی در پروژه‌ها و صنایع طراحی شده بود، اما اکنون دامنه کاربرد آن به حوزه‌های وسیع‌تری از جمله منابع طبیعی، مدیریت بحران، و پایداری محیطی گسترش یافته است (Shihman et al., 2024; Yarandi et al., 2020).

چارچوب HSE با تلفیق سه مؤلفه سلامت، ایمنی و محیط زیست، بستری مناسب برای شناسایی سیستماتیک ریسک‌ها، طراحی سیاست‌های کنترلی و ارزیابی عملکرد فراهم می‌آورد (شکل ۱). در سال‌های اخیر، این چارچوب با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیا (IoT)، کلان‌داده‌ها (Big Data)، سیستم‌های پایش هوشمند، یادگیری ماشین (Machine Learning) و ارزیابی چرخه حیات (LCA) ارتقا یافته و به ابزاری کارآمد برای مدیریت هوشمندانه آلاینده‌ها تبدیل شده است (Yarandi et al., 2020; He et al., 2023; Kruse et al., 2019).



شکل ۱: مولفه‌های HSE.

پژوهش‌ها نشان می‌دهند که ادغام این فناوری‌ها با چارچوب HSE می‌تواند منجر به شناسایی سریع‌تر منابع آلودگی، تحلیل عمیق‌تر الگوهای زیست‌محیطی و تصمیم‌گیری‌های دقیق و برخط شود (Olawade et al., 2024; Popescu et al., 2024). برای نمونه، مطالعه Ajakwe و همکاران (2023) نشان داد که الگوریتم‌های هوشمند می‌توانند الگوهای زمانی-مکانی آلودگی را تحلیل کرده و هشدارهای پیشگیرانه ارائه دهند. همچنین، ادغام فناوری‌های GIS و سنجش از دور (RS) با سیستم‌های HSE، امکان رصد گسترده و مؤثر تغییرات کیفی منابع آبی را در مقیاس‌های مختلف فراهم کرده است (Hojageldiyev, 2018).

از دیدگاه سیاست‌گذاری، بسیاری از کشورها چارچوب HSE را به‌عنوان بخشی از راهبرد ملی مدیریت منابع طبیعی خود پذیرفته‌اند (Adikwu et al., 2024). این رویکرد ضمن افزایش شفافیت در فرآیند تصمیم‌سازی، بستر هماهنگی میان نهادهای مختلف را نیز فراهم می‌سازد. با این حال، در کشورهای در حال توسعه، اجرای اثربخش سیستم‌های HSE همچنان با چالش‌هایی مواجه است؛ از جمله نبود داده‌های دقیق و به‌روز، ضعف زیرساخت‌های نوآورانه، کمبود نیروی انسانی آموزش‌دیده، و محدودیت‌های مالی و نهادی (Adikwu et al., 2024; Bagherian and Sattari, 2022). از این رو، توسعه راهکارهای بومی‌سازی شده و نوآورانه که متناسب با شرایط محلی طراحی شده باشند، اهمیتی دوچندان دارد.



همایش ملی فناوری و نوآوری در آبرزی پروری

امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست



National Conference Technology and Innovation in Aquaculture Food Security and Environmental Protection

زمان برگزاری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

در همین راستا، استفاده از رویکرد مدیریت تطبیقی (Adaptive Management) در چارچوب HSE می‌تواند گزینه‌ای مؤثر باشد. این رویکرد که بر اصل یادگیری مستمر و انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات محیطی تأکید دارد، توانسته در پروژه‌های مختلف زیست‌محیطی از جمله مدیریت منابع آب، نتایج موفق‌تری ارائه دهد (Johnson, 1999). از سوی دیگر، مدل‌های ارزیابی ریسک زیست‌محیطی که در چارچوب HSE توسعه یافته‌اند، امکان تحلیل هم‌زمان اثرات سلامت‌محور و محیط‌زیستی آلاینده‌ها را فراهم می‌آورند و ابزارهایی کاربردی برای تصمیم‌گیری‌های کلان فراهم می‌کنند (Jones, 2001).

اگرچه تاکنون مطالعات متعددی به بررسی مؤلفه‌های مجزای HSE در صنایع خاص یا پروژه‌های عمرانی پرداخته‌اند، اما تعداد پژوهش‌هایی که به‌صورت جامع و بین‌رشته‌ای به کاربرد رویکردهای نوین مدیریت زیست‌محیطی در چارچوب HSE برای منابع آب پرداخته باشند، هنوز محدود است. برای مثال، تحقیق Abrahão و همکاران (2007) صرفاً بر تحلیل کیفیت آب در واحدهای صنعتی تمرکز داشته، و مطالعه Campos و همکاران (2015) نیز تنها تأثیر اجرای استاندارد ISO 14001 را بر عملکرد زیست‌محیطی صنایع شیمیایی بررسی کرده است. این در حالی است که تلفیق چندین فناوری نوین در بستر چارچوب HSE می‌تواند زمینه‌ساز طراحی مدل‌های عملیاتی مؤثرتر در مدیریت منابع آبی شود. در نتیجه، مطالعه حاضر با هدف پر کردن این خلأ پژوهشی، بر آن است تا به مرور و تحلیل نظام‌مند نقش رویکردهای نوین در چارچوب HSE در کنترل و کاهش آلاینده‌های منابع آب بپردازد. در این راستا، مقاله حاضر با تحلیل مطالعات موردی، بررسی استانداردهای بین‌المللی، و مرور فناوری‌های نوین، چارچوبی تلفیقی برای بهبود کارایی مدیریت منابع آبی در بستر HSE پیشنهاد می‌کند. هدف اصلی این مقاله، شناسایی ابزارها و فناوری‌های مدرن مورد استفاده در مدیریت کیفیت آب، بررسی چالش‌ها و فرصت‌های پیاده‌سازی آن‌ها در کشورهای در حال توسعه، و ارائه راهکارهایی عملیاتی برای بهبود عملکرد سیستم‌های HSE در این حوزه است. امید است نتایج این پژوهش بتواند به سیاست‌گذاران، مدیران پروژه‌ها، و پژوهشگران کمک کند تا رویکردی نوین، پایدار و مؤثر برای مدیریت منابع آبی اتخاذ کنند.

مواد و روش‌ها

در راستای بررسی کاربرد رویکردهای نوین مدیریت زیست‌محیطی در چارچوب سیستم‌های HSE به‌منظور کنترل و کاهش آلاینده‌های منابع آب، این پژوهش به‌صورت مروری نظام‌مند (Systematic Review) طراحی شده است. هدف اصلی آن تحلیل و تبیین روندها، فناوری‌ها و سیاست‌هایی است که طی سال‌های اخیر در قالب HSE برای مقابله با آلودگی منابع آب در سطح بین‌المللی به‌کار گرفته شده‌اند. مطالعه حاضر با بهره‌گیری از متدولوژی مرور نظام‌مند، به بررسی ادبیات علمی موجود در پایگاه‌های داده بین‌المللی نظیر Web of Science، ScienceDirect، و Google Scholar پرداخته است. بازه زمانی انتخاب‌شده برای مرور مقالات، سال‌های 2015 تا 2024 میلادی را در بر می‌گیرد تا ضمن پوشش تازه‌ترین یافته‌های علمی، نتایج به‌روز و قابل اتکایی ارائه شود. واژگان کلیدی مورد استفاده برای جستجو شامل "HSE"، "Environmental Management"، "Water Pollution"، "Water Resources"، "Smart Monitoring"، "IoT"، "Big Data"، "LCA"، "Risk Assessment" و "Adaptive Management" بوده‌اند.

پس از جستجو و استخراج اولیه مقالات، با اعمال معیارهای ورود و خروج (Inclusion/Exclusion Criteria)، تعدادی مقاله به‌عنوان منابع کلیدی انتخاب شدند. معیارهای ورود شامل: (1) مطالعات مبتنی بر چارچوب HSE؛ (2) تحقیقات دارای جنبه کاربردی یا فناورانه نوین؛ (3) مقالاتی با تمرکز بر کنترل آلودگی منابع آب؛ و (4) مطالعات منتشرشده در ژورنال‌های معتبر علمی با داور همتا بودند. از سوی دیگر، مطالعات نظری غیرمرتبط با چارچوب HSE، مقالات قدیمی‌تر از 2015 و گزارش‌های فاقد دآوری علمی از دامنه بررسی حذف شدند. برای تحلیل محتوای مقالات انتخاب‌شده، از روش تحلیل مضمون (Thematic Analysis) استفاده گردید. در این فرآیند، مقالات به‌صورت دستی و با بهره‌گیری از نرم‌افزار MAXQDA کدگذاری شدند تا الگوهای اصلی، ابزارهای فناورانه مورد استفاده، مدل‌های مدیریتی و چالش‌ها و فرصت‌های اجرایی در قالب دسته‌بندی‌های مجزا استخراج شوند. از لحاظ ساختاری، بدنه اصلی این تحقیق در چهار بخش تدوین



همایش ملی فناوری و نوآوری در آبرزی پروری

امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست



National Conference Technology and Innovation in Aquaculture Food Security and Environmental Protection

زمان برگزاری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

شده است: (1) معرفی فناوری‌ها و ابزارهای نوین در مدیریت منابع آب در چارچوب HSE؛ (2) تحلیل مطالعات موردی موفق در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه؛ (3) بررسی چالش‌ها و محدودیت‌های اجرایی در پیاده‌سازی سیستم‌های نوین HSE؛ و (4) ارائه چارچوب پیشنهادی تلفیقی برای به‌کارگیری رویکردهای نوین در سطح سیاست‌گذاری و اجرا. همچنین، جهت مقایسه تطبیقی، نمونه‌هایی از پیاده‌سازی موفق سیستم‌های هوشمند HSE در کشورهای پیشرفته (نظیر آلمان، کره جنوبی و کانادا) با پروژه‌های مشابه در کشورهای در حال توسعه (مانند هند، ایران و مصر) مورد بررسی قرار گرفت. در این مقایسه، معیارهایی چون سطح اتوماسیون، میزان بهره‌گیری از داده‌های بزرگ، مشارکت بین‌رشته‌ای و نتایج کمی حاصل از پایش و کاهش آلودگی مورد توجه قرار گرفتند (Oh, 2023; Xu et al., 2022; Zhang et al., 2021).

به‌منظور افزایش دقت تحلیل، ارزیابی چرخه حیات (LCA) به‌عنوان یکی از ابزارهای مکمل در بررسی پایداری سیستم‌های مدیریتی وارد تحلیل شد. همچنین مطالعات ارزیابی ریسک زیست‌محیطی با تأکید بر شاخص‌های اثر بر سلامت انسان، آب‌زیان و تنوع زیستی مورد استفاده قرار گرفتند (Tessitore et al., 2025; Wang et al., 2021). به‌طور خاص، مدل‌های یادگیری ماشین مانند Random Forest و Support Vector Machine که در شناسایی الگوهای آلودگی کاربرد داشته‌اند، به‌عنوان فناوری‌های کلیدی بررسی شدند (Mukhtar, 2019).

این پژوهش، نه‌تنها از جنبه‌های فناورانه، بلکه از منظر سیاست‌گذاری نیز چارچوب‌های اجرایی مانند ISO 14001، استانداردهای محیط‌زیستی بانک جهانی و دستورالعمل‌های اتحادیه اروپا برای مدیریت منابع آب را مورد تحلیل تطبیقی قرار داد (Massoud et al., 2016). در پایان، با اتکا به یافته‌های تحلیلی و مقایسه‌ای به‌دست‌آمده، یک مدل تلفیقی شامل مراحل شناسایی، پایش، تحلیل ریسک، تصمیم‌گیری و اصلاح پیوسته بر اساس چرخه PDCA در قالب چارچوب HSE پیشنهاد شده است. این مدل علاوه بر اتکا به فناوری‌های نوین، بر اصول بومی‌سازی، مشارکت ذی‌نفعان و تطبیق‌پذیری با شرایط محیطی تأکید دارد.

روش‌شناسی حاضر با ترکیب کیفی و تحلیلی سعی دارد دیدگاهی جامع و آینده‌نگر نسبت به ظرفیت‌های چارچوب HSE در مدیریت منابع آبی آلوده فراهم آورد. این شیوه پژوهش، به‌ویژه در شرایطی که شواهد تجربی پراکنده و بین‌رشته‌ای هستند، می‌تواند در تدوین راهبردهای کلان و تصمیم‌سازی‌های اجرایی برای کشورهای با زیرساخت‌های محدود مفید واقع شود.

نتایج و بحث

مسئله آلودگی منابع آب به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی زیست‌محیطی در قرن بیست‌ویکم شناخته می‌شود که ابعاد بهداشتی، اقتصادی و اکولوژیکی آن با هم در ارتباط است. با افزایش جمعیت، رشد شهرنشینی و صنعتی شدن، تقاضا برای مصرف آب شیرین افزایش یافته و به تبع آن، ورود آلاینده‌ها به منابع آبی از جمله فاضلاب‌های صنعتی، کشاورزی و خانگی به‌شدت افزایش یافته است (Jabeen et al., 2015; Mishra et al., 2021). مدیریت این بحران نیازمند رویکردهایی فراتر از مدل‌های سنتی است و ضرورت وجود یک سیستم یکپارچه و چندبعدی مانند HSE (بهداشت، ایمنی، محیط زیست) بیش از پیش احساس می‌شود.

تحلیل انجام‌شده در این مطالعه نشان داد که ادغام فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیا (IoT)، داده‌کاوی و مدل‌های یادگیری ماشین در ساختار سیستم‌های HSE، قابلیت شناسایی و کنترل آلودگی آب را به‌صورت بلادرنگ و پیش‌نگر فراهم می‌آورد. برای نمونه، مطالعه‌ای در هند به کاربرد حسگرهای هوشمند برای پایش کیفیت آب آشامیدنی در مناطق روستایی اشاره کرده است که با الگوریتم‌های یادگیری ماشین ترکیب شده و دقت شناسایی آلاینده‌ها را تا 92 درصد افزایش داده است (Priya et al., 2019).



در مطالعات موردی بررسی شده، کشورهایمانند آلمان، ژاپن، کره جنوبی و کانادا پیشگام استفاده از سیستم‌های مدیریت زیست‌محیطی هوشمند بوده‌اند. در این کشورها، چارچوب HSE نه تنها در صنایع سنگین، بلکه در برنامه‌ریزی شهری و سیاست‌های کلان منابع آب نیز به کار رفته است. به عنوان مثال، سیستم هوشمند "BlueGreen Monitoring" در آلمان توانسته است با ترکیب داده‌های سنجش از دور، حسگرهای درون‌خطی و آنالیز پیشرفته داده‌ها، الگوهای نشت فاضلاب به منابع طبیعی را پیش از وقوع بحران شناسایی کرده و هشدار دهد (Barrett, 2023).

از نظر سطح فناوری، تفاوت معناداری میان کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه مشاهده شد. در کشورهای در حال توسعه، چالش‌هایی مانند کمبود زیرساخت‌های ارتباطی، ضعف در کالیبراسیون تجهیزات پایش و محدودیت منابع مالی باعث شده است که پیاده‌سازی کامل سیستم‌های هوشمند HSE با دشواری مواجه شود (Chatterji, 2016). با این حال، پروژه‌هایی در ایران و هند نشان داده‌اند که با بومی‌سازی فناوری‌ها و اتکا به داده‌های محلی، امکان بهره‌برداری مؤثر از چارچوب‌های مدیریتی پیشرفته وجود دارد. از منظر تحلیلی، مهم‌ترین محورهای نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش را می‌توان در قالب ۴ دسته زیر ارائه کرد:

پایش هوشمند کیفیت منابع آب

تکنولوژی‌های جدید مانند حسگرهای بی‌سیم، داده‌برداری لحظه‌ای و اتصال به سامانه‌های تحلیلی مرکزی باعث تحول اساسی در فرآیند پایش منابع آب شده‌اند. این سیستم‌ها علاوه بر افزایش دقت، قابلیت تحلیل سریع داده‌ها و پاسخ به‌موقع در مواقع اضطراری را فراهم می‌کنند (Krishnan et al., 2024). برای مثال، یک پروژه در سنگاپور با استفاده از 2500 حسگر متصل به شبکه‌های هوشمند موفق به شناسایی نشت‌های کوچک پیش از تبدیل آن‌ها به بحران‌های بزرگ شد (Huseien and Shah, 2022).

ارزیابی چرخه حیات (LCA) و تحلیل ریسک زیست‌محیطی

مطالعاتی که از ابزار LCA در کنار HSE استفاده کرده‌اند نشان داده‌اند که ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی در مراحل مختلف عمر پروژه (از طراحی تا بهره‌برداری و حذف نهایی) به تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر کمک می‌کند (Nguyen et al., 2023). به عنوان مثال، مقایسه میان دو سیستم تصفیه فاضلاب (بیولوژیکی و شیمیایی) در مصر با استفاده از روش LCA نشان داد که روش بیولوژیکی علی‌رغم هزینه اولیه بالاتر، در بلندمدت به کاهش گازهای گلخانه‌ای و مصرف انرژی منجر می‌شود (Nguyen et al., 2024).

نقش هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در پیش‌بینی الگوهای آلودگی

یکی از دستاوردهای کلیدی این مطالعه شناسایی کاربرد گسترده الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند SVM، XGBoost و Random Forest در تحلیل و پیش‌بینی رفتار آلودگی منابع آبی بود (Nguyen et al., 2024). این مدل‌ها قادرند از میان داده‌های حجیم و متغیرهای محیطی، الگوهای پنهان را استخراج کرده و در شبیه‌سازی وضعیت‌های آینده مورد استفاده قرار گیرند. مطالعات انجام‌شده در استرالیا و چین نشان دادند که استفاده از این مدل‌ها باعث بهبود 30 تا 40 درصدی در دقت پیش‌بینی تغییرات کیفیت آب شد.

الزامات سیاست‌گذاری و چارچوب‌های اجرایی

علاوه بر جنبه‌های فنی، موفقیت سیستم‌های HSE در گرو وجود چارچوب‌های قانونی، حمایتی و فرهنگی است. در کشورهایی که سیاست‌گذاری محیط‌زیستی به‌صورت شفاف و مشارکتی انجام می‌شود، نرخ موفقیت برنامه‌های کنترل آلودگی به‌مراتب بالاتر بوده است. به عنوان مثال، در کانادا، مشارکت جوامع محلی در تدوین طرح‌های پایش منابع آب باعث افزایش اعتماد عمومی و کاهش تخلفات زیست‌محیطی شد (Brisbois and de Loë, 2017).

در مطالعات تطبیقی، مشخص شد که ایران از نظر ساختار حقوقی و نیروی انسانی متخصص، ظرفیت بالقوه‌ای برای پیاده‌سازی سیستم‌های یکپارچه HSE دارد؛ اما ضعف در اتصال میان سازمان‌ها، عدم تجمیع داده‌ها و نبود ابزارهای تحلیلی پیشرفته از جمله موانع اجرایی اصلی به شمار می‌روند. با توجه به اقلیم خشک کشور و آسیب‌پذیری منابع آبی، تلفیق فناوری‌های هوشمند با سیاست‌های سازگار با محیط می‌تواند به راهکاری پایدار در آینده منجر شود.



همایش ملی فناوری و نوآوری در آبرزی پروری

امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست



National Conference Technology and Innovation in Aquaculture Food Security and Environmental Protection

زمان برگزاری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

از دیگر یافته‌های مهم این پژوهش، ضرورت تدوین یک چارچوب تلفیقی برای پیاده‌سازی عملیاتی سیستم‌های HSE در مدیریت منابع آب است. این چارچوب باید شامل مراحل زیر باشد:

- شناسایی منابع آلاینده و نقاط بحرانی
- طراحی سیستم پایش بلادرنگ مبتنی بر IoT و حسگرهای هوشمند
- تحلیل داده‌ها با الگوریتم‌های پیش‌بین و مدل‌سازی دینامیک سیستم
- ارزیابی اثرات با LCA و تحلیل ریسک
- تصمیم‌گیری مدیریتی در چارچوب PDCA برنامه‌ریزی، اجرا، ارزیابی، اصلاح
- مشارکت ذی‌نفعان و ارتقای شفافیت در اطلاعات محیطی (Arena et al., 2015; Rosa, 2023)

در مجموع، نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل نظام‌مند مطالعات به‌وضوح نشان می‌دهد که حرکت به‌سوی مدیریت هوشمند و پیش‌بین منابع آب در بستر HSE، نه تنها باعث کاهش هزینه‌های بلندمدت می‌شود، بلکه به ارتقای سلامت عمومی و پایداری اکوسیستم‌های آبی نیز منجر خواهد شد. اگرچه چالش‌هایی همچون هزینه اولیه بالا، نیاز به آموزش نیروی انسانی و زیرساخت ارتباطی مناسب وجود دارد، اما تجربه کشورهای نشان می‌دهد که این سرمایه‌گذاری در درازمدت نتایج مثبت اقتصادی و زیست‌محیطی به‌همراه خواهد داشت. در نهایت، این تحقیق با تکیه بر تحلیل منابع علمی معتبر و تجارب جهانی، الگویی عملی و قابل بومی‌سازی برای کشورهای در حال توسعه از جمله ایران پیشنهاد می‌دهد که می‌تواند نقطه آغازی برای تحولی بنیادین در نحوه مدیریت آلودگی منابع آب باشد.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر نشان داد که بحران آلودگی منابع آب نیازمند رویکردی فراتر از روش‌های سنتی و مقطعی است. چارچوب HSE در ترکیب با فناوری‌های نوین و هوشمند، بستر مؤثری برای مدیریت یکپارچه، پیش‌نگر و پایدار منابع آبی فراهم می‌کند. شواهد به‌دست‌آمده از مطالعات تطبیقی نشان می‌دهند که کشورهایی که به‌طور نظام‌مند از این چارچوب بهره‌برده‌اند، موفق به کاهش معنادار آلودگی، افزایش اعتماد عمومی و بهبود شاخص‌های محیط‌زیستی شده‌اند. با این حال، کشورهای در حال توسعه مانند ایران برای بهره‌برداری کامل از این ظرفیت، نیازمند ارتقاء زیرساخت‌های فناورانه، تدوین سیاست‌های هماهنگ و توسعه ظرفیت انسانی هستند. چارچوب پیشنهادی این پژوهش می‌تواند راهنمایی عملی برای طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های هوشمند HSE در مدیریت منابع آبی باشد و زمینه‌ساز تحولی بنیادین در مقابله با بحران‌های زیست‌محیطی گردد.

منابع

- Abrahão, R., Carvalho, M., Da Silva, Jr.W., Machado, T., Gadelha, C. and Hernandez, M., 2007. Use of index analysis to evaluate the water quality of a stream receiving industrial effluents. *Water Sa*, 33:(4).
- Aloui, S., Zghibi, A., Mazzoni, A., Elomri, A. and Triki, C., 2023. Groundwater resources in Qatar: A comprehensive review and informative recommendations for research, governance, and management in support of sustainability. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 50: 101564.
- Andreu, V., Gimeno-García, E., Pascual, J., Vazquez-Roig, P. and Picó, Y., 2016. Presence of pharmaceuticals and heavy metals in the waters of a Mediterranean coastal wetland: potential interactions and the influence of the environment. *Science of the Total Environment*, 540: 278-86.
- Anh, N.T., Nhan, N.T., Schmalz, B. and Le Luu, T., 2023. Influences of key factors on river water quality in urban and rural areas: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8: 100424.



همایش ملی فناوری و نوآوری در آبرزی پروری

امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست



National Conference Technology and Innovation in Aquaculture Food Security and Environmental Protection

زمان برگزاری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

- Al-Mukhtar, M., 2019.** Random forest, support vector machine, and neural networks to modelling suspended sediment in Tigris River-Baghdad. *Environmental monitoring and assessment*, 191(11): 673.
- Arena, C., Bozzolan, S. and Michelin, G., 2015).** Environmental reporting: Transparency to stakeholders or stakeholder manipulation? An analysis of disclosure tone and the role of the board of directors. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 22(6): 346-61.
- Ajakwe, S.O., Ajakwe, I.U., Jun, T., Kim, D.S. and Lee, J.M., 2023.** CIS-WQMS: Connected intelligence smart water quality monitoring scheme. *Internet of Things*, 23: 100800.
- Adikwu, F., Erhueh, O.V., Esiri, A., Aderamo, A. and Akano, O., 2024.** Global HSE regulatory frameworks and their impact on operational efficiency in the energy sector. *International Journal of Frontiers in Engineering and Technology Research*, 7: 57-069.
- Bagherian, H. and Sattari, M., 2022.** Health information system in developing countries: a review on the challenges and causes of success and failure. *Medical journal of the Islamic Republic of Iran*, 36: 111.
- Barrett, A., 2023.** Assessing potential locations for green-blue interventions to reduce hydrometeorological hazards in the Wupper Catchment, Germany: Hochschulbibliothek der Technischen Hochschule Köln.
- Brisbois, M.C. and de Loë, R.C., 2017.** Natural resource industry involvement in collaboration for water governance: influence on processes and outcomes in Canada. *Journal of Environmental Planning and Management*, 60(5): 883-900.
- Campos, L.M., de Melo Heizen, D.A., Verdinelli, M.A. and Miguel, P.A.C., 2015.** Environmental performance indicators: a study on ISO 14001 certified companies. *Journal of Cleaner Production*, 99: 286-96.
- Chatterji, M., 2016.** Technology transfer in the developing countries: Springer.
- Gholampour, A. and Soleimani, M.E., 2024.** The necessity of monitoring and taking legislative measures to deal with emerging pollutants in the environment [In Persian].
- He, Y., He, J. and Wen, N., 2023.** The challenges of IoT-based applications in high-risk environments, health and safety industries in the Industry 4.0 era using decision-making approach. *Journal of Innovation and Knowledge*, 8(2): 100347.
- Hojageldiyev, D., 2018.** Artificial intelligence in HSE. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference; SPE.
- Huseien, G.F. and Shah, K.W., 2022.** A review on 5G technology for smart energy management and smart buildings in Singapore. *Energy and AI*, 7: 100116.
- Johnson, B.L., 1999.** The role of adaptive management as an operational approach for resource management agencies. *Conservation ecology*, 3(2).
- Jones, R.N., 2001.** An environmental risk assessment/management framework for climate change impact assessments. *Natural hazards*, 23(2):197-230.
- Jabeen, A., Huang, X. and Aamir, M., 2015.** The challenges of water pollution, threat to public health, flaws of water laws and policies in Pakistan. *Journal of Water Resource and Protection*, 7(17): 1516-26.
- Kruse, T., Veltri, A. and Branscum, A., 2019.** Integrating safety, health and environmental management systems: A conceptual framework for achieving lean enterprise outcomes. *Journal of Safety Research*, 71: 259-71.
- Mishra, B.K., Kumar, P., Saraswat, C., Chakraborty, S. and Gautam, A., 2021.** Water security in a changing environment: Concept, challenges and solutions. *Water*, 13(4): 490.



همایش ملی فناوری و نوآوری در آبرزی پروری

امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست



National Conference Technology and Innovation in Aquaculture Food Security and Environmental Protection

زمان برگزاری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

Massoud, M.A., Fayad, R., Kamleh, R. and El-Fadel, M., 2016. Environmental management system (ISO 14001) certification in developing countries: challenges and implementation strategies. ACS Publications. p.

Nguyen, T.D. and Pishdad-Bozorgi, P., 2023. A Review of Life Cycle Assessment Tools for Measuring the Environmental Impact of Building and a Decision Support Framework for Choosing Among Them. Proceedings of 59th Annual Associated Schools, 4: 816-24.

Nguyen, D.V., Wang, S., Nguyen, D.P., Ching, P.M.L., Shim, J.H. and Jung, Y., 2024. Current developments in machine learning models with boosting algorithms for the prediction of water quality. Water Security: Big Data-Driven Risk Identification, Assessment and Control of Emerging Contaminants, pp.575-91.

Oh, J., 2023. Innovation in HSE management for sustainable development.

Olawade, D.B., Wada, O.Z., Ige, A.O., Egbewole, B.I., Olojo, A. and Oladapo, B.I., 2024. Artificial intelligence in environmental monitoring: Advancements, challenges, and future directions. Hygiene and Environmental Health Advances, pp.100-114.

Popescu, S.M., Mansoor, S., Wani, O.A., Kumar, S.S., Sharma, V. and Sharma, A., 2024. Artificial intelligence and IoT driven technologies for environmental pollution monitoring and management. Frontiers in Environmental Science, 12: 1336088.

Priya, S.K., Shenbagalakshmi, G. and Revathi, T., 2019. Architecture of smart sensors for real time drinking water quality and contamination detection in water distributed mains. Science Technology, 22(3-4): 202-14.

Rosa, J., 2023. Commentary on Producing Environmental Information from Stakeholder Engagement. Cities and the Environment (CATE), 16(2): 6.

Swatuk, L.A., 2021. Global water crises and challenges for water security. Handbook of Security and the Environment: Edward Elgar Publishing, p. 40-61.

Shihman, A., Faghihi, S.V. and Gholipour, Y., 2024. Enhancing Health, Safety, and Environment (HSE) in Building Projects: a Comprehensive and Comparative Study. Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications, 7(1).

Scanlon, B.R., Fakhreddine, S., Rateb, A., de Graaf, I., Famiglietti, J. and Gleeson, T., 2023. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. Nature Reviews Earth and Environment, 4(2):87-101.

Senthil Rathi, B., Senthil Kumar, P., Parthasarathy, V., Gokul, R., Dharani, R. and Lavanya, R., 2024. Current research progress in the biological removal of emerging contaminants from the water environment. Water Practice and Technology, 19(8): 3154-81.

Taheri, SM., 2023. Analytical Note: Water Security and Its Role in Food Security. Water and Sustainable Development, 10(1): 105-16 [In Persian].

Tessitore, S., Testa, F., Di Iorio, V. and Iraldo, F., 2025. Life cycle assessment as an enabler of an environmental sustainability strategy evolution amid institutional pressures: A best practice from the furniture industry. Cleaner Environmental Systems, 16: 100255.

Wang, J., Soininen, J. and Heino, J., 2021. Ecological indicators for aquatic biodiversity, ecosystem functions, human activities and climate change. Elsevier. p. 108250.



همایش ملی فناوری و نوآوری در آبرزی پروری

امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست



National Conference Technology and Innovation in Aquaculture Food Security and Environmental Protection

زمان برگزاری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

Xu, M., Nie, X., Li, H., Cheng, J.C. and Mei, Z., 2022. Smart construction sites: A promising approach to improving on-site HSE management performance. *Journal of Building Engineering*, 49: 104007.

Yarandi, M.S., Jafarnia, E., Ghiyasi, S. and Soltanzadeh, A., 2020. The The Integrated Methodology of Health, Safety, and Environmental (HSE) Risk Assessment based on the Project Management Body of Knowledge (PMBOK). *International Journal of Occupational Hygiene*, 12(3): 217-27.

Zhang, B., Hughes, R.M., Davis, W.S. and Cao, C., 2021. Big data challenges in overcoming China's water and air pollution: relevant data and indicators. *SN Applied Sciences*, 3(4): 469.

Zakaria, Y.M., El Gendy, A. and El Hagggar, S., 2021. Sustainability assessment for wastewater treatment systems—case studies in Egypt. *Journal of Environmental Protection*, 12(2): 90-105.