



راستی علوم مهندسی مدیریت سیستمی پایا

دوره ۱ | شماره ۱ | زمستان ۱۴۰۴

عناوين مقالات

- تعیین حریم ایمن یک واحد صنعتی بهمنظور انتشار آلاینده‌های هوا
- طراحی مدل‌های مبتنی بر یادگیری عمیق برای تفکیک هوشمند پسماند با رویکردهای تکمیل چسبی و چندبرچسبی
- نقش گونه‌های شاخص ماکروبنتیک به‌عنوان ابزارهای زیستی در ارزیابی سلامت اکوسیستم‌های دریایی
- مدیریت پایدار پل‌های خورشیدی در چارچوب اقتصاد چرخشی
- بررسی نقش متغیرهای پنهان و تعاملات گونه‌ای در مدل‌سازی پراکنش مشترک گونه‌های ماهی در رودخانه‌های حوضه جنوبی دریای خزر
- ارزیابی تطبیقی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهر تهران با استانداردهای بین‌المللی
- بررسی تعامل مؤلفه‌های آسایش بصری در ساختمان‌ها و تأثیر آن بر عملکرد پایدار
- حذف نیترات از منابع آب آلوده با دینتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر پیریت



انجمن مہندی و ہیرت سناہ ایران



**Iranian Solid
Waste Association**





فصلنامه راهبردهای علوم مهندسی
و مدیریت سیستم های پایدار
Journal of Strategies of Engineering Sciences
and Sustainable Systems Management

شناسنامه نشریه

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مدیر مسئول: دکتر محمدجواد امیری

سر دبیر: دکتر عبدالرضا کرباسی

مدیر داخلی: دکتر مهناز جدیدی

دبیران تخصصی: دکتر جهانبخش بالیست و دکتر امیرعلی برومند

مشاور: دکتر مسعود نصوری

اعضای هیئت تحریریه:

دکتر ناصر مهرداد - استاد دانشگاه تهران / دکتر غلامرضا نبی بیدهندی - استاد دانشگاه تهران / دکتر عبدالرضا کرباسی - استاد دانشگاه تهران / دکتر محمدجواد امیری - دانشیار دانشگاه تهران / دکتر شهناز دانش - استاد دانشگاه فردوسی مشهد / دکتر سید محسن حسینی - استاد دانشگاه تربیت مدرس / دکتر کامران داوری - استاد، دانشگاه فردوسی مشهد / دکتر افشین تکدستان - استاد دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی جندی شاپور اهواز / دکتر محمودرضا همای - استاد دانشگاه صنعتی اصفهان / دکتر علی اسدی - استاد، دانشگاه تهران / دکتر مسعود صدری نسب - دانشیار دانشگاه تهران / دکتر محمدحسین نیک سخن - استاد، دانشگاه تهران / دکتر بهروز بهنام - دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر / دکتر محمد کابلی - استاد، دانشگاه تهران / دکتر علیرضا زراسوندی - استاد دانشگاه شهید چمران / دکتر کمال الدین ناصری - دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد / دکتر مسعود رضایی - استاد، دانشگاه تربیت مدرس / دکتر عباس بانج شفیعی - استاد، دانشگاه ارومیه / دکتر حسن دارابی - دانشیار دانشگاه تهران / دکتر لعبت زبردست - دانشیار، دانشگاه تهران / دکتر مرجان محمدزاده - دانشیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان / دکتر مهدی جلیلی قاضی زاده - دانشیار دانشگاه شهید بهشتی / دکتر حمیدرضا پورخباز - دانشیار دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان / دکتر کیومرث سفیدی - استاد دانشگاه محقق اردبیلی / دکتر محمدرضا اختصاصی - استاد دانشگاه یزد / دکتر نقی شعبانیان - دانشیار دانشگاه گیلان / دکتر مرتضی قبادی - دانشیار دانشگاه لرستان / دکتر حسین رحمانی - دانشیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری / دکتر بهمن جباریان امیری - دانشیار دانشگاه لودز، لهستان / دکتر بابک نعیمی - محقق ارشد دانشگاه اوتراخت هلند / دکتر ادوین صفری - استادیار دانشگاه تورنتو، کانادا / دکتر محسن سعیدی - استاد، دانشگاه بریتیش کلمبیا، کانادا / دکتر مهرداد نظری ها - استادیار دانشگاه HDR اتاوا، کانادا

ویراستار انگلیسی: دکتر محمد علوی – استاد دانشگاه تهران

ویراستار علمی: دکتر رودابه سمیعی زفرقندی ویراستار ادبی: دکتر فاطمه زارع شیخکلانی

گرافیسیت: مهندس حامد احمدی کارشناس اجرایی: مهندس سحر بیدختی صفحه آرا: منیژه شیرمحمدی

مقالات نمودار آرای نویسندگان است و به ترتیب وصول و تصویب درج می‌شود.

این فصلنامه با حمایت انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران منتشر می‌شود.

به موجب ماده ۱۳ قانون مطبوعات مصوب ۱۳۶۸/۱۲/۲۸ مجلس شورای اسلامی پروانه انتشار راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم‌های پایدار به زبان‌های فارسی و انگلیسی به صورت فصلنامه به شماره ثبت ۹۹۸۶۲ صادر گردید.

نشانی: تهران، خیابان انقلاب، خیابان قدس، نبش کوچه دکتر عبدالحسین زرین‌کوب، پلاک ۱۵، اتاق ۳۰۳

آدرس سامانه نشریه: www.jsesm.ir

تلفن: ۰۲۱۶۱۱۱۳۱۷۷ / کد پستی: ۱۴۱۷۸۵۳۱۱۱ / پست الکترونیکی: jsesssm@gmail.com

این مجله در پایگاه‌های زیر نمایه می‌شود:

پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)

Google Scholar

اسلام‌الرحمن

فصلنامه راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم‌های پایدار

(نشریه علمی)

سال اول، شماره اول، زمستان ۱۴۰۴

اهداف و چشم انداز

نشریه راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم‌های پایدار با هدف توسعه مرزهای دانش، ترویج پژوهش‌های نوآورانه و فراهم‌سازی بستری علمی برای تبادل اندیشه‌ها و دستاوردهای پژوهشی در حوزه‌های مهندسی، مدیریت و پایداری تأسیس شده است. این نشریه می‌کوشد از طریق انتشار مقالات علمی اصیل، کاربردی و میان‌رشته‌ای، به شناسایی و ارائه راهکارهای مؤثر برای مواجهه با چالش‌های پیچیده توسعه پایدار در سطوح محلی، ملی و جهانی کمک نماید. همچنین ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری، سیاست‌گذاری و مدیریت در سازمان‌ها، صنایع و جوامع از طریق بهره‌گیری از یافته‌های علمی معتبر از مهم‌ترین اهداف این نشریه به شمار می‌آید.

این نشریه با رویکردی نظام‌مند و آینده‌نگر، بر توسعه دانش در حوزه‌هایی نظیر مهندسی سیستم‌های پایدار، مدیریت منابع، فناوری‌های نوین، تحول دیجیتال، انرژی‌های تجدیدپذیر، مدیریت ریسک و تاب‌آوری، حکمرانی پایدار، اقتصاد چرخشی و نوآوری‌های فناورانه تمرکز دارد. از این رو، تلاش می‌کند زمینه تعامل مؤثر میان پژوهشگران، متخصصان، مدیران، سیاست‌گذاران و فعالان صنعتی را فراهم ساخته و با حمایت از پژوهش‌های میان‌رشته‌ای، شکاف میان دانش نظری و کاربردهای عملی را کاهش دهد. نشریه همچنین انتشار پژوهش‌هایی را در اولویت قرار می‌دهد که به حل مسائل واقعی جامعه و تحقق اهداف توسعه پایدار کمک می‌کنند.

چشم‌انداز نشریه آن است که در افق پیش‌رو به یکی از مراجع علمی معتبر و اثرگذار در حوزه علوم مهندسی و مدیریت سیستم‌های پایدار در سطح ملی و منطقه‌ای تبدیل شود و با نمایه‌سازی در پایگاه‌های معتبر بین‌المللی، نقش مؤثری در جریان‌سازی علمی و تولید دانش مرجع ایفا نماید. این نشریه درصدد است با حفظ استانداردهای بالای علمی، اخلاق پژوهش و کیفیت داوری، به مرکزی برای انتشار پژوهش‌های پیشرو و تأثیرگذار تبدیل شده و در شکل‌دهی به رویکردهای نوین مهندسی، مدیریتی و سیاستی برای دستیابی به آینده‌ای پایدار، هوشمند و تاب‌آور سهمی مؤثر داشته باشد.

محورهای موضوعی

این نشریه از مقالات پژوهشی، مروری، مطالعه موردی و کاربردی در حوزه‌های موضوعی زیر استقبال می‌کند:

۱. تفکر سیستمی، تاب‌آوری و مهندسی پایداری
۲. ارزیابی محیط‌زیستی (اثرات توسعه، توان سرزمین، ارزیابی راهبردی و چرخه حیات)
۳. پایش، مدیریت و مهندسی محیط‌زیست
۴. تغییر اقلیم، مدیریت مخاطرات و راهکارهای مبتنی بر طبیعت
۵. منابع آب، اکوسیستم‌ها، تنوع زیستی و محیط‌زیست دریایی
۶. انرژی‌های تجدیدپذیر، بهره‌وری انرژی و سامانه‌های کم‌کربن
۷. اقتصاد محیط‌زیست، اقتصاد چرخشی، مدیریت پسماند و تولید و مصرف پایدار
۸. فناوری‌های نوین (هوش مصنوعی، علوم داده، IoT، GIS و سنجش از دور)
۹. برنامه‌ریزی شهری، زیرساخت‌های سبز، معماری و عمران پایدار
۱۰. صنایع پایدار (نفت، گاز، معدن، پتروشیمی، HSE و زنجیره تأمین)
۱۱. حکمرانی، سیاست‌گذاری، نوآوری و کسب‌وکارهای پایدار
۱۲. ابعاد اجتماعی پایداری (آموزش، اخلاق، عدالت محیط‌زیستی، سلامت و مشارکت ذی‌نفعان)

راهنمای تدوین و نحوه ارسال مقاله

دامنه و اهداف نشریه

فصلنامه راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم‌های پایدار به انتشار مقالات پژوهشی اصیل، نوآورانه و مبتنی بر روش‌های علمی معتبر در حوزه علوم مهندسی، مدیریت سیستم‌های پایدار، محیط‌زیست، توسعه پایدار، حکمرانی، برنامه‌ریزی، فناوری‌های نوین و سایر موضوعات میان‌رشته‌ای مرتبط می‌پردازد. این نشریه از مقالاتی استقبال می‌کند که ضمن برخورداری از کیفیت علمی مناسب، دارای نوآوری نظری یا کاربردی بوده و بتوانند به توسعه دانش، ارائه راهکارهای مدیریتی و حل مسائل واقعی در حوزه‌های تخصصی نشریه کمک کنند.

شرایط ارسال مقاله

تمامی مقالات باید حاصل پژوهش اصیل نویسندگان بوده و پیش از این در هیچ نشریه، کتاب یا مجموعه مقالات منتشر نشده باشند و هم‌زمان نیز در فرآیند بررسی نشریه دیگری قرار نداشته باشند. مسئولیت اصالت علمی، صحت داده‌ها، رعایت اصول اخلاق پژوهش و پاسخگویی در برابر هرگونه تخلف علمی بر عهده نویسندگان است. ارسال مقاله صرفاً از طریق سامانه الکترونیکی نشریه انجام می‌شود و مقاله پس از بررسی اولیه از نظر انطباق با حوزه موضوعی، ساختار علمی و رعایت اصول نگارشی وارد فرآیند داوری خواهد شد.

فرآیند داوری

نشریه از نظام داوری دوسو ناشناس (Double-Blind Peer Review) استفاده می‌کند. بر این اساس، هویت نویسندگان و داوران در تمام مراحل داوری محرمانه باقی می‌ماند. به همین دلیل فایل اصلی مقاله نباید شامل نام نویسندگان، وابستگی سازمانی، قدرانی، اطلاعات مالی یا هرگونه مشخصه‌ای باشد که امکان شناسایی نویسندگان را فراهم کند. تصمیم نهایی درباره پذیرش، اصلاح یا رد مقاله بر اساس نظر هیئت تحریریه و داوران متخصص اتخاذ خواهد شد.

ساختار مقاله

مقاله باید از ساختاری منظم و استاندارد برخوردار باشد و شامل عنوان مقاله، چکیده، کلیدواژه‌ها، مقدمه، روش‌شناسی پژوهش، یافته‌ها و بحث، نتیجه‌گیری و منابع باشد. در بخش مقدمه، مسئله پژوهش، ضرورت انجام مطالعه، پیشینه پژوهش و اهداف یا پرسش‌های تحقیق باید به‌صورت منسجم تشریح شوند. بخش روش‌شناسی باید اطلاعات کافی درباره طرح پژوهش، جامعه آماری، نمونه، ابزار گردآوری داده‌ها، روش تحلیل و ملاحظات اخلاقی ارائه کند. یافته‌ها باید به‌صورت دقیق و مستند گزارش شوند و در بخش بحث، نتایج با مطالعات پیشین مقایسه و تفسیر شوند. نتیجه‌گیری نیز باید شامل جمع‌بندی یافته‌ها، پیامدهای نظری و کاربردی، محدودیت‌های پژوهش و پیشنهادهایی برای مطالعات آینده باشد.

چکیده و کلیدواژه‌ها

چکیده فارسی باید به‌صورت ساختاریافته و در قالب یک پاراگراف منسجم، بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ واژه تنظیم شود و شامل هدف، روش پژوهش، یافته‌های اصلی و نتیجه‌گیری باشد. از بیان مطالب کلی، ارجاع به منابع، استفاده از اختصارات و ذکر اطلاعات غیرضروری در چکیده خودداری شود. همچنین ارائه چکیده مبسوط انگلیسی بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ واژه الزامی است. این چکیده باید شامل بخش‌های Method, Introduction, Results و Conclusions بوده و ترجمه‌ای دقیق و تخصصی از محتوای مقاله ارائه دهد. برای هر مقاله سه تا پنج کلیدواژه فارسی به همراه معادل دقیق انگلیسی آنها انتخاب شود.

قالب‌بندی مقاله

حداکثر حجم مقاله، شامل تمامی بخش‌ها از جمله چکیده‌ها، جداول، شکل‌ها و منابع، نباید از ۱۵ صفحه تجاوز کند. متن فارسی مقاله باید با قلم B Nazanin اندازه ۱۳ و متن انگلیسی با قلم Times New Roman اندازه ۱۱، با فاصله خطوط Single

و به صورت Justify تنظیم شود. عنوان بخش‌های اصلی با قلم B Titr اندازه ۱۲ و زیرعنوان‌ها با همان قلم در اندازه ۱۱ نوشته شوند. در متن مقاله از شماره‌گذاری عناوین اجتناب شود و نگارش مطابق دستور خط فارسی و با استفاده صحیح از نیم‌فاصله انجام گیرد.

جداول، شکل‌ها و روابط ریاضی

تمامی جدول‌ها، نمودارها، نقشه‌ها، تصاویر و سایر اشکال باید دارای شماره و عنوان بوده و به‌ترتیب ظهور در متن شماره‌گذاری شوند. عنوان جدول‌ها در بالای جدول و عنوان شکل‌ها در پایین آنها درج شود و در متن مقاله نیز به تمامی آنها ارجاع داده شود. کیفیت تصاویر باید برای چاپ مناسب بوده و در صورت اقتباس از منابع دیگر، منبع مربوطه مطابق شیوه‌نامه استنادی ذکر شود. روابط ریاضی نیز باید با استفاده از ابزار Microsoft Equation تهیه شده و به‌ترتیب شماره‌گذاری شوند.

شیوه استناد و منابع

استنادهای درون‌متنی و فهرست منابع باید مطابق آخرین ویرایش شیوه‌نامه انجمن روان‌شناسی آمریکا (APA, 7th Edition) تنظیم شوند. تمامی منابع مورد استفاده باید در متن مقاله مورد استناد قرار گرفته باشند و هیچ منبعی بدون ارجاع در متن در فهرست منابع درج نشود. منابع فارسی علاوه بر درج در بخش منابع فارسی، باید در قسمت References نیز به زبان انگلیسی ترجمه شده و در پایان آنها عبارت [In Persian] ذکر شود. نویسندگان مسئول صحت و کامل بودن اطلاعات کتاب‌شناختی تمامی منابع هستند.

مدارک مورد نیاز برای ارسال

در زمان ارسال مقاله، چهار فایل مستقل باید در سامانه بارگذاری شود. این فایل‌ها شامل نسخه اصلی مقاله بدون مشخصات نویسندگان، فایل مشخصات نویسندگان، فرم تعهد نویسندگان و فرم تعارض منافع هستند. عدم ارسال هر یک از این مدارک موجب ناقص تلقی شدن فرآیند ارسال مقاله خواهد شد.

ملاحظات اخلاقی و حقوق نشر

تمامی مقالات باید مطابق اصول اخلاق در انتشار آثار علمی تهیه شوند. هرگونه سرقت علمی، جعل یا دستکاری داده‌ها، انتشار هم‌زمان، انتساب نادرست نویسندگی و سایر مصادیق تخلف پژوهشی موجب رد مقاله خواهد شد. مسئولیت محتوای علمی مقاله، رعایت حقوق مالکیت فکری و اخذ مجوزهای لازم برای استفاده از داده‌ها، تصاویر و سایر آثار دارای حق نشر بر عهده نویسندگان است.

فهرست داوران این شماره به ترتیب حروف الفبا

ردیف	نام و نام خانوادگی	وابستگی سازمانی
۱.	امیری محمدجواد	دانشیار دانشکده محیط زیست - دانشگاه تهران
۲.	بالیست جهانبخش	استادیار دانشکده محیط زیست - دانشگاه تهران
۳.	بانج شفیعی عباس	استاد دانشگاه ارومیه
۴.	برومند امیرعلی	دکتری دانشکده محیط زیست - دانشگاه تهران
۵.	بوزرجمهری خدیجه	دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد
۶.	پازوکی مریم	استادیار دانشکده محیط زیست - دانشگاه تهران
۷.	پرداختی علیرضا	استادیار دانشکده محیط زیست - دانشگاه تهران
۸.	جدیدی مهناز	دکتری دانشکده محیط زیست - دانشگاه تهران
۹.	چهارراهی ذبیح الله	استادیار دانشکده جغرافیا - دانشگاه تهران
۱۰.	حاجی پور خلیل	دانشیار دانشگاه شیراز
۱۱.	دارابی حسن	دانشیار دانشکده محیط زیست - دانشگاه تهران
۱۲.	ذوقی محمود	دکتری دانشکده محیط زیست - دانشگاه تهران
۱۳.	زبردست لعبت	دانشیار دانشکده محیط زیست - دانشگاه تهران
۱۴.	زمانی نوید	استادیار دانشگاه لرستان
۱۵.	سمیعی زفرقندی رودابه	استادیار دانشکده محیط زیست - دانشگاه تهران
۱۶.	شهریاری تکتیم	دانشیار دانشکده محیط زیست - دانشگاه تهران
۱۷.	صدری نسب مسعود	دانشیار دانشکده محیط زیست - دانشگاه تهران
۱۸.	علوی نائینی علی	استادیار دانشکده محیط زیست - دانشگاه تهران
۱۹.	کرباسی عبدالرضا	استاد دانشکده محیط زیست - دانشگاه تهران
۲۰.	نبی بیدهندی غلامرضا	استاد دانشکده محیط زیست - دانشگاه تهران

فهرست مطالب

صفحات	فهرست مندرجات
۱-۲۲	۱. تعیین حریم ایمن یک واحد صنعتی به منظور مدیریت انتشار آلاینده‌های هوا جابر ابراهیمی، آرزو گازری نیشابوری، سید فرید موسوی / 10.22034/jsesm.2026.252436
۲۳-۴۰	۲. طراحی مدل‌های مبتنی بر یادگیری عمیق برای تفکیک هوشمند پسماند با رویکردهای تک‌برچسبی و چندبرچسبی بهنام امینی زاده، زینب جهانگیری / 10.22034/jsesm.2026.252591
۴۱-۵۹	۳. نقش گونه‌های شاخص ماکروبنیتیک به عنوان ابزارهای زیستی در ارزیابی سلامت اکوسیستم‌های دریایی علی عباسی، مهران لقمانی / 10.22034/jsesm.2026.252593
۶۰-۷۶	۴. مدیریت پایدار پنل‌های خورشیدی در چارچوب اقتصاد چرخشی فاطمه مولایی، محسن رضائیان، جهانبخش بالیست / 10.22034/jsesm.2026.252594
۷۷-۹۵	۵. بررسی نقش متغیرهای پنهان و تعاملات گونه‌ای در مدل‌سازی پراکنش مشترک گونه‌های ماهی در رودخانه‌های حوضه جنوبی دریای خزر محمد حاجی پورمحمداباد، حسین مصطفوی، خسرو پیری، اصغر عبدلی / 10.22034/jsesm.2026.252595
۹۶-۱۱۵	۶. ارزیابی تطبیقی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهر تهران با استانداردهای بین‌المللی سعید کریمی، نسترن علی‌بخشی / 10.22034/jsesm.2026.252596
۱۱۶-۱۲۹	۷. بررسی تعامل مؤلفه‌های آسایش بصری در ساختمان‌ها و تاثیر آن بر عملکرد پایدار مهتاب مجیدی، ندا صحراگرد منفرد، محمدعلی خان محمدی / 10.22034/jsesm.2026.252597
۱۳۰-۱۵۴	۸. حذف نیترات از منابع آب آلوده با دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر پیریت فاطمه نادری، شایان شریعتی فیض آبادی، علیرضا بازارگان، مجید بغدادی / 10.22034/jsesm.2026.252598



این تفاهم‌نامه به منظور گسترش همکاری‌های علمی، پژوهشی و تخصصی و در راستای ارتقای کیفیت فعالیت‌های نشر علمی، فی‌مابین: **نشریه علمی «راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم‌های پایدار»** به صاحب‌امتیازی و مدیرمسئولی جناب آقای **دکتر محمدجواد امیری** به نشانی: تهران، خیابان انقلاب، خیابان قدس، نبش کوچه زرین‌کوب که از این پس در این تفاهم‌نامه **نشریه** نامیده می‌شود، و **انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران** به نمایندگی جناب آقای **دکتر عبدالرضا کرباسی** رئیس انجمن به نشانی: تهران، خیابان انقلاب، خیابان قدس، نبش کوچه زرین‌کوب که از این پس **انجمن علمی** نامیده می‌شود بر اساس شرایط و مفاد زیر منعقد می‌گردد:

ماده ۱ - موضوع تفاهم‌نامه

موضوع این تفاهم‌نامه ایجاد چهارچوب همکاری‌های علمی و پژوهشی بین طرفین در زمینه‌های زیر است:

۱. همکاری در برگزاری همایش‌ها، سمینارها، نشست‌ها و رویدادهای علمی و تخصصی
۲. همکاری علمی در داوری، ارزیابی و ارتقای کیفی مقالات نشریه
۳. مشارکت در انتشار آثار و تولیدات علمی مشترک در چهارچوب قوانین نشر علمی
۴. بهره‌گیری از ظرفیت‌های علمی طرفین در توسعه فعالیت‌های پژوهشی مرتبط

ماده ۲ - تعهدات نشریه

نشریه در چهارچوب مقررات نشریات علمی کشور متعهد می‌گردد:

۱. انتشار منظم نشریه حداقل در چهار شماره در سال به زبان فارسی یا انگلیسی
۲. رعایت ضوابط و آیین‌نامه‌های مصوب وزارت علوم، تحقیقات و فناوری در امور علمی نشریه
۳. بهره‌گیری از ظرفیت‌های علمی معرفی شده از سوی انجمن علمی در فرآیند داوری مقالات
۴. درج نام و آرم انجمن علمی در وبسایت و سربرگ‌های رسمی نشریه (در چهارچوب ضوابط)
۵. درج عبارت زیر در صفحه معرفی نشریه:

«این نشریه حاصل فعالیت مشترک نشریه راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم‌های پایدار و انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران است.»

تبصره ۱: انجمن علمی می‌تواند حداکثر دو نفر از اعضای هیات علمی واجد شرایط خود را جهت عضویت در هیئت تحریریه به سردبیر نشریه پیشنهاد دهد. تصمیم نهایی مطابق آیین‌نامه نشریات علمی خواهد بود.

تبصره ۲: امور علمی نشریه توسط هیئت تحریریه طبق مقررات مربوطه اداره می‌شود و این تفاهم‌نامه ناقض اختیارات قانونی نشریه نخواهد بود.

رئیس انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

دکتر عبدالرضا کرباسی



انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران
(شماره ثبت: ۲۸۵۴۶)

صاحب‌امتیاز و مدیرمسئول نشریه علمی راهبردهای علوم

مهندسی و مدیریت سیستم‌های پایدار

دکتر محمدجواد امیری

فصلنامه راهبردهای علوم مهندسی
و مدیریت سیستم‌های پایدار
Journal of Strategies of Engineering Sciences
and Sustainable Systems Management





ماده ۸ - حل اختلاف

در صورت بروز اختلاف، موضوع ابتدا از طریق مذاکره مستقیم حل و فصل خواهد شد و در صورت عدم حصول توافق، مرجع رسیدگی، مراجع صالح قضایی جمهوری اسلامی ایران خواهد بود.

ماده ۹ - مدت تفاهم‌نامه

مدت این تفاهم‌نامه از تاریخ امضا به مدت پنج سال معتبر است و در صورت توافق طرفین قابل تمدید خواهد بود.

تبصره: هر یک از طرفین می‌توانند با اعلام کتبی حداقل سه ماه پیش از پایان مدت، عدم تمایل به تمدید را اعلام نمایند.

ماده ۱۰ - سایر مقررات

۱. این تفاهم‌نامه موجب ایجاد رابطه استخدای یا نمایندگی حقوقی بین طرفین نمی‌شود.
۲. تغییر در مسئولان یا مدیران طرفین، خللی در اعتبار این تفاهم‌نامه وارد نمی‌کند.
۳. این تفاهم‌نامه در دو نسخه با اعتبار واحد تنظیم و امضا گردید.

ماده ۱۱ - تعداد نسخ

این تفاهم‌نامه، مشتمل بر ۱۱ ماده و ۳ تبصره، در دو نسخه تنظیم گردیده که هر دو نسخه از اعتبار واحد برخوردارند. این تفاهم‌نامه در تاریخ دوازدهم بهمن‌ماه ۱۴۰۴ هجری شمسی، به امضای طرفین رسید.

رئیس انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

دکتر عبدالرضا کرباسی

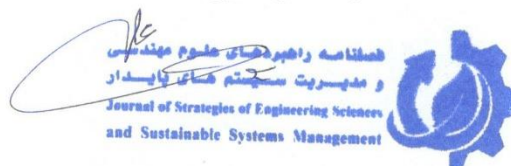


انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران
(شماره ثبت: ۲۸۵۲۶)

صاحب امتیاز و مدیرمسئول نشریه علمی راهبردهای علوم

مهندسی و مدیریت سیستم‌های پایدار

دکتر محمدجواد امیری



مجله راهبردهای علوم مهندسی
و مدیریت سیستم‌های پایدار
Journal of Strategies of Engineering Sciences
and Sustainable Systems Management





ماده ۳ - تعهدات انجمن علمی

انجمن علمی متعهد می‌گردد:

۱. معرفی داوران متخصص برای همکاری در ارزیابی علمی مقالات
۲. اطلاع‌رسانی و معرفی نشریه در میان اعضا و شبکه‌های علمی مرتبط
۳. همکاری علمی در برگزاری برنامه‌ها و رویدادهای مشترک
۴. معرفی مقالات برتر رویدادهای علمی مرتبط جهت بررسی برای چاپ در نشریه (طبق ضوابط)

ماده ۴ - روش اجرا

۱. هر یک از طرفین نماینده‌ای جهت هماهنگی امور معرفی خواهند کرد.
۲. برنامه‌های مشترک بر اساس صورتجلسات و توافق‌های مکتوب اجرا خواهد شد.
۳. برای هر فعالیت اجرایی یا مالی مستقل، قرارداد جداگانه تنظیم می‌گردد.

ماده ۵ - تعهدات مالی

۱. این تفاهم‌نامه به خودی خود تعهد مالی برای طرفین ایجاد نمی‌کند.
۲. هرگونه هزینه یا تعهد مالی صرفاً در قالب قراردادهای جداگانه و مصوب طرفین معتبر خواهد بود.

ماده ۶ - مالکیت معنوی و استفاده از نام و نشان

۱. حقوق مالکیت معنوی آثار منتشرشده تابع مقررات نشر علمی کشور است.
۲. استفاده از نام، نشان و لوگوی هر یک از طرفین صرفاً در چهارچوب این تفاهم‌نامه و با رعایت ضوابط مربوطه مجاز است.

ماده ۷ - محرمانگی

طرفین متعهد می‌شوند اطلاعات علمی، اجرایی و مکاتبات داخلی مرتبط با همکاری‌ها را محرمانه تلقی نموده و بدون رضایت طرف مقابل منتشر نکنند.

رئیس انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

دکتر عبدالرضا کرباسی



انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران
(تأسیس ۱۳۸۵)

صاحب‌امتیاز و مدیرمسئول نشریه علمی راهبردهای علوم

مهندسی و مدیریت سیستم‌های پایدار

دکتر محمدجواد امیری



فصلنامه راهبردهای علوم مهندسی
و مدیریت سیستم‌های پایدار
Journal of Strategies of Engineering Sciences
and Sustainable Systems Management





Determination of a Safe Buffer Zone for an Industrial Facility to Manage Air Pollutant Emissions

Jaber Ebrahimi^{a*}, Arezoo Gazory Neyshabouri^a, Seyyed Farid Mousavi^b

^aDepartment of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran.

^bDepartment of Operations Management and Information Technology, Faculty of Management, Kharazmi University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: jabber.ebrahimi@iau.ac.ir, <https://orcid.org/0009-0003-2304-2166>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Industrial facilities are continuously exposed to potential hazards that may lead to injuries, fatalities, and substantial financial losses. The development, advancement, and expansion of highly complex technologies in various industries have caused safety philosophy to shift from a post-incident approach to a pre-incident approach. The increasing application of this new approach and the reduction in the number of industrial accidents demonstrate the positive effects of this trend in accident reduction. The steel industry, as one of the key and strategic industries in the national economy, has always faced numerous challenges in the fields of safety, health, and environmental protection. The presence of hazardous materials and complex processes in this industry highlights the necessity of conducting detailed risk assessment and consequence modeling studies more than ever. In this study, credible scenarios were selected to determine fire zone distances, site boundaries, impacted areas around the industrial zone, individual risk assessment, and societal risk assessment. PHAST software was used for consequence modeling of process accidents, and SAFETI software was utilized for quantitative risk assessment. The results of consequence modeling showed that due to the presence of ammonia storage tanks in the studied company, most of the company's buildings are exposed to the harmful concentrations of this toxic substance. The harmful concentration of this toxic gas extends up to 190 meters outside the industrial site fence. Individual risk assessment revealed that the 10^{-4} per year risk contour covers parts of the area outside the industrial boundary, indicating unacceptable risk levels in some locations. Societal risk assessment also indicated that nearby residential areas are in the high-risk region. Therefore, it is necessary to strengthen safety protection layers, establish process safety management systems, and expand the company's boundary from the southeastern area by at least 190 meters to provide a suitable safe restricted area for air pollution management during emergency situations. The integration of consequence modeling with quantitative risk assessment enabled a comprehensive evaluation of both on-site and off-site hazards, providing a robust basis for evidence-based safety decision-making in complex industrial environments. The findings of this study provide a practical framework for land-use planning, emergency response preparedness, environmental protection, and sustainable safety management in steel production facilities.
Article history: Received: 2026/01/27 Received in revised form: 2026/02/19 Accepted 2026/02/27 Available online: 2026/03/06	
Keywords: Risk assessment, Restricted Area, Steel company, Consequence modeling, Management air pollution.	

Cite this article: Ebrahimi, J., Gazori Nyshabouri, A., & Mosavi, S. F. (2026). Determination of a Safe Buffer Zone for an Industrial Facility to Manage Air Pollutant Emissions. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 1(1), 1-21. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252436>



Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252436>

Introduction

The steel industry is recognized as one of the most important industrial sectors worldwide; however, it is associated with numerous process safety, environmental, and occupational health hazards. The storage and handling of hazardous materials such as ammonia, liquefied petroleum gas (LPG), hydrogen, natural gas, and hydrochloric acid can lead to severe incidents including toxic releases, fires, explosions, and environmental contamination. Modern safety management emphasizes proactive risk assessment and consequence modeling to prevent accidents before their occurrence. Accurate consequence assessment and quantitative risk analysis also provide a scientific basis for land-use planning, emergency preparedness, and the implementation of effective mitigation measures in high-hazard industrial facilities. The present study aimed to determine the safe restricted area and site boundary required for air pollution management and emergency planning in a steel manufacturing company. Specifically, the study focused on identifying credible accident scenarios, evaluating their consequences, determining Fire Zones (FZ), Restricted Areas (RA), and Impacted Areas (IA), and assessing individual and societal risks associated with process facilities.

Method

This research was conducted using a quantitative risk assessment (QRA) framework based on the requirements of IPS-C-SF-550, GS-EP-SAF-253, and DNV Technical Note 14 regarding process equipment failure frequencies. The study was performed in five stages: scenario selection, condition analysis, consequence modeling, frequency estimation, and risk evaluation. Credible scenarios involving ammonia vessels, LPG storage, hydrogen storage, natural gas pressure reduction stations, and acid storage tanks were identified through field investigations and process data analysis. Meteorological conditions were defined using regional wind rose data and three dominant weather categories (F/2, D/5, and D/15) representing different atmospheric stability classes and wind speeds. Consequence modeling was carried out using PHAST software to simulate toxic gas dispersion, jet fires, flash fires, pool fires, and vapor cloud explosions (VCE). The selected scenarios represented the most credible and potentially severe accidental releases based on the inventory of hazardous substances, operating conditions, and process configuration of the facility. Model input parameters, including operating pressure, temperature, inventory, and release characteristics, were obtained from plant technical documentation and validated through field observations. Subsequently, SAFETI software was employed to estimate individual and societal risk levels by integrating consequence severity with equipment failure frequencies. The analysis incorporated leak size categories, ignition probabilities, population distributions, occupancy assumptions, and explosion confinement characteristics to generate risk contours and evaluate safety distances around the industrial complex. The resulting risk contours and consequence distances were finally compared with internationally accepted risk acceptance criteria to identify vulnerable areas and support emergency response planning and land-use management decisions.

Results

The results demonstrated that ammonia storage facilities constituted the most significant hazard source within the studied steel company. Consequence modeling revealed that toxic ammonia releases generated the largest impact distances compared with fire and explosion scenarios. For Fire Zone determination, dominant consequences were identified as jet fires for ammonia and hydrogen systems, flash fires for LPG storage, and vapor cloud explosions for the natural gas pressure reduction station. The maximum fire zone distances reached 60 m for ammonia storage facilities and 63 m for LPG flash-fire scenarios. Restricted area assessment showed that ammonia release scenarios produced the most critical outcomes. The maximum toxic dispersion distance based on the LC1% criterion reached 218 m under unfavorable meteorological conditions. The results also demonstrated a strong influence of atmospheric

stability and wind speed on toxic dispersion distances, with stable atmospheric conditions producing the largest impact zones. These findings highlight the importance of incorporating site-specific meteorological data into quantitative risk assessments for industrial facilities. Evaluation of site boundaries indicated that harmful ammonia concentrations could extend approximately 190 m beyond the existing industrial fence line, particularly in the southeastern direction. Individual risk analysis demonstrated that the 10^{-4} per year risk contour extended beyond the process area and covered portions of the surrounding environment, indicating unacceptable risk levels in some locations. Furthermore, the ALARP (As Low As Reasonably Practicable) zone extended several hundred meters beyond the facility boundary. Societal risk assessment revealed that nearby residential areas could be exposed to elevated risk levels, placing the facility within the high-risk region of the societal risk acceptance criteria. Comparison of the analyzed scenarios indicated that toxic releases contributed more substantially to off-site risk than fire or explosion events, emphasizing the need to prioritize preventive and mitigation measures for ammonia storage systems. These findings indicate that ammonia storage units represent the dominant contributors to both individual and societal risks.

Conclusions

The findings confirm that consequence modeling and quantitative risk assessment provide effective tools for defining safe industrial boundaries and improving air pollution management during emergency situations. Among all identified hazards, ammonia release scenarios were found to be the governing factor in determining site boundaries and safety distances. Because toxic ammonia concentrations may extend up to 190 m outside the existing fence line, expansion of the southeastern site boundary is recommended. In addition, strengthening independent protection layers, implementing risk-based inspection programs, improving maintenance and integrity management systems, and enhancing process safety management (PSM) practices are necessary to reduce the likelihood and consequences of hazardous releases. Future development projects should consider the identified Fire Zones, Restricted Areas, and Impacted Areas to prevent the construction of vulnerable facilities within unacceptable risk regions. The integration of consequence modeling with quantitative risk assessment enabled a comprehensive evaluation of both on-site and off-site hazards, providing a robust basis for evidence-based safety decision-making in complex industrial environments. The results of this study provide a practical framework for land-use planning, emergency response preparedness, environmental protection, and sustainable safety management in steel production facilities. Furthermore, the findings emphasize that risk-informed design and operational decision-making can substantially enhance the resilience of industrial facilities against low-probability but high-consequence accidents. The generated risk contours may serve as valuable decision-support tools for regulatory authorities, plant managers, and emergency response organizations when establishing exclusion zones and prioritizing risk reduction measures. Although the present study focused on a steel manufacturing complex, the proposed methodology is transferable to other high-hazard industrial sectors where toxic and flammable materials are processed or stored. Future research should integrate dynamic operational data, real-time monitoring technologies, and probabilistic meteorological models to further improve the reliability of consequence prediction and emergency planning strategies.



تعیین حریم ایمن یک واحد صنعتی به منظور مدیریت انتشار آلاینده‌های هوا

جابر ابراهیمی^{a*}، آرزو گازی نیشابوری^a، سید فرید موسوی^b

^aگروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران جنوب، تهران، ایران.

^bگروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: جابر ابراهیمی jabber.ebrahimi@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	همواره در دل صنایع، مخاطرات بالقوه‌ای وجود دارند که می‌توانند موجب بروز جراحات، صدمات جانی و خسارت‌های مالی گسترده شوند. توسعه، پیشرفت و گسترش فناوری‌های بسیار پیچیده در صنایع مختلف سبب شده است که فلسفه ایمنی از رویکرد پس از وقوع به رویکرد پیش از وقوع تغییر یابد. به کارگیری روزافزون این رویکرد جدید و کاهش تعداد حوادث در صنایع نشان‌دهنده اثرات مثبت این روند در کاهش حوادث می‌باشد. صنعت فولاد به عنوان یکی از صنایع کلیدی و راهبردی در اقتصاد کشورها، همواره با چالش‌های متعددی در زمینه ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست مواجه بوده است. وجود مواد خطرناک و فرآیندهای پیچیده در این صنعت، ضرورت انجام مطالعات دقیق ارزیابی ریسک و مدل‌سازی پیامد را بیش از پیش نمایان می‌سازد. در این مطالعه، سناریوهای قابل‌اعتماد جهت تعیین فواصل منطقه آتش، مرز سایت، حاشیه اثرپذیر اطراف ناحیه صنعتی، ارزیابی ریسک فردی و ارزیابی ریسک جمعی انتخاب گردید. جهت مدل‌سازی پیامد حوادث فرآیندی، از نرم‌افزار PHAST و برای ارزیابی کمی ریسک از نرم‌افزار SAFETI استفاده شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که با توجه به وجود مخازن ذخیره آمونیاک در شرکت مورد مطالعه، اکثر ساختمان‌های این شرکت در معرض غلظت آسیب‌رسان این ماده سمی قرار می‌گیرند. میزان غلظت آسیب‌رسان این گاز سمی تا ناحیه ۱۹۰ متری بیرون از فوس سایت صنعتی گسترش پیدا می‌کند. همچنین ارزیابی ریسک فردی نشان داد که منحنی ریسک ۱۰ به توان ۴- در سال، بخش‌هایی از خارج از محدوده صنعتی را تحت پوشش قرار می‌دهد. ارزیابی ریسک جمعی نیز بیانگر آن است که محدوده‌های مسکونی اطراف در ناحیه ریسک بالا قرار دارند. بنابراین لازم است ضمن تقویت لایه‌های حفاظت ایمنی و استقرار سیستم مدیریت ایمنی فرآیند، مرز شرکت از ناحیه جنوب‌شرقی به میزان حداقل ۱۹۰ متر گسترش یابد تا حریم ایمن مناسبی جهت مدیریت آلودگی هوا در شرایط اضطراری فراهم گردد.
کلیدواژه‌ها: ارزیابی ریسک، حریم ایمن، شرکت فولادی، مدل‌سازی پیامد، مدیریت آلودگی هوا.	

استناد به این مقاله: ابراهیمی، جابر؛ گازی نیشابوری، آرزو و موسوی، سید فرید. (۱۴۰۴). تعیین حریم ایمن یک واحد صنعتی به منظور مدیریت انتشار آلاینده‌های هوا، راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم‌های پایدار، (۱۱)، ۲۱-۱. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252436>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252436>

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

امروزه پیشرفت جمعیت و نیاز به توسعه فیزیکی و سازه‌ای و همچنین تمایل جوامع بشری به رشد، نیاز به استفاده روزافزون منابع و انرژی را باعث گردیده که استفاده از فلزات پرکاربرد صنعتی و ساختمانی از جمله فولاد را افزایش داده‌است (Jozi & Majd, 2014; Pandey et al., 2025). صنعت فولاد به‌عنوان یکی از صنایع کلیدی در اقتصاد جهانی، همواره با چالش‌های متعددی مواجه بوده است. در سال‌های اخیر، بحران‌های اقتصادی، محیط‌زیستی و سیاسی تأثیرات قابل‌توجهی بر این صنعت داشته‌اند (Nazaripour et al., 2018). برای مثال، در سال ۲۰۲۴، تولید فولاد خام چین به پایین‌ترین سطح پنج‌ساله خود رسید که عمده‌تأثیر آن کاهش تقاضا در بخش مسکن بود (Baird, 2024a, 2024b). در اروپا نیز، افزایش هزینه‌های انرژی و ظرفیت مازاد تولید، فشارهای زیادی بر تولیدکنندگان وارد کرده‌است. کشور ما نیز در جهت پیشبرد اهداف توسعه‌ای و همچنین بدست آوردن جایگاه مناسب در اقتصاد جهانی و جلوگیری از خام‌فروشی و با بهره‌گیری از منابع سرشار آهن سعی در افزایش سهم تولید این محصول ارزشمند را داشته‌است (Jozi & Majd, 2014). از طرفی مشخص شده‌است که آمار حوادث در کشورهای در حال توسعه بیشتر از کشورهای توسعه یافته‌است. حوادث زمانی رخ می‌دهند که نقصی در سیستم مدیریت ایمنی یا روش‌های مهندسی ایمنی وجود داشته‌باشد (Pandey et al., 2025). صنعت فولاد به‌عنوان یکی از ارکان اصلی توسعه صنعتی و اقتصادی در کشورهای مختلف، همواره با چالش‌های متعددی در زمینه ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست مواجه بوده‌است (Nazaripour et al., 2018). در این میان، ارزیابی ریسک منابع فرآیندی به‌منظور شناسایی، تحلیل و مدیریت خطرات بالقوه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Soltanzadeh et al., 2025).

مدل‌سازی پیامد به‌عنوان یکی از ابزارهای مؤثر در ارزیابی ریسک، با شبیه‌سازی نتایج احتمالی وقوع حوادث، امکان پیش‌بینی و برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات منفی را فراهم می‌آورد (Padash et al., 2024). این روش به‌ویژه در صنایع با فرآیندهای پیچیده مانند فولادسازی، کاربرد گسترده‌ای دارد (Zahmatkesh, 2022; Song et al., 2020). در این راستا، مطالعات متعددی در سال‌های اخیر به ارزیابی ریسک در صنایع فولادی پرداخته‌اند. برای مثال، تحقیقی در ایران با استفاده از روش TOPSIS به ارزیابی ریسک‌های محیط‌زیستی و ایمنی در یک مجتمع فولادی پرداخته‌است (Padash et al., 2024). یکی از مسائلی که در ایمنی صنایع مطرح است، تصمیم‌گیری در مورد با صرفه بودن یا نبودن سرمایه‌گذاری برای ایمن کردن فرایند است (Parpinchi et al., 2025). به بیان دیگر با توجه به تعداد زیاد حوادث محتمل در یک واحد فرآیندی و نیز محدود بودن منابع مالی، تعیین معیاری برای تصمیم‌گیری و اولویت‌بندی مخاطرات ضروری به نظر می‌رسد (Jafari, 2021; Kakavandi et al., 2014). طبعاً ابعاد حوادث محتمل در یک واحد یعنی میزان و شدت تأثیر آن‌ها بر انسان، تجهیزات و محیط زیست، عامل مهمی است که در این باره مطرح می‌گردد به همین دلیل است که امروزه در ایمنی صنعتی، تصمیم‌گیری و مدیریت بر مبنای ارزیابی پیامد انجام می‌گیرد.

ارزیابی پیامد خطراتی همچون رها شدن مواد پرخطر در محیط، یکی از ضروری‌ترین و اصلی‌ترین مراحل برای افزایش سطح ایمنی در واحدهای موجود یا در حال طراحی است، بنابراین احتمال وقوع حوادثی از قبیل انفجار، آتش‌سوزی و نشت مواد سمی در آنها وجود دارد (Nazemi et al., 2025; Schmitz et al., 2021). رشد صنایع در کنار رشد جمعیت انسانی نه تنها باعث تکرار حوادث، بلکه موجب افزایش خسارات ناشی از حوادث نیز شده‌است که بعضاً این خسارات سنگین و جبران‌ناپذیر می‌باشند. در این مطالعه با روند مطالعات ارزیابی پیامد و سناریوهای قابل اعتنا جهت تعیین فواصل منطقه آتش، مرز سایت، حاشیه اثرپذیر اطراف ناحیه صنعتی، ارزیابی ریسک فردی و ارزیابی ریسک جمعی انتخاب می‌گردد و فاصله لازم جهت مدیریت آلودگی هوا در مواقع شرایط اضطراری را بیان می‌کند. جهت مدل‌سازی پیامد حوادث فرآیندی و ارزیابی کمی ریسک، نتایج حاصل از مطالعات انجام شده براساس GS253،

IPS-C-SF-550 و مدرک (DNV Technical Note 14 (Process Equipment Failure Frequencies)، اهداف زیر را محقق خواهیم نمود:

الف) دستیابی به آرایش بهینه تجهیزات و واحدها از جمله تعیین Fire Zone, Restricted Area, Impacted Area جهت استفاده برای ایجاد شرایط ذیل:
پیش‌گیری از وقوع حریق یا انفجار
از اطلاعات خروجی مدرک حاضر، می‌شود برای تفکیک منابع جرقه از منابع سوختنی در سایر مدارک مربوط به این واحد بهره‌گیری کرد.
کاهش اثرات منفی حوادث

- به حداقل رساندن پیامدهای حریق، انفجار و دیگر مخاطرات
 - شناسایی پیامد میان مرزهای تجهیزات و پیشگیری از در معرض خطر قرار گرفتن عموم.
 - استفاده از اطلاعات این گزارش جهت لزوم تعیین نقشه جانمایی شناساگرهای گازهای سمی و قابل اشتعال
- ب) فرار، تخلیه و نجات

محافظت افراد در برابر آتش، انفجار و انتشار گازهای قابل اشتعال و سمی در مسیرهای فرار به سمت ناحیه امن. ابزارهایی فراهم شود تا ایمنی افرادی که ممکن است در معرض خطر قرار بگیرند، تضمین شود. این محافظت باید هم شامل افرادی شود که به طور دائمی در مجاورت سایت حضور دارند و هم افرادی که به طور تصادفی در حال تردد در نزدیکی سایت می‌باشند (Chen et al., 2022).

روش‌شناسی پژوهش

مرحله نخست، انتخاب سناریو

در تحلیل پیامد، کلیدی‌ترین مرحله همین گام نخست است. چرا که برگزیدن سناریوهای قابل اعتنا از بین تعداد بسیار زیادی گزینه، باعث کاهش زمان و حجم محاسبات به گونه‌ای چشمگیر می‌شود. مقصود از سناریوی قابل اعتنا، حادثه یا ترکیبی از حوادث است که اولاً محتمل باشد، یعنی حوادث نادر بررسی نمی‌شوند. دوم اینکه عواقب حادثه مورد نظر باید دارای شدت و تأثیر کافی باشند (Taheri et al., 2025).

مرحله دوم، تحلیل شرایط

در این مرحله سعی می‌شود تمام شرایط فیزیکی تأثیرگذار بر حادثه، شناسایی شود. یعنی برای هر یک از سناریوها به طور جداگانه، عواملی که بر چگونگی شکل‌گیری و پیشرفت آن مؤثرند، باید مشخص شوند (Khodadadi-Mousiri et al., 2023). در این سناریو، چگالی ماده رها شده نسبت به هوا، دمای انتشار، دمای محیط و نیز سرعت رهائش از جمله عوامل مؤثر هستند. کشف و در نظر گرفتن این عوامل، به برگزیدن مدل مناسب برای شبیه‌سازی حادثه در مرحله بعد کمک می‌کند (Taheri et al., 2025).

مرحله سوم، مدل‌سازی حادثه

خروجی این مدل‌ها اطلاعاتی از قبیل نوع و ابعاد شعله، نرخ رهایی حرارت، میزان تشعشع حرارتی و دمای شعله است. مدل‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی انفجار، فشار حاصل از انفجار را به صورت تابعی از مسافت نسبت به مبدأ انفجار تخمین می‌زنند (Jafari et al., 2022). اکثر مدل‌های موجود پیچیده و شامل محاسباتی بسیار زمان‌بر هستند، لذا در این مرحله از نرم افزار PHAST استفاده خواهد شد (Bagheri & Habibi, 2025; Witlox, 2010).

مرحله چهارم، تجزیه، تحلیل تکرارپذیری و تخمین احتمالات

برای بدست آوردن تصویری واقع‌گرایانه از حوادث، علاوه بر شدت، عنصر احتمال را نیز باید در نظر گرفت. احتمال خرابی در تأسیسات فرآیندی و لوله‌ها را می‌توان از سوابق خرابی تجهیزات فرآیندی ایران یا جهان به دست آورد. در صورت عدم دسترسی به اطلاعات فوق برای تجهیزات در پروژه حاضر، جهت محاسبه فرکانس خرابی با استفاده از معادلات موجود در Process Equipment Failure Frequencies 14 Technical Note T، میزان احتمال خرابی مربوط به هر تجهیز تعیین می‌شود (Gao & Zhou, 2025; Pittiglio et al., 2014).

مرحله پنجم، محاسبه و ارزیابی ریسک (ارزیابی خسارات)

برای مقایسه اولویت سناریوهای مختلف حوادث، باید آن‌ها را نه بر حسب شدت تأثیر یا احتمال بروز، بلکه بر حسب ریسک، یعنی ترکیب این دو عامل، طبقه‌بندی کرد. برای آنالیز کمی ریسک از نرم‌افزار SAFETI استفاده شده‌است (Kwak et al., 2024; Rigaud et al., 2024).

شرایط آب و هوایی

با توجه به تأثیرگذار بودن نوع شرایط آب و هوایی بر روی نتایج حاصل از مدل سازی پیامد و ارزیابی کمی ریسک‌های حوادث فرآیندی، یکی از الزامات مدل سازی پیامد و ارزیابی کمی ریسک‌های فرآیندی، تعیین شرایط آب و هوایی و پارامترهای مشخص‌کننده وضعیت آب و هوا می‌باشد (Marx & Cornwell, 2009; Taheri et al., 2025). به منظور در نظر گرفتن تمامی شرایط آب و هوایی محتمل، مدل‌سازی‌ها و ارزیابی کمی ریسک در سه وضعیت آب و هوایی مختلف انجام می‌گیرد (جدول ۱ و ۲). در واقع به منظور مدل‌سازی و ارزیابی کمی ریسک سناریوها، سه وضعیت آب و هوایی غالب (با متوسط گیری از داده‌ها و اطلاعات موجود و با توجه به داده‌های سازمان هواشناسی کشور) در طول سال تعیین شده‌است (Marx & Cornwell, 2009; Nivolianitou et al., 2004; Taheri et al., 2025).

جدول ۱. اطلاعات گلباد منطقه

Table 1. Wind Rose Data of the Area

دسته هواشناسی			جهت
سرعت باد (متر بر ثانیه)			
۱۵-۶	۶-۴	۴-۰	
6~15 D	D/5	F/2	
%۰/۲	%۱	%۱۲/۸	N
%۰/۴	%۱/۱	%۱۱/۳	NE
%۰/۷	%۱/۶	%۱۲/۱	E
%۰/۳	%۰/۸	%۹/۱	SE
%۰/۱	%۰/۲	%۱۰/۵	S
%۰/۱	%۰/۳	%۳/۱	SW
%۰/۳	%۰/۸	%۱۰/۸	W
%۰/۳	%۰/۹	%۱۱/۲	NW
%۲	%۷	%۹۱	احتمال دسته‌ی آب‌وهوا
۱۵~۶	۵	۲	سرعت باد (متر بر ثانیه)
۲۴	۲۴	۱۵	دما (درجه سانتی‌گراد)
۴۷	۴۷	۱۶	رطوبت%
۲۴	۲۴	۱۵	دمای زمین (درجه سانتی‌گراد)
۱	۱	۱	فشار محیط (اتمسفر)
۱	۱	۰	شار تابش خورشیدی (کیلووات بر متر مربع)

منبع: سایت WindRose.xyz

جدول ۲. اطلاعات مربوط به شرایط آب و هوایی

Table 2. Weather Condition Data

D/۵ شرایط آب و هوایی		F/۲ شرایط آب و هوایی	
C۲۴ °	دما	C۱۵ °	دما
۴۷ %	رطوبت	۱۶ %	رطوبت
m/s۵	سرعت باد	m/s۲	سرعت باد
kW/m ^۲ ۱	تشعشع ناشی از تابش خورشید	kW/m ^۲	تشعشع ناشی از تابش خورشید
D	کلاس پایداری جوی	F	کلاس پایداری جوی
D/۱۵ شرایط آب و هوایی			
C۲۴ °	دما		
۴۷ %	رطوبت		
m/s۱۵	سرعت باد		
kW/m ^۲ ۱	تشعشع ناشی از تابش خورشید		
D	کلاس پایداری جوی		

شرایط جغرافیایی

یکی از فاکتورهای بسیار موثر در چگونگی پخش سیالات قابل اشتعال و سمی، میزان پستی و بلندی‌های محیط پیرامون منبع نشر است. بنابراین برای ارزیابی پیامد صحیح باید به خوبی از وضعیت محیط پیرامون محل نشر آگاه بود (Lisbona et al., 2014; Teng et al., 2025).

معرفی محدوده آتش‌های منتخب و شرایط فرایندی

در جدول ۳ محدوده آتش‌های منتخب و شرایط فرایندی ارائه شده است.

جدول ۳. سناریوها تعیین محدوده آتش، مرز سایت و حاشیه‌های اثرپذیر اطراف ناحیه صنعتی

Table 3. Scenarios for Determining Fire Zones, Site Boundaries, and Surrounding Impact Margins of the Industrial Area

منطقه آتش‌سوزی	نام سناریو	فاز انتشار	اندازه اتصال (اینچ)	تجهیزات درگیر	شناسه جریان	فشار عملیاتی (بار)	دمای عملیاتی (درجه سانتی‌گراد)
FZ-01	ایستگاه کاهش فشار	گاز	۴	ایستگاه کاهش فشار	گاز طبیعی	۱۷/۲	محیط
FZ-02	مخزن آمونیاک	مایع	۲	مخزن آمونیاک	آمونیاک	۱۰	محیط
FZ-03	مخزن LPG	مایع	۱	مخزن LPG	LPG	۵	محیط
FZ-04	انبار آمونیاک آنیل	مایع	۲	مخزن آمونیاک	آمونیاک	۱۷	محیط
FZ-04	انبار آمونیاک آنیل	مایع	۲	مخزن آمونیاک	آمونیاک	۱۷	محیط
FZ-05	انبار H ₂ آنیل	گاز	۱	مخزن H ₂	H ₂	۸	محیط
FZ-06	مخازن ذخیره اسید	مایع	اندازه منطقه دایک ۸ متر * ۴۲/۵ متر	مخزن HCL	HCL	اتمسفر	محیط

است. * میزان زبری سطح^۱ در پروژه‌ی حاضر، ۱ متر در نظر گرفته شده

^۱ Surface Roughness

است. * ارتفاع نشی^۱ در سناریوها غالباً ۱ متر در نظر گرفته شده

حدود پیامدها جهت تعیین محدوده آتش^۲، مرز سایت^۳ و حاشیه اثرپذیر^۴

پیامدهای حوادث محتمل در واحدهای فرآیندی مورد مطالعه به ۲ دسته تقسیم می‌شوند:

– پیامدهای ناشی از آتش‌سوزی مواد منتشر شده در محیط

– پیامدهای ناشی از انفجار ابر بخار مواد رها شده در محیط

معیارهایی که جهت بررسی نتایج آنالیز پیامد برای تعیین مرز سایت و حاشیه اثرپذیر اطراف ناحیه صنعتی مورد مطالعه، استفاده شده‌است در جدول ۴ ارائه شده‌است. جدول ۵ نیز قطر سایز نشی را برای هر مطالعه عنوان نموده‌است. جدول ۵ و ۶ به ترتیب بر اساس استاندارد IPS-C-SF-550 و بهره‌گیری از دستورالعمل GS-EP-SAF-253 ارایه گردیده‌است.

جدول ۴. سناریوها و معیارهای تعیین محدوده آتش، مرز سایت و حاشیه‌های اثرپذیر اطراف ناحیه صنعتی

Table 4. Scenarios and Criteria for Determining Fire Zones, Site Boundaries, and Surrounding Impact Margins of the Industrial Area

سناریو	پیامد	معیار تعیین محدوده آتش FZ	معیار تعیین مرز سایت RA	معیار تعیین حاشیه اثرپذیر IA
آتش ناگهانی	اشتعال	غلظت LFL ۱۰۰ درصد ماده اشتعال‌پذیر پخش شده	غلظت LFL ۱۰۰٪ ماده اشتعال‌پذیر پخش شده	
آتش استخری	تشعشع حرارتی	$9/5 \text{ kW/m}^2$	$4/7 \text{ kW/m}^2$	$3/2 \text{ kW/m}^2$
پراکنش سیالات سمی	مسمومیت تنفسی		LC1%	IDLH
آتش فورانی	تشعشع حرارتی	$9/5 \text{ kW/m}^2$	$4/7 \text{ kW/m}^2$	$3/2 \text{ kW/m}^2$
انفجار ابر بخار در واحد	افزایش فشار	۱۷۰ mbar (IPS-۵۵) / ۲۰۰ mbar (GS-) (۲۵۳)	۱۴۰ mbar (GS-253)	۵۰ mbar

جدول ۵. قطر سایزهای نشی برای تعیین محدوده آتش، مرز سایت و حاشیه اثرپذیر اطراف ناحیه صنعتی

Table 5. Leak Size Diameters for Determining Fire Zones, Site Boundaries, and Surrounding Impact Margins of the Industrial Area

دسته‌بندی نشی	محدوده اندازه سوراخ نشی
منطقه آتش‌سوزی	قطر نشی ۲۰ میلی‌متر
منطقه محدود	قطر نشی در مقابل قطر لوله: ۰/۲ قطر لوله محدود به حداقل اندازه نشی ۲۰ میلی‌متر و حداکثر اندازه نشی ۱۵۰ میلی‌متر
منطقه تحت تأثیر	

¹ Release Location - Elevation

² Fire Zone

³ Restricted Area

⁴ Impacted Area

جدول ۶. قطر سایزهای نشتی برای تعیین محدوده آتش، مرز سایت و حاشیه اثرپذیر اطراف ناحیه صنعتی

Table 6. Leak Size Diameters for Determining Fire Zones, Site Boundaries, and Surrounding Impact Margins of the Industrial Area

دسته بندی نشتی	محدوده اندازه سوراخ نشتی
منطقه آتش سوزی	قطر نشتی ۲۰ میلی متر
منطقه محدود	۸۰ میلی متر برای ۴ اینچ < قطر لوله < ۱۰ اینچ
منطقه تحت تأثیر	۱۰۰ میلی متر برای قطر لوله > ۱۶ اینچ
	۱۲۰ میلی متر برای قطر لوله > ۲۴ اینچ
	۱۴۰ میلی متر برای قطر لوله < ۲۴ اینچ

در مطالعه حاضر مبنای مطالعات استاندارد IPS-C-SF-550 و همچنین بهره گیری از دستورالعمل GS-EP-SAF-253 شرکت TOTAL می باشد. لذا با توجه به سوابق مطالعات به دلیل معرفی بازه های نشتی توسط استاندارد IPS-C-SF-550 و همچنین اعلام قطعی سایزهای نشتی توسط دستورالعمل GS-EP-SAF-253 و نزدیک بودن مقادیر این سایزها برای تعیین ناحیه Restricted & Impacted Area جدول ۵ مبنای انتخاب سایز نشتی در مطالعات حاضر می باشد.

فرضیات ارزیابی کمی ریسک های فرآیندی

سایز نشتی برای سناریوهای مورد نظر جهت انجام ارزیابی ریسک واحدهای فرآیندی بر طبق OGP¹ و DNV Technical Note 14 (Process Equipment Failure Frequencies, 2006) به صورت جدول ۷ در نظر گرفته شد.

جدول ۷. سایزهای نشتی در نظر گرفته شده برای تجهیزات فرآیندی (جهت انجام مطالعات ارزیابی کمی ریسک)

Table 7. Leak Sizes Considered for Process Equipment (for Quantitative Risk Assessment Studies)

دسته بندی سایزهای نشتی	سایز بازه نشتی به میلی متر	سایز نشتی منتخب به میلی متر
کوچک	کوچکتر از ۵۰ میلی متر	۲۵
متوسط	بین ۵۰ و ۱۵۰ میلی متر	۱۰۰
بزرگ	بزرگتر از ۱۵۰ میلی متر	برابر با سایز کل اتصالات

منحنی های ریسک فردی و جمعی بر مبنای زیر ارائه خواهد شد:

در مناطقی که تجهیزات فرآیندی در فواصل نزدیک به مناطق مسکونی واقع هستند، منحنی های ریسک فردی و ریسک جمعی ارائه گردید.

در مناطقی که تجهیزات فرآیندی در نزدیکی مناطق مسکونی قرار ندارند فقط منحنی های ریسک فردی ارائه گردید. علاوه بر فرضیات بالا، فرضیات زیر در بخش تکرارپذیری حوادث و ریسک فردی و جمعی در نظر گرفته شد. جمعیت مناطق مسکونی (جمعیت مورد بررسی برای مناطق شهری با دانسیته ۰/۰۱ نفر در متر مربع، در مناطق روستایی ۰/۰۵ نفر به ازای متر مربع و در مناطق صنعتی ۰/۰۰۱ نفر در متر مربع در نظر گرفته شده است).

مناطق محتمل برای جرقه با تأخیر، جادها، نواحی صنعتی و مناطق مسکونی می باشند. در مناطق شهری و روستایی احتمال حضور افراد درون ساختمان، ۵۰٪ و در مناطق صنعتی ۳۳ درصد در نظر گرفته شده است. در این مطالعات فرض بر این هست که در محیط صنعتی نفرات کل طول مدت هفته و روزانه ۸ ساعت در واحد صنعتی مشغول کار می باشند. فرضیات وجود جرقه به صورت جدول ۸ می باشد:

¹ International Association of Oil and Gas Producers

جدول ۸. فرضیات منبع جرقه

Table 8. Ignition Source Assumptions

منبع جرقه	میزان تردد خودروها (تعداد در ساعت)	سرعت متوسط عبور خودروها (کیلومتر در ساعت)
جاده روستایی (فرعی)	۳۶	۳۶
جاده اصلی	۶۰۰	۷۲

نواحی متراکم با وجود موانع با پتانسیل ایجاد موج انفجار

در محدوده مطالعه حاضر یک ناحیه با پتانسیل بروز انفجار ابر بخار شناسایی شده است که بعد از نشتی احتمالی در واحدهای فرآیندی، احتمال به دام افتادن گاز در آن نواحی وجود دارد. جدول ۹ به معرفی این ناحیه پرداخته شده است.

جدول ۹. مشخصات نواحی دارای پتانسیل انفجار ابر گاز

Table 9. Specifications of Areas with Gas Cloud Explosion Potential

منطقه آتش‌سوزی	منطقه شلوغ/متراکم	عرض (متر)	طول (متر)	ارتفاع (متر)	حجم (متر مکعب)	ضریب شدت
FZ-01 (ایستگاه کاهش فشار)	CA01 واحد ایستگاه کاهش فشار	۶	۱۵	۶	۵۴۰	۵/۵



شکل ۱. نمای کلی از ایستگاه تقلیل فشار گاز ورودی به شرکت به عنوان محلی دارای پتانسیل انفجار ابر گاز

Figure 1. Overall View of the Inlet Gas Let-Down Station as a Location with Gas Cloud Explosion Potential

تعیین محدوده آتش

نتایج حاصل از مدل‌سازی انتشار گازهای اشتعال‌پذیر به منظور تعیین محدوده آتش برای تمام سناریوهای معتبر، در جدول ۱۰ آورده شده است.

جدول ۱۰. فاصله‌های تحت تأثیر ۱۰۰ درصد LFL (تعیین محدوده آتش)

Table 10. Distances Affected by 100% LFL (Fire Zone Determination)

فاصله تا ۱۰۰٪ LFL (متر)			اندازه نشتی (میلی‌متر)	شرایط	سناریو
دسته آب‌وهوایی					
D/15	D/5	F/2	۲۰		
۱	۱	۱		H	AKS-01-01
۴	۷	۱۱		HI	
۶	۷	۹		H	AKS-02-01
۷	۱۲	۱۷		HI	
۱۱	۲۸	۴۴		H	AKS-03-01
۱۴	۳۲	۶۳		HI	
۷	۹	۱۱		H	AKS-04-01
۸	۱۵	۱۸		HI	
۷	۹	۱۱		H	AKS-04-02
۸	۱۵	۱۸		HI	
۵	۹	۱۱		H	AKS-05-01
۵	۹	۱۱		HI	
®	®	®		H	AKS-06-01+
®	®	®		HI	

H = افقی، HI = جت افقی تحت تأثیر؛ ® = در دسترس نیست

پیامدهای ناشی از آتش فورانی

نتایج مدل‌سازی سناریوها برای تعیین فواصل تحت تأثیر تشعشع حرارتی $9/5 \text{ kW/m}^2$ حاصل از آتش فورانی، جهت تعیین محدوده آتش در جدول ۱۱ ارائه شده‌است.

جدول ۱۱. فاصله‌های تحت تأثیر آتش فورانی با میزان تشعشع حرارتی 9.5 KW/m^2 (تعیین محدوده آتش)

Table 11. Distances Affected by Jet Fire with Thermal Radiation Level of 9.5 KW/m^2 (Fire Zone Determination)

فاصله تا ۹/۵ کیلووات بر متر مربع (متر)			اندازه نشتی (میلی متر)	شرایط	سناریو
دسته آب و هوایی					
D/15	D/5	F/2	۲۰		
®	®	۸		H	AKS-01-01
۳۸	۴۳	۵۴		H	AKS-02-01
۳۶	۳۸	۴۳		H	AKS-03-01
۴۳	۴۹	۶۰		H	AKS-04-01
۴۳	۴۹	۶۰		H	AKS-04-02
۵	۶	۶		H	AKS-05-01
®	®	®		H	AKS-06-01

انفجار ابر بخار

نتایج مدل‌سازی سناریوهای انفجار در جدول ۱۲ نشان داده شده‌است. طبق بررسی‌های انجام شده در هر ناحیه و استخراج بدترین سناریو و محاسبه حجم مخلوط سوخت و هوا برای سناریوی مد نظر، اینگونه نتیجه‌گیری شده‌است که بدترین سناریو در ناحیه‌های مورد مطالعه می‌تواند نصف فضای متراکم در هر ناحیه را پر کند. حجم فضای متراکم در هر ناحیه بر اساس ارتفاع معادل ناحیه و مساحت ناحیه متراکم محاسبه شده‌است.

جدول ۱۲. فاصله‌های تحت تأثیر ناشی از انفجار ابر گاز با موج انفجار با شدت‌های 170 mbar و 200 mbar

Table 12. Distances Affected by Gas Cloud Explosion with Overpressure Intensities of 170 mbar and 200 mbar

منطقه آتش‌سوزی	سناریو	حجم مخلوط گاز منتشر شده و هوا مرتبط با VCE (متر مکعب) ~ حجم محدود (متر مکعب)	فاصله تا ۱۷۰ میلی‌بار (متر)	فاصله تا ۲۰۰ میلی‌بار (متر)
FZ-01 (ایستگاه کاهش فشار)	CA01 واحد ایستگاه کاهش فشار	۶ متر * ۱۵ متر * ۶ متر = ۵۴۰ متر مکعب شعاع = ۵ متر شدت منبع محدود = ۵/۵	۱۹	۱۵

تعیین مرز سایت

نتایج مدل‌سازی سناریوهای انتشار گازهای سمی در جدول ۱۳ نشان داده شده‌است. طبق بررسی‌های انجام شده در سناریوهای مختلف، عمده سیال سمی شناسایی شده شامل آمونیاک می‌باشد که نتایج پراکنش آن‌ها با معیار LC1 درصد ذکر شده‌است.

جدول ۱۳. فاصله‌های تحت تأثیر ناشی از پراکنش گاز سمی NH3 با معیار LC1%=4767 ppm

Table 13. Distances Affected by NH3 Toxic Gas Dispersion Based on LC1% = 4767 ppm Criterion

سناریو	شرایط	اندازه نشتی (میلی‌متر)	فاصله تا ابر سمی NH3 (LC1% 4767 ppm) (متر)		
			دسته آب‌وهوایی		
			D/15	D/5	F/2
۲۰	H	AKS-02-01	۱۲۰	۱۳۶	۱۹۲
	HI		۱۱۰	۱۱۳	۱۶۳
	H	AKS-04-01	۱۳۷	۱۵۳	۲۱۸
	HI		۱۲۲	۱۲۸	۱۹۳
	H	AKS-04-01	۱۳۷	۱۵۳	۲۱۸
	HI		۱۲۲	۱۲۸	۱۹۳
	H	AKS-04-01	۱۳۷	۱۵۳	۲۱۸
	HI		۱۲۲	۱۲۸	۱۹۳

انتشار گازهای اشتعال‌پذیر^۱

نتایج حاصل از مدل‌سازی انتشار گازهای اشتعال‌پذیر به منظور تعیین مرز سایت برای تمام سناریوهای معتبر در جدول ۱۴ آورده شده‌است.

جدول ۱۴. فاصله‌های تحت تأثیر ۱۰۰ درصد LFL (تعیین مرز سایت)

Table 14. Distances Affected by 100% LFL (Site Boundary Determination)

سناریو	شرایط	اندازه نشتی (میلی‌متر)	فاصله تا ۱۰۰٪ LFL (متر)		
			دسته آب‌وهوایی		
			D/15	D/5	F/2
۲۰	H	AKS-01-01	۱	۱	۱
	HI		۴	۷	۱۱
	H	AKS-02-01	۶	۷	۹
	HI		۷	۱۲	۱۷
	H	AKS-03-01	۱۱	۲۸	۴۴
	HI		۱۴	۳۲	۶۳
	H	AKS-04-01	۷	۹	۱۱
	HI		۸	۱۵	۱۸
۷	H	AKS-04-02	۷	۹	۱۱

^۱ Flash Fire

فاصله تا ۱۰۰٪ LFL (متر)			اندازه نشتی (میلی متر)	شرایط	سناریو
دسته آب و هوایی					
D/15	D/5	F/2			
۸	۱۵	۱۸		HI	AKS-05-01
۵	۹	۱۱		H	
۵	۹	۱۱		HI	
®	®	®		H	AKS-06-01
®	®	®	HI		

پیامدهای ناشی از آتش فورانی

نتایج مدل‌سازی سناریوها برای تعیین فواصل تحت تأثیر تشعشع حرارتی 4.7 kW/m^2 حاصل از آتش فورانی جهت تعیین مرز سایت در جدول ۱۵ ارائه شده‌است.

جدول ۱۵. فاصله‌های تحت تأثیر آتش فورانی با میزان تشعشع حرارتی 4.7 KW/m^2 (تعیین مرز سایت)
Table 15. Distances Affected by Jet Fire with Thermal Radiation Level of 4.7 KW/m^2 (Site Boundary Determination)

فاصله تا ۴/۷ کیلووات بر متر مربع (متر)			اندازه نشتی (میلی‌متر)	شرایط	سناریو
دسته آب‌وهوایی					
D/15	D/5	F/2			
۱۲	۱۴	۱۴	۲۰	H	AKS-01-01
۴۵	۵۰	۵۹	۲۰	H	AKS-02-01
۴۵	۴۵	۵۱	۲۰	H	AKS-03-01
۵۱	۵۶	۶۷	۲۰	H	AKS-04-01
۵۱	۵۶	۶۷	۲۰	H	AKS-04-02
۶	۷	۷	۲۰	H	AKS-05-01

انفجار ابر بخار^۱

نتایج مدل‌سازی سناریوهای انفجار در جدول ۱۶ نشان داده شده‌است. طبق بررسی‌های انجام شده در هر ناحیه و استخراج بدترین سناریو و محاسبه حجم مخلوط سوخت و هوا برای سناریوی مد نظر، اینگونه نتیجه‌گیری شده‌است که بدترین سناریو در ناحیه‌های مورد مطالعه می‌تواند تمام فضای متراکم در هر ناحیه را پر کند. حجم فضای متراکم در هر ناحیه بر اساس ارتفاع معادل ناحیه و مساحت ناحیه متراکم محاسبه شده‌است. در این جدول، فواصل تحت تأثیر افزایش فشار بر اساس دستورالعمل GS-EP-SAF-253، 140 mbar برای تعیین مرز سایت ارائه شده‌است. احتمال بروز انفجار در محدوده آتش FZ-01 محتمل می‌باشد.

^۱ Vapour Cloud Explosion (VCE)

جدول ۱۶. فاصله‌های تحت تأثیر ناشی از انفجار ابر گاز با موج انفجار 140 mbar

Table 16. Distances Affected by Gas Cloud Explosion with Overpressure of 140 mbar

منطقه آتش‌سوزی	سناریو	حجم مخلوط گاز منتشر شده و هوا مرتبط با VCE (متر) (مکعب) ~ حجم محدود (متر مکعب)	فاصله تا ۱۴۰ میلی‌بار (متر)
FZ-01 (ایستگاه کاهش فشار)	CA01 واحد ایستگاه کاهش فشار	۶ متر * ۱۵ متر * ۶ متر = ۵۴۰ متر مکعب شعاع = ۵ متر شدت منبع محدود = ۵/۵	۳۰

تعیین تکرارپذیری بروز نشتی از تجهیزات

تکرارپذیری بروز نشتی در هر یک از سناریوهای مربوطه با بهره‌گیری از معادلات تخمین تکرارپذیری^۱ DNV Technical Note 14 انجام شده و نیز سناریوهای منتخب به همراه تخمین تکرارپذیری آنها در جدول ۱۷ ارائه گردیده‌است. فرکانس خرابی تجهیزات، معمولاً از تجزیه و تحلیل سابقه حوادث ارائه شده توسط OGP است که دارای بانک اطلاعات جامعی از فرکانس خرابی‌ها برای پیش‌بینی فرکانس نشتی با سائز معین از تجهیزات مختلف می‌باشد.

جدول ۱۷. تکرارپذیری بروز نشتی برای هر یک از سناریوها

Table 17. Leak Occurrence Frequencies for Each Scenario

سناریو	شرایط نشتی	فراوانی شکست (سال ^{-۱})
AKS-01-01	نشتی کوچک	9/97E-3
	پارگی کامل	4/23E-5
AKS-02-01	نشتی کوچک	6/42E-3
	پارگی کامل	4/23E-5
AKS-03-01	نشتی کوچک	2/18E-3
	پارگی کامل	3/86E-5
AKS-04-01	نشتی کوچک	1/01E-2
	پارگی کامل	3/86E-5
AKS-04-02	نشتی کوچک	1/01E-2
	پارگی کامل	3/86E-5
AKS-05-01	نشتی کوچک	1/01E-2
	پارگی کامل	3/86E-5
AKS-06-01	نشتی کوچک	1/01E-2
	پارگی کامل	3/86E-5

نتایج آنالیز ریسک

ریسک فردی

نمودار ریسک فردی نشان دهنده ترازهای مختلف ریسک می‌باشد که به یک فرد وارد می‌شود. ناحیه بین ترازهای ۱۰^{-۴} بر سال (منحنی داخلی) تا ۱۰^{-۶} بر سال (منحنی خارجی) ناحیه ALARP بوده و نواحی خارج از تراز ۱۰^{-۶} بر سال ناحیه قابل قبول از نظر ریسک می‌باشد و حریم ایمن شرکت، جهت احداث مناطق مسکونی می‌باشد. فعالیت در داخل ناحیه با ریسک ۱۰^{-۴} بر سال، خطرناک محسوب می‌گردد.

ناحیه بین ترازهای ۱۰^{-۴} تا ۱۰^{-۶} بر سال، ریسک قابل تحمل را داشته و چنانچه کاهش ریسک مقرون به صرف نباشد، مورد پذیرش است (شکل ۲).

^۱ Process Equipment Failure Frequencies



شکل ۲. نمودار ریسک فردی شرکت

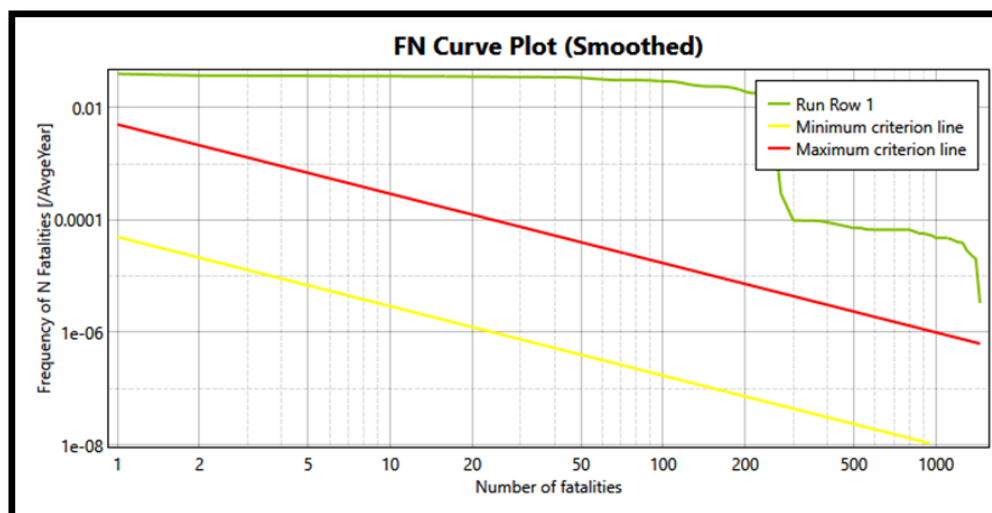
Figure 2. Individual Risk Contour of the Plant

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌کنید، ریسک 10^{-4} برسال در محدوده داخل واحد فرآیندی و همچنین نواحی جنوب شرقی بیرون از واحد صنعتی (به اندازه ۲۶۰ متر) و از قسمت جنوب غربی بیرون از واحد صنعتی (به اندازه ۱۰۰ متر) را تحت پوشش قرار می‌دهد، لازم است از محل درآمد شرکت نسبت به برطرف نمودن مشکلات ایمنی این واحد صنعتی، تمهیدات مناسب و استاندارد اندیشیده شود. لازم به توضیح است تا فاصله حدود ۳۳۸ متر از جانب شمال شرق فنس سایت، ۶۰۰ متر از جانب جنوب شرق فنس سایت، ۳۳۰ متر از جانب جنوب غرب فنس سایت و ۶۸ متر از جانب شمال غرب مرز واحد فرآیندی بعنوان ناحیه ALARP ریسک فردی می‌باشد (شکل ۲) که بهتر است ساخت و ساز در این ناحیه محدود گردد.

شمال شرق فنس سایت، ۶۰۰ متر از جانب جنوب شرق فنس سایت، ۳۳۰ متر از جانب جنوب غرب فنس سایت و ۶۸ متر از جانب شمال غرب مرز واحد فرآیندی بعنوان ناحیه ALARP ریسک فردی می‌باشد (شکل ۲) که بهتر است ساخت و ساز در این ناحیه محدود گردد.

ریسک جمعی

با توجه به نمودار مربوط به شکل ۳ ارزیابی ریسک جمعی فعالیت شرکت، نشان می‌دهد که این واحد از منظر ریسک جمعی، محدوده مسکونی پیرامون خود را در ناحیه High Risk قرار می‌دهد و با توجه به عدم رعایت حریم ایمن این واحد، پیشنهادهایی از جنس انجام بازرسی، تست، تعمیرات و نگهداری واحد فرآیندی با دقت، نظم و حساسیت بیشتری صورت پذیرد تا حداقل امکان از بروز حوادث ناشی، پیش‌گیری صورت پذیرد، مخصوصاً ناشی در مخازن نگهداری آمونیاک و هیدروژن بیشتر خطرساز خواهند بود.



شکل ۳. نمودار ریسک جمعی حاصل از فعالیت شرکت
Figure 3. Societal Risk Curve Resulting from Plant Operations

یافته‌ها و بحث

خلاصه جمع‌بندی حاصل از مطالعات آنالیز پیامد حوادث فرآیندی و ارزیابی کمی ریسک‌های فرآیندی شرکت به این صورت است که سناریوهای محتمل با توجه به برداشت اطلاعات میدانی انتخاب گردید، مدل‌سازی پیامد حوادث فرآیندی با کمک نرم‌افزار PHAST و ارزیابی کمی ریسک با نرم‌افزار SAFETI اجرا و اعمال محدوده‌های تحت تأثیر حوادث محتمل بر نقشه‌های ماهواره‌ای جهت تعیین محدوده Layout Impacted Area, Restricted Area, Fire Zone عنوان گردیده‌اند. همچنین نتایج مربوط به ریسک فردی و ریسک جمعی در متن این نتیجه‌گیری عنوان گردیده‌اند. نتایج سناریوهای محتمل بصورت سناریوهای غالب حاصل از مدل‌سازی پیامد حوادث فرآیندی برای همه محدوده‌های آتش تعیین شده، جهت تعیین محدوده Layout Impacted Area, Restricted Area, Fire Zone بطور خلاصه شده به شرح جدول ۱۸ الی ۲۰ نمایش داده شده‌است.

جدول ۱۸. نتایج حاصل از سناریوهای غالب جهت تعیین محدوده آتش اطراف ناحیه صنعتی

Table 18. Results of Dominant Scenarios for Determining Fire Zone Around the Industrial Area

LFL 100% (متر)	تأثیر VCE (متر)		تأثیر آتش استخری (۹/۵) (KW/m2) (متر)	تأثیر آتش فورانی (۹/۵) (KW/m2) (متر)	نام سناریو	منطقه آتش‌سوزی
	۲۰۰ میلی‌بار	۱۷۰ میلی‌بار				
۱۷	®	®	®	۵۴	AKS-02-01	FZ-02 (مخزن آمونیاک)
۶۳	®	®	®	۴۳	AKS-03-01	FZ-03 (مخزن LPG)
۱۸	®	®	®	۶۰	AKS-04-01	FZ-04 (انبار آمونیاک آنیل)
					AKS-04-02	
۱۱	®	®	®	۶	AKS-05-01	FZ-05 (انبار H2)
	®	®	®	®	AKS-06-01	FZ-06 (مخازن ذخیره اسید)

جدول ۱۹. نتایج حاصل از سناریوهای غالب جهت تعیین مرز ناحیه صنعتی

Table 19. Results of Dominant Scenarios for Determining the Boundary of the Industrial Area

منطقه آتش‌سوزی	نام سناریو	سمی (LC1%)(متر)	تأثیر آتش فورانی (۴/۷) (kW/m2) (متر)	تأثیر آتش استخری (۴/۷) (kW/m2) (متر)	تأثیر VCE(متر) ۱۴۰ میلی‌بار	LFL 100% (متر)
FZ-01 (ایستگاه کاهش فشار)	AKS-01-01	®	۱۴	®	۳۰	۱۱
FZ-02 (مخزن آمونیاک)	AKS-02-01	۱۹۲	۵۹	®	®	۱۷
FZ-03 (مخزن LPG)	AKS-03-01	®	۵۱	®	®	۶۳
FZ-04 (انبار آمونیاک آنیل)	AKS-04-01	۲۱۸	۶۷	®	®	۱۸
	AKS-04-02					
FZ-05 (انبار H2)	AKS-05-01	®	۷	®	®	۱۱
FZ-06 (مخازن ذخیره اسید)	AKS-06-01	®	®	®	®	®

جدول ۲۰. نتایج حاصل از سناریوهای غالب جهت تعیین حریم ایمن ناحیه صنعتی

Table 20. Results of Dominant Scenarios for Determining the Safety Buffer Zone of the Industrial Area

منطقه آتش‌سوزی	نام سناریو	سمی (IDLH) (متر)	تأثیر آتش فورانی (۳/۲) کیلووات بر متر مربع (متر)	تأثیر آتش استخری (۳/۲) کیلووات بر متر مربع (متر)	تأثیر VCE(متر) ۵۰ میلی‌بار
FZ-01 (ایستگاه کاهش فشار)	AKS-01-01	®	۱۵	®	۸۷
FZ-02 (مخزن آمونیاک)	AKS-02-01	۱۵۲۸	۶۴	®	®
FZ-03 (مخزن LPG)	AKS-03-01	®	۵۶	®	®
FZ-04 (انبار آمونیاک آنیل)	AKS-04-01	۱۸۵۲	۷۲	®	®
	AKS-04-02				
FZ-05 (انبار H2)	AKS-05-01	®	۷	®	®
FZ-06 (مخازن ذخیره اسید)	AKS-06-01	®	®	®	®

نتیجه‌گیری

سناریوی غالب برای تعیین محدوده آتش ناحیه FZ-01 (Let Down Station) طبق جدول ۲۰، انفجار ابر گاز می‌باشد. این محدوده آتش از لحاظ اثرگذاری به سایر محدوده آتش‌ها، در ناحیه ایمن و استاندارد قرار گرفته است. باید به نتایج حاصل از این مطالعات در طرح‌های توسعه‌ی آتی شرکت توجه نمود.

سناریوی غالب برای تعیین محدوده آتش ناحیه FZ-02 (Ammonia Vessel) که شامل دو مخزن آمونیاک می‌باشد، این محدوده آتش از لحاظ اثرگذاری اثر مخرب بر مخزن N2 خواهد داشت. برای بحث مربوط به تعیین محدوده آتش ناحیه FZ-02 (Ammonia Vessels)، باید توجه داشت مخزن نیتروژن تحت تاثیر تشعشع حرارتی ناشی از آتش فورانی مخزن آمونیاک قرار می‌گیرد و لازم است برای پیش‌گیری از این حادثه، بازنگری در جانمایی این مخازن، احداث دیواره مقاوم در برابر آتش و سیستم F&G مناسب برای محوطه‌ی مخازن نیتروژن نصب گردد و همچنین در طرح‌های توسعه‌ی شرکت به نواحی تحت تاثیر این محدوده آتش توجه گردد.

سناریوی غالب برای تعیین محدوده آتش ناحیه FZ-03 (LPG Vessel) آتش ناگهانی می‌باشد که اثر مخرب آن ایستگاه گاز کرومات، ناحیه پاتیل مذاب، ایستگاه گاز کوره، ساختمان HNX، مخزن آمونیاک و مخزن نیتروژن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. لازم است برای پیش‌گیری از این حادثه، بازنگری در جانمایی این مخزن و نصب سیستم F&G مناسب برای محوطه‌ی مخزن LPG در نظر گرفت و همچنین در طرح‌های توسعه‌ی شرکت به نواحی تحت تاثیر این محدوده آتش توجه گردد.

سناریوی غالب برای تعیین محدوده آتش ناحیه FZ-04 (Anil Ammonia Storage) آتش فورانی می‌باشد. این محدوده آتش از لحاظ اثرگذاری اثر مخرب بر ساختمان سمت شمالی خود دارد. لازم است برای فایزون مورد نظر، ضمن تقویت لایه‌های حفاظتی به سیستم بازرسی مبتنی بر ریسک نیز پرداخته شود تا از نشتی‌ها پیش‌گیری لازم صورت پذیرد.

سناریوی غالب برای تعیین محدوده آتش ناحیه FZ-05 (H2 Storage)، آتش فورانی می‌باشد که با توجه به تصویر موجود در پیوست ۱، این محدوده آتش از لحاظ اثرگذاری به سایر محدوده آتش‌ها، در ناحیه ایمن و استاندارد قرار گرفته است. باید به نتایج حاصل از این مطالعات در طرح‌های توسعه‌ی آتی شرکت توجه نمود. البته بحث انفجار فیزیکی مربوط به مخزن هیدروژن که احتمال خطر پرتاب ترکش وجود دارد، می‌شود این مخزن را با دیواره‌های مقاوم در برابر انفجار احاطه گردد. باید توجه داشت طبق تصویر موجود در پیوست ۱، طرح‌های توسعه‌ی شرکت به گونه‌ای باشد که اثرپذیر از این ناحیه نبوده و نیز اثر مخرب بر این ناحیه نداشته باشد. سناریوی غالب برای تعیین محدوده آتش ناحیه-FZ (Acid Storage Tanks) 06، به دلیل آتش‌گیر و قابل انفجار بودن، قابل چشم‌پوشی است.

با توجه به موجود بودن مخازن آمونیاک در شرکت، اکثر ساختمان‌های این شرکت در معرض غلظت آسیب‌رسان این ماده سمی قرار می‌گیرند. همچنین به دلیل حادث شدن سناریوی نشتی در مخزن آمونیاک موجود در روبروی واحد آنیل، میزان غلظت آسیب‌رسان این گاز سمی تا ناحیه ۱۹۰ متری بیرون فنس سایت صنعتی گسترش پیدا می‌کند. لازم است ضمن تقویت لایه‌های حفاظت ایمنی، مرز شرکت از ناحیه جنوب شرقی، به میزان ۱۹۰ متر گسترش یابد.

جهت پیش‌گیری و پاسخ مناسب به حوادث فرآیندی و افزایش قابلیت اطمینان از طریق انجام پروژه و اجرای پیشنهادات حاصل از پروژه‌های HAZID، HAZOP، LOPA، RAM Study، SIL Assignment، SIL Verification، استقرار سیستم مدیریت ایمنی فرآیند^۱ و چرخه عمر سیستم‌های ایمنی و ارتقاء ایمنی بهره‌برداری واحدهای فرآیندی (آموزش، بازرسی، استقرار بازرسی مبتنی بر ریسک، تعمیرات و نگهداری)، تمهیدات مناسب اندیشیده شود.

^۱ PSM

محدوده مرز سایت^۱ ناحیه‌ای از اطراف واحد فرآیندی می‌باشد که این ناحیه تحت کنترل شرکت و مالک آن خود شرکت می‌باشد لذا این ناحیه با فنس‌کشی مرزبندی می‌گردد. برای احداث سایر واحدهای صنعتی که مالک آن خود شرکت می‌باشد با رعایت ملاحظات ایمنی محدودیتی وجود نخواهد داشت اما برای احداث سایر واحدهای صنعتی در محدوده مرز سایت که مالک آن شرکتی دیگر باشد، ممنوعیت وجود دارد. طبق برآوردهای اولیه این گزارش، محدود مذکور به خارج از فنس کشیده شده است؛ در خصوص محدوده مذکور نیاز است تصمیم مدیریتی اتخاذ گردد البته لازم به توضیح است با رعایت و تقویت لایه‌های حفاظتی ایمنی می‌شود مکان پروژه را در وضعیت کنونی حفظ نمود. طبق TOTAL GS 021 لازم است ساختمان‌های شرکت خارج از محدوده Restricted Area قرار گیرد، در حال حاضر و بر اساس خروجی این گزارش، این موضوع رعایت نگردیده است (Esmaeili et al., 2024). با توجه به ارزیابی پیامد در مطالعات آتی تاثیر تمام لایه‌های حفاظتی مستقل^۲ مانند دیواره‌های آتش و پرده‌های آب نصب شده در منابع فرآیندی تمرکز خواهند کرد که خطر اجتماعی و فردی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند (Adib, 2024).

References

- Adib, M. (2024). Determining the safe distance of CGS (city gas station) and TBS (town boarder station) pressure reduction stations using PHAST software Tabriz University of Medical Sciences, School of Health]. <https://www.elmnet.ir/doc/20768745-40256> [In Persian]
- Bagheri, A., & Habibi, E. (2025). Modeling the Consequences of Fire and Leakage of Toxic Substances of Methylmethanolamine Tank with PHAST Software (A Case Study in Phase 14 of the South Pars Refinery, Iran) [Research]. *Journal of Health System Research*, 20(4), 382-389. <https://doi.org/10.48305/jhsr.v20i4.1567> [In Persian]
- Baird, A. (2024a). Urban Residential Construction and Steel Demand in China. *Bulletin, Reserve Bank of Australia*.
- Baird, A. (2024b). Urban Residential Construction and Steel Demand in China| *Bulletin*–April 2024.
- Chen, J., Ji, J., Guo, X., & Ding, L. (2022). An Improved Approach for Spatial and Temporal Individual Risk Assessment Considering Synergistic Effects of Multiple Fires Occurred Sequentially. *Fire Technology*, 58. <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01236-z>
- Esmaeili, S. V., Esmaeili, R., Mohsenian, A., & Alboghobeish, A. (2024). Consequence Analysis and Safety Assessment of an Ethylene Oxide Unit in a Petrochemical Complex. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 13(6), 23. https://doi.org/10.4103/ijehe.ijehe_7_24 [In Persian]
- Gao, F., & Zhou, D. (2025). A novel decision-making approach for risk assessment of converter steelmaking process based on fuzzy Dematel method. *Alexandria Engineering Journal*, 115, 222-237. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.12.025>
- Jafari, B. (2021). Risk Assessment by Job Safety Analysis and William Fine Method and Comparison with Workers' Risk Perception Results. *Archives of Occupational Health*, 5(4), 1109-1117. <https://doi.org/10.18502/aoh.v5i4.7972> [In Persian]
- JAFARI, M., DAVAZDAH EMAMI, S., & VELAYATZADEH, M. (2022). Consequences of fire and explosion in distillation unit of Persian Gulf star gas condensate refinery using PHAST software. *Occupational Hygiene and Health Promotion Journal*, 6(1), 13-28. https://ohhp.ssu.ac.ir/browse.php?a_id=382&sid=1&slc_lang=fa&html=1 [In Persian]
- Jozzi, S., & Majd, N. M. (2014). Health, safety, and environmental risk assessment of steel production complex in central Iran using TOPSIS. *Environmental monitoring and assessment*, 186(10), 6969-6983. [In Persian] <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3903-6>
- Kakavandi, M. G., Rajati, F., Ashtarian, H., & Hosseini, S. Y. Risk assessment of Kermanshah gas storage tanks by energy trace and barrier analysis (2014). *Journal of Inflammatory Diseases*, 20(20), 59-52. e155992. [In Persian]

¹ Restricted Area

² IPL

- Khodadadi-Mousiri, A., Yaghoot-Nezhada, A., Sadeghi Yarandi, M., & Soltanzadeh, A. (2023). Consequence modeling and root cause analysis (RCA) of the real explosion of a methane pressure vessel in a gas refinery. *Heliyon*, 9, e14628. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14628> [In Persian]
- Kwak, H., Kim, M., Min, M., Park, B., & Jung, S. (2024). Assessing the quantitative risk of urban hydrogen refueling station in Seoul, South Korea, using SAFETI model. *Energies*, 17(4), 867. <https://doi.org/10.3390/en17040867>
- Lisbona, D., McGillivray, A., Saw, J. L., Gant, S., Bilio, M., & Wardman, M. (2014). Risk assessment methodology for high-pressure CO₂ pipelines incorporating topography. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(1), 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2013.07.012>
- Marx, J. D., & Cornwell, J. B. (2009). The importance of weather variations in a quantitative risk analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(6), 803-808. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.08.009>
- Nazaripour, E., Halvani, G., Jahangiri, M., Fallahzadeh, H., & Mohammadzadeh, M. (2018). Safety performance evaluation in a steel industry: A short-term time series approach. *Safety science*, 110, 285-290. [In Persian] <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.08.028>
- Nazemi, A., Zare, S., & Baniasadi Zare, M. (2025). Modeling the consequences of benzene leakage from tanks using PHAST software in a process industry. *Health and Development Journal*, 14(1), 1-8. <https://doi.org/10.34172/jhad.1167> [In Persian]
- Nivolianitou, Z. S., Synodinou, B. M., & Aneziris, O. N. (2004). Important meteorological data for use in risk assessment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 17(6), 419-429. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2004.08.00>
- Padash, A., Fattahi, R., & Vahidi, H. (2024). A novel hybrid risk assessment approach under fuzzy environment in steel industry. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108655. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108655> [In Persian]
- Pandey, S., Singh, A. K., Parhi, S., & Jha, S. K. (2025). Towards safer steel operations with a multi model framework for accident prediction and risk assessment simulation. *Scientific Reports*, 15(1), 13293. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96028-0>
- Parpinchi, S., Najafi, A., & Mohammadi, N. (2025). Identification and Prioritization of Critical Supply Chain Risks in the Steel Industry under Conditions of Uncertainty. *Journal of Operational Research in its Applications*, 22(3). https://jorar.lahijan.iau.ir/article_716911.html [In Persian]
- Pittiglio, P., Bragatto, P., & Delle Site, C. (2014). Updated failure rates and risk management in process industries. *Energy procedia*, 45, 1364-1371. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.143>
- Rigaud, M., Buekers, J., Bessems, J., Basagaña, X., Mathy, S., Nieuwenhuijsen, M., & Slama, R. (2024). The methodology of quantitative risk assessment studies. *Environmental Health*, 23(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s12940-023-01039-x>
- Schmitz, P., Reniers, G., & Swuste, P. (2021). Determining a realistic ranking of the most dangerous process equipment of the ammonia production process: A practical approach. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 70, 104395. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104395>
- Soltanzadeh, A., Zarei, E., Mahdinia, M., Hosseinzadeh, K., & Sadeghi-Yarandi, M. (2025). Introducing FMEA plus method for comprehensive safety risk assessment in the steel industry. *Plos one*, 20(10), e0331748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0331748> [In Persian]
- Song, Y., Chen, Z., Zhang, S., Wang, J., Li, C., Li, X., Yuan, J., & Zhang, X. (2020). Comprehensive evaluation system of occupational hazard prevention and control in iron and steel enterprises based on a modified Delphi technique. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(2), 667. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020667>
- Taheri, A., Beryani, A. A., Motavassel, M., & Nassab, E. A. (2025). Integrated quantitative explosion risk assessment and safety zone delineation applied in a pressure vessel adopting PHAST numerical simulation approach: an Iranian case analysis. *Results in Engineering*, 26, 105581. [In Persian] <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105581>
- Teng, L., Wang, K., Liu, B., Li, W., Yin, P., Li, Z., Huang, X., Luo, Y., & Jiang, L. (2025). The consequence distance of liquid ammonia release from a pipeline in complex terrain. *Process Safety and Environmental Protection*, 196, 106921. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.106921>

- Witlox, H. (2010). OVERVIEW OF CONSEQUENCE MODELLING IN THE HAZARD ASSESSMENT PACKAGE PHAST. <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/163731.pdf>
- Zahmatkesh, F., Kiani Sadr, Maryam, Cheraghi, Mehrdad. (2022). Environmental risk assessment of steel plant using ANP and TOPSIS methods (Case study: Hamadan Wian Steel Plant). Journal of Environmental Science and Technology, 24(3), 157-169. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jest.2018.21029.3007>



Design of Deep Learning-Based Models for Intelligent Waste Classification Using Single-Label and Multi-Label Approaches

Behnam Aminizadeh^{a*}, Zeinab Jahangiri^b

^aDepartment of Environmental Systems Engineering, Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: Behnam Aminizadeh behnamaminizadeh@ut.ac.ir, <https://orcid.org/0009-0009-5266-1306>

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 2026/01/28
Received in revised form:
2026/02/18
Accepted 2026/03/01
Available online: 2026/03/06

Keywords:
Transfer Learning,
Waste Classification,
Waste Management,
Intelligent Waste Sorting,
Deep Learning.

ABSTRACT

Today, with the rapid growth of technology, especially deep learning, the importance of using novel methods has become more evident than ever. Environmental issues such as waste management likewise require new, intelligent approaches that can reduce costs, accelerate operations, and minimize human error. Waste classification, as one of the fundamental and important aspects of waste management and recycling, is the main focus of this research. In this study, two deep learning models were trained on images from the Realwaste dataset, which includes about 4,200 images across the categories of metal waste, glass waste, paper waste, cardboard waste, food organic waste, plastic waste, vegetation waste, and textile waste, in order to advance intelligent waste sorting. The resulting models are a single-label model and a multi-label model. The base model uses the EfficientNetB0 architecture introduced by researchers at Google, but it was redesigned and trained through transfer learning to suit the specific problem addressed in this study. To increase data diversity, artificial data augmentation techniques such as rotation, lighting changes, and image blending using the CutMix and MixUp methods were employed. In addition, to address data imbalance, class weights were calculated based on the frequency of each class. The training and validation data were split at a ratio of 70% to 30%, and all programming was carried out in Python within the Visual Studio Code environment using the Scikit-learn and TensorFlow libraries. The experimental results showed that both models performed well in the intelligent classification of waste images. For images containing a single waste type, the single-label model sometimes provided higher confidence in identifying the correct category; however, the multi-label model, which exhibited better control of overfitting during training, delivered better overall performance. The multi-label model's average confidence in identifying the correct category in the experimental test, 0.875, was higher than that of the single-label model, 0.855. In the analysis of an image unrelated to waste, the multi-label model, with a confidence below 0.25, also made a smaller error than the single-label model, which had a confidence of 0.29. Finally, in the experimental test on images containing several waste types simultaneously, it was found that the EfficientNet architecture is not as reliable for analyzing images containing multiple waste types as it is for analyzing images containing a single waste type.

Cite this article: Aminizadeh, B., & Jahangiri, Z. (2026). Design of Deep Learning-Based Models for Intelligent Waste Classification Using Single-Label and Multi-Label Approaches. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 1(1), 22-40. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252591>



Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252591>

Introduction

Rapid progress in artificial intelligence, machine learning, and especially deep learning has transformed how unstructured data, particularly images, are analyzed, with convolutional neural networks remaining one of the main foundations of image classification. Environmental challenges such as excessive waste generation call for intelligent solutions, and waste management and sorting have drawn considerable global attention, as population growth, urbanization, and industrial expansion increase household, commercial, industrial, and agricultural waste volumes. Traditional waste separation is usually manual and rule-based, an approach difficult to scale and labor-intensive; applying artificial intelligence, by contrast, can increase classification accuracy and reduce operating cost and time, with approaches such as smart bins and sorting robots proposed as effective directions. Building on this motivation, the present study develops a single-label model and a multi-label model, both based on EfficientNetB0 and transfer learning, trained on RealWaste data, and compares their performance across a range of test images. EfficientNet was chosen as the base architecture because this family of models balances depth, width, and image resolution well, and EfficientNetB0, despite far fewer parameters than earlier architectures such as VGG16, is generally a more optimized and accurate model. Persian-language and domestic research specifically centered on intelligent waste sorting with the help of deep learning and image processing is not abundant, and the present study also aims to inform future research in this direction, including the potential contribution of object-detection models such as YOLO for images containing several waste types at once.

Method

The RealWaste dataset, containing more than 4,700 images across nine categories, was released in late 2023 and used as the basis for this study. The miscellaneous-trash category was excluded so training could focus on precisely labeled images, leaving eight target categories: metal, glass, paper, cardboard, food organics, plastic, vegetation, and textile waste, comprising roughly 4,200 images. Further images matching each category were downloaded from the internet, bringing the working image pool to approximately 5,000 images. Because RealWaste images generally each focus on a single waste item, single-label images were also combined into composite images to give the multi-label model better training conditions, alongside rotation and brightness variation; class weights based on category frequency were applied, since image counts differ considerably across categories. For both models, EfficientNetB0, pretrained on roughly 1.2 million images across about 1,000 classes, served as the starting point, so its already-learned visual features could be reused here; the original 1,000-class output layer was replaced with an 8-class layer. Early layers, capturing general image features, were kept frozen while newly added layers trained on the project's data; some previously frozen layers were later unfrozen for closer adaptation to waste imagery. Both models used independent sigmoid outputs, so each class receives a value between 0 and 1 that need not sum to 1; this same design was used for the single-label model too, keeping the two architectures consistent for easier comparison. Accordingly, the single-label model reports only the label with the highest value, while the multi-label model displays every label exceeding a 0.25 threshold, adjustable in the model's test code. Training and validation data were split 70:30; Adam was used instead of RMSProp, originally used for EfficientNetB0, for more stable, faster convergence on this smaller dataset; all programming was done in Python, in Visual Studio Code, using Scikit-learn and TensorFlow. Over training, the single-label model showed some widening between training and validation loss, a mild but not severe degree of overfitting; the multi-label model, trained with fewer epochs partly in response, showed a more balanced loss, without clear overfitting or underfitting.

Results

Both trained models were tested on new images not seen during training, downloaded from the internet. The first four test images each showed a single type of waste — paper, textile waste, food organics, and plastic — and both models identified the correct category in every case, though confidence values differed. On the paper image, the single-label model reported higher confidence (0.84 versus 0.76); on the remaining three, the multi-label model reported higher confidence (0.87 versus 0.80 for textile waste, 0.93 versus 0.87 for food organics, and 0.94 versus 0.91 for plastic). On the food organics image, the multi-label model produced two labels, food organics and textile waste, with the correct category, food organics, receiving much higher confidence (0.93) than the second label (0.31). Averaged across these four images, the multi-label model's confidence in the correct category was 0.875, compared with 0.855 for the single-label model. On an image unrelated to any of the eight trained categories, the multi-label model's confidence stayed below 0.25 for every category, while the single-label model reported 0.29 confidence for one category, metal; the multi-label model therefore performed better on this image. On a composite image formed by combining five different waste types, the multi-label model correctly identified two categories, food organics and glass, at 0.35 and 0.30 confidence, respectively; one of these, food organics, was also identified by the single-label model, at 0.28 confidence, and the multi-label model's higher confidence on this shared category is why it performed better on this image. Overall, confidence levels were low on this image containing several waste types at once, a pattern suggesting that object-detection architectures such as YOLO may be better suited to such images.

Conclusions

Both models performed adequately in classifying waste images, and the multi-label model was overall more accurate than the single-label model across the test images used. The multi-label model also performed better on the image unrelated to the trained categories and on the composite image containing several waste types, although the single-label model occasionally reported higher confidence on individual single-waste-type images. Because of its greater flexibility in identifying more than one class in a single image, the multi-label approach appears better suited to real-world recycling lines that handle a wide variety of waste, though the EfficientNetB0 architecture, in either its single-label or multi-label form, is not a fully reliable choice for analyzing complex images containing multiple waste types at once. Beyond the models themselves, this comparison of single-label and multi-label performance on a waste-classification task adds to the literature on deep learning applications in environmental management, and, subject to further validation, the developed models could support recycling lines and smart waste-management systems, helping reduce cost, speed up operations, and reduce human error. Future work in this direction could focus on increasing the size and diversity of the training data, particularly in lighting, angle, and image quality; using genuinely composite images, rather than synthetically combined ones, to further improve the multi-label model for real-world scenarios; incorporating object-detection architectures such as YOLO for complex, multi-waste images; and, before training, setting aside a separate test set on which to report standard metrics such as accuracy, precision, recall, and F1, allowing a more rigorous evaluation than the qualitative testing carried out here.



طراحی مدل های مبتنی بر یادگیری عمیق برای تفکیک هوشمند پسماند با رویکردهای تک برچسبی و چندبرچسبی

بهنام امینی زاده^{a*}، زینب جهانگیری^a

^aگروه مهندسی سیستم های محیط زیست، دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: بهنام امینی زاده behnamaminizadeh@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	امروزه با رشد سریع تکنولوژی، به خصوص یادگیری عمیق، اهمیت به کارگیری روش های نوین بیش از پیش آشکار شده است. مسائل محیط زیستی همچون مدیریت پسماند نیز نیازمند رویکردهای جدید و هوشمند است تا باعث کاهش هزینه ها، تسریع در انجام امور و کاهش خطای انسانی شود. طبقه بندی پسماند، به عنوان یکی از جنبه های اساسی و مهم در مدیریت و بازیافت پسماند، محور اصلی این پژوهش است. در این پژوهش با آموزش دو مدل یادگیری عمیق بر روی تصاویر مجموعه Realwaste که حدود ۴۲۰۰ تصویر از دسته های پسماندهای فلزی، پسماندهای شیشه ای، پسماندهای کاغذی، پسماندهای مقوایی، پسماندهای آلی غذایی، پسماندهای پلاستیکی، پسماندهای گیاهی و پسماندهای نساجی/پارچه ای هستند، در مسیر تفکیک هوشمند پسماند گام برداشته شده است. مدل های حاصل از این پژوهش تک برچسبی و چندبرچسبی هستند. مدل پایه از معماری EfficientNetB0 بهره گرفته، اما با روش انتقال یادگیری، متناسب با مسئله ی خاص این پژوهش، بازطراحی و آموزش داده شده است. به منظور افزایش تنوع داده ها، تکنیک های افزایش مصنوعی داده ها مانند چرخش، تغییر نور و ترکیب تصاویر با روش های CutMix و MixUp به کار گرفته شد. همچنین برای مقابله با عدم توازن داده ها، وزن دهی کلاس ها بر اساس فراوانی هر کلاس محاسبه گردید. داده های آموزش و اعتبارسنجی با نسبت ۷۰ به ۳۰ درصد تقسیم شدند و برنامه نویسی به زبان پایتون در محیط Visual Studio Code استفاده از کتابخانه های Scikit-learn و TensorFlow انجام گرفت. نتایج آزمون های تجربی نشان دادند هر دو مدل در تفکیک هوشمند تصاویر پسماند عملکرد خوبی دارند. مدل تک برچسبی در تصاویر با یک نوع پسماند گاهی اطمینان بالاتری در تشخیص دسته ی صحیح ارائه داد اما مدل چندبرچسبی که بیش برآزش کنترل شده تری در حین آموزش داشت، در مجموع عملکرد بهتری ارائه کرد؛ متوسط اطمینان مدل چندبرچسبی در تشخیص دسته ی صحیح در آزمون تجربی برابر با ۰/۸۷۵ نیز از متوسط اطمینان مدل تک برچسبی در تشخیص دسته ی صحیح برابر با ۰/۸۵۵ بیشتر بود. در تحلیل تصویر نامرتبط به پسماند نیز مدل چندبرچسبی با اطمینان کمتر از ۰/۲۵ از مدل تک برچسبی با اطمینان ۰/۲۹ خطای کمتری داشت. در آزمون تجربی تحلیل تصاویر با حضور هم زمان چند نوع پسماند، مشخص شد معماری EfficientNet، به اندازه ی تحلیل تصاویر با حضور یک نوع پسماند، قابل اعتماد نیست.

کلیدواژه ها:

انتقال یادگیری،
تفکیک زباله،
مدیریت پسماند،
هوشمندسازی،
یادگیری عمیق.

استناد به این مقاله: امینی زاده، بهنام و جهانگیری، زینب. (۱۴۰۴). طراحی مدل های مبتنی بر یادگیری عمیق برای تفکیک هوشمند پسماند با رویکردهای تک برچسبی و چندبرچسبی. راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، ۱(۱)، ۴۰-۲۲. <https://doi.org/10.22034/jesem.2026.252591>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jesem.2026.252591>.

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

در دهه‌های اخیر، پیشرفت شتابان فناوری‌های نوظهور به ویژه در حوزه‌های هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، شیوه تحلیل داده‌های غیرساختاریافته، به خصوص تصاویر را به طور چشمگیری متحول کرده است. مرورها نشان می‌دهند که شبکه‌های عصبی کانولوشنی همچنان یکی از پایه‌های اصلی طبقه‌بندی تصویر هستند و یادگیری عمیق نیز به عنوان یک چارچوب فراگیر برای حل مسائل واقعی در حوزه‌های گوناگون به کار می‌رود (Chen et al., 2021; Sarker, 2021).

در سال‌های اخیر، محققان داخلی استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در حل مسائل محیط‌زیستی را در دستور کار خود قرار داده‌اند (Mohammadzadeh et al., 2026; Aghdam et al., 2024). در زمینه‌های مختلف و پژوهش‌های مختلف از الگوریتم‌های یادگیری ماشین به شکل موثر و کارآمد استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها در مسائل مختلف محیط‌زیستی نیز نقش مهمی ایفا می‌کنند. به عنوان مثال در پیش‌بینی کیفیت خروجی فاضلاب تصفیه‌خانه‌ی شهری از یادگیری ماشین بهره برده شده است (Biglarijoo et al., 2025). استفاده از پردازش تصویر و یادگیری عمیق نیز یکی از حوزه‌هایی است که می‌تواند بیشتر مورد توجه محققان داخلی جهت حل مشکلات محیط زیستی قرار بگیرد چراکه استفاده از پردازش تصویر در دنیای امروز، بسیار مورد توجه محققان بین‌المللی قرار گرفته و نتایج خوبی نیز به دنبال داشته است (Zhu et al., 2017; Ma et al., 2019; Yuan et al., 2020; Himeur et al., 2022; Bai et al., 2023). یادگیری ماشین به عنوان یکی از زیرشاخه‌های هوش مصنوعی، به سیستم‌ها امکان می‌دهد بدون برنامه‌نویسی صریح و با تکیه بر داده‌ها و نمونه‌ها، الگوها را بیاموزند و عملکرد خود را بهبود بخشند؛ با توسعه یادگیری عمیق، به ویژه شبکه‌های عصبی چندلایه، توان مدل‌های هوش مصنوعی در تحلیل داده‌های تصویری، متن و ویدیو به طور چشمگیری افزایش یافته است (De Mauro, 2022).

یکی از حوزه‌هایی که می‌تواند از قابلیت‌های هوش مصنوعی سود بسیاری ببرد، مسائل مرتبط با محیط زیست و توسعه‌ی پایدار است. چالش‌های محیط زیستی نظیر تغییرات اقلیمی، کاهش منابع طبیعی، آلودگی‌های محیط زیستی و تولید بیش از حد پسماند، نیازمند راهکارهایی نوآورانه و دقیق هستند (Alotaibi & Nassif, 2024; Dhiman et al., 2020; Vinuesa et al., 2020). از جمله مسائل محیط زیستی مهم که توجه جهانی را به خود جلب کرده، مسئله‌ی مدیریت پسماند و تفکیک زباله است. افزایش جمعیت، توسعه‌ی شهری، مصرف‌گرایی و گسترش صنایع، منجر به تولید حجم انبوهی از زباله‌های خانگی، تجاری، صنعتی و کشاورزی شده است (Kaza et al., 2018; Chen, 2018). در روش‌های سنتی مدیریت پسماند، جداسازی و دسته‌بندی معمولاً به صورت دستی و با قواعد ثابت انجام می‌شود؛ این رویکردها در برابر حجم بالای زباله، تنوع زیاد مواد و نیاز به دقت بالا، عموماً کم‌مقیاس، نیازمند نیروی انسانی قابل توجه و کم‌انعطاف هستند (Dawar et al., 2025).

در مقابل، به کارگیری هوش مصنوعی در مدیریت پسماند می‌تواند دقت طبقه‌بندی را افزایش دهد، هزینه و زمان عملیات را کاهش دهد و بازایی منابع را بهبود بخشد؛ در مرورهای اخیر، کاربردهایی مانند سط‌های هوشمند، ربات‌های تفکیک زباله، پایش مبتنی بر حسگر و مدل‌های پیش‌بینی تولید پسماند به عنوان مسیرهای موثر مطرح شده‌اند (Fang et al., 2023). در مدیریت پسماند، خودکارسازی تفکیک زباله به یک مسئله‌ی کاربردی و مهم تبدیل شده است، زیرا حجم پسماند شهری رو به افزایش است، تفکیک دستی پرهزینه و زمان‌بر است و آلودگی جریان بازیافت می‌تواند کارایی سامانه‌های بازیافت را کاهش دهد. یک مرور نظام‌مند جدید نشان می‌دهد که کاربردهای یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در مدیریت پسماند شهری به سرعت در حال گسترش است (Dawar et al., 2025). بنابراین، ترکیب یادگیری عمیق با سامانه‌های تفکیک پسماند می‌تواند هم از نظر عملیاتی و هم از نظر اقتصادی، جایگزینی دقیق‌تر و

مقیاس پذیرتر برای روش‌های سنتی باشد (Ahmad et al., 2025; Sayem et al., 2025). برای ارزیابی الگوریتم‌ها در شرایط نزدیک به واقعیت، استفاده از مجموعه داده‌های واقعی اهمیت ویژه‌ای دارد، Realwaste یکی از مجموعه داده‌های واقعی و نسبتاً جدید پسماند است و امکان آزمون مدل‌ها را بر روی نمونه‌هایی فراهم می‌کند که به کاربرد عملی نزدیک‌اند (Single et al., 2023).

از سوی دیگر، برای انتخاب معماری پایه، EfficientNet یک گزینه مناسب به شمار می‌آید؛ زیرا این خانواده از مدل‌ها تعادل مناسبی میان عمق، عرض و وضوح تصویر ایجاد می‌کند و در مسائل تصویری کارایی بالایی دارد. در نتیجه، EfficientNetB0 می‌تواند برای طبقه‌بندی پسماند در مسئله‌ی حاضر به کار رود (Tan & Le, 2019). در کنار طبقه‌بندی، برای تصاویر شلوغ و چندشیی نیز روش‌های تشخیص شیء اهمیت دارند؛ مطالعات جدید نشان می‌دهند که مدل‌هایی مانند YOLOv8 می‌توانند برای شناسایی و تفکیک پسماند در سناریوهای واقعی مفید باشند و در کنار مدل‌های طبقه‌بندی محور، یک مسیر مکمل برای تحلیل تصاویر پیچیده فراهم کنند (Arishi, 2025; Mehadjbia & Slaoui-Hasnaoui, 2024).

انتقال یادگیری رویکردی است که در آن دانش یا الگوهای آموخته شده از یک دامنه‌ی مبدا به یک دامنه‌ی هدف منتقل می‌شود تا مدل جدید با داده‌ی کمتر، سریع‌تر و کارآمدتر آموزش ببیند (Wu & He, 2025). در آموزش مدل‌های بینایی ماشین، افزایش مصنوعی داده‌ها یکی از راهبردهای استاندارد برای افزایش تنوع نمونه‌های آموزشی و کاهش بیش‌برازش است؛ روش‌هایی مانند چرخش، برش، تغییر رنگ و ترکیب تصاویر در کاربردهای طبقه‌بندی تصویر موثر گزارش شده‌اند. در مسائلی مانند طبقه‌بندی پسماند، کمبود داده‌های برچسب خورده و ناهمگونی نمونه‌ها معمولاً باعث می‌شود مدل‌های عمیق برای تعمیم‌پذیری به راهبردهای مکمل نیاز داشته باشند. در چنین شرایطی، انتقال یادگیری با انتقال دانش از یک مدل از پیش آموزش دیده به دامنه‌ی هدف، وابستگی به داده‌های جدید را کاهش می‌دهد؛ از سوی دیگر، افزایش مصنوعی داده‌ها در تصاویر، با بالا بردن تنوع نمونه‌های آموزشی، به کاهش بیش‌برازش و بهبود عملکرد مدل کمک می‌کند. بنابراین، ترکیب انتقال یادگیری و افزایش مصنوعی داده‌ها، در کاربردهای بینایی ماشین، به ویژه در طبقه‌بندی تصاویر واقعی پسماند، یک راهبرد موثر برای رسیدن به دقت بالاتر و آموزش کارآمدتر است (Zhuang et al., 2020; Jordan & Mitchell, 2015).

بررسی‌ها نشان می‌دهد پژوهش‌های داخلی و مقالات فارسی منتشر شده با محوریت مسئله‌ی تفکیک هوشمند پسماند با کمک یادگیری عمیق و پردازش تصویر زیاد نیستند؛ در یکی از این پژوهش‌ها، محققان با کمک بیش از ۳۵۰۰ تصویر جمع‌آوری شده از اینترنت برای چهار نوع از بطری‌ها و با استفاده از معماری پایه VGG16 مدلی برای طبقه‌بندی تصاویر طراحی کردند (Bayatzadeh et al. 2025). در پژوهش حاضر ضمن استفاده از مجموعه داده‌ای با تعداد تصاویر و تنوع تصاویر بیشتر، از معماری مدرن‌تر EfficientNetB0 بهره برده شده است. پژوهش‌های قبلی نشان از این دارند که EfficientNetB0 با وجود تعداد پارامترهای خیلی کمتر نسبت به VGG16، مدلی بهینه‌تر و معمولاً دقیق‌تر است (Ali et al, 2025; Tan & Le, 2019). پژوهش حاضر در تلاش است با ارائه‌ی مدل‌ها و راهکارهایی برای ارتقاء کیفیت مدل‌ها جهت هوشمندسازی طبقه‌بندی پسماند، اهدافی مانند کاهش هزینه‌ها، تسریع در انجام امور و کاهش خطای انسانی را محقق کند.

روش‌شناسی پژوهش

مجموعه داده Realwaste که دارای بیش از ۴۷۰۰ تصویر از ۹ دسته مختلف است، در اواخر سال ۲۰۲۳ منتشر شده است. جهت انجام پژوهش، دسته‌ی متفرقه حذف شد تا تمرکز مدل بر روی تصاویر با برچسب دقیق حفظ شود

اما این قابلیت موجود است که اگر مدل در تشخیص برچسب تصویری، از اطمینان کافی برخوردار نبود، تصویر مورد نظر در دسته‌ی متفرقه قرار گیرد. بنابراین دسته‌های باقی مانده عبارت‌اند از پسماندهای فلزی، پسماندهای شیشه‌ای، پسماندهای کاغذی، پسماندهای مقوایی، پسماندهای آلی غذایی، پسماندهای پلاستیکی، پسماندهای گیاهی و پسماندهای نساجی/پارچه‌ای؛ این داده‌ها پس از حذف داده‌های دسته متفرقه حدود ۴۲۰۰ عدد شدند (Single et al., 2023). جدول ۱، اطلاعات مجموعه داده را نمایش می‌دهد.

جدول ۱. اطلاعات مجموعه داده Realwaste

Table 1. Realwaste dataset information

ردیف	عنوان اصلی موجود در مجموعه داده	ترجمه فارسی	تعداد تصاویر موجود در مجموعه داده
۱	Cardboard	پسماندهای مقوایی	۴۶۱
۲	Food Organics	پسماندهای آلی غذایی	۴۱۱
۳	Glass	پسماندهای شیشه‌ای	۴۲۰
۴	Metal	پسماندهای فلزی	۷۹۰
۵	Paper	پسماندهای کاغذی	۵۰۰
۶	Plastic	پسماندهای پلاستیکی	۹۲۱
۷	Textile Trash	پسماندهای نساجی/پارچه‌ای	۳۱۸
۸	Vegetation	پسماندهای گیاهی	۴۳۶
۹	Miscellaneous Trash	پسماندهای متفرقه	۴۹۵

شکل ۱ دربرگیرنده تعدادی از نمونه تصاویر هر دسته از مجموعه Realwaste می‌باشد.



شکل ۱. نمونه‌ای از تصاویر در مجموعه داده Realwaste

Figure 1. Example of images in the Realwaste dataset

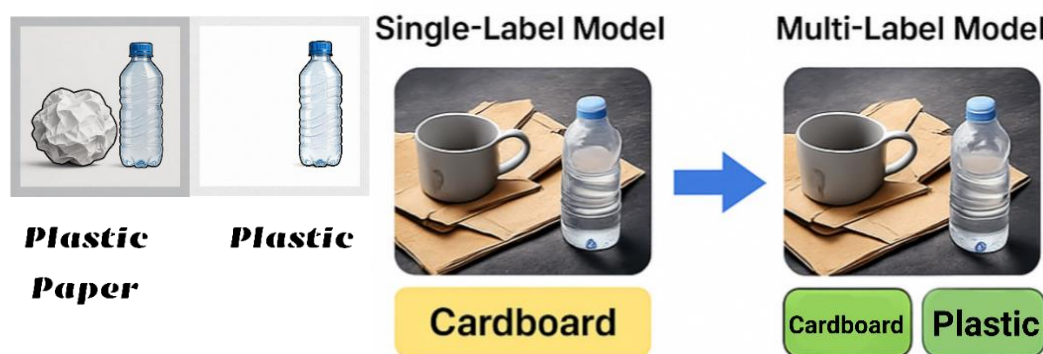
در شکل ۱، شماره هر دسته با ردیف‌های جدول ۱ متناظر می‌باشد. در هر دسته، تعدادی تصویر جدید (جدا از داده‌های اولیه) مطابق با آن دسته، برای کمک به افزایش بیشتر تنوع داده‌ها از اینترنت دانلود و به دسته‌ها اضافه شد.

تصاویر اولیه به حدود ۵۰۰۰ تصویر رسیدند. سپس تکنیک‌های افزایش مصنوعی داده‌ها^۱ مانند چرخش، تغییر نور، ترکیب تصاویر در نظر گرفته شد تا سعی شود از بیش‌برازش^۲ جلوگیری شود. این تکنیک‌های افزایش مصنوعی داده‌ها در کد پایتون آموزش مدل، کدنویسی شده قرار گرفتند.

در این پژوهش، دو مدل ساخته شده است؛ یک مدل تک‌برچسبی که برای هر تصویر، یک دسته را مشخص می‌کند (یکی از ۸ دسته‌ی اصلی) و مدل دوم، مدل چندبرچسبی است که می‌تواند برای هر تصویر و برای تمام دسته‌ها (هر ۸ دسته) مستقل از سایر دسته‌ها، بررسی کند و برای دسته‌هایی که مدل از اطمینان قابل قبولی برخوردار است، برچسب را اطلاق کند. با این روش می‌توان تلاش کرد اگر در یک تصویر، به عنوان مثال کارتن موجود بود و پلاستیک هم موجود بود، مدل هر دو دسته را مشخص کند و نمایش دهد:

پسماندهای مقوایی - پسماندهای پلاستیکی

شکل ۲، نمونه‌هایی از تفاوت عملکرد دو مدل را نمایش می‌دهند.



شکل ۲. تفاوت مدل تک‌برچسبی و چندبرچسبی

Figure 2. Difference between single-label and multi-label models

در شکل ۲ و تصویر سمت راست، مدل تک‌برچسبی آن دسته‌ای را خروجی می‌دهد که اطمینانش روی آن بیشتر است که در اینجا Cardboard انتخاب شده است؛ اما انتظار می‌رود مدل چندبرچسبی هر دو برچسب صحیح را خروجی دهد. در تصویر سمت چپ در شکل ۲، سمت راست فقط یک تصویر قرار دارد، بنابراین انتظار می‌رود هر دو مدل یک برچسب خروجی دهند. اما تصویر سمت چپ، دو نوع تصویر دارد بنابراین انتظار می‌رود مدلی که توانایی خروجی دادن بیش از یک برچسب را دارد، هر دو برچسب صحیح را خروجی دهد. لازم به ذکر است که تصاویر موجود در شکل ۲، ارتباطی با مجموعه داده‌ی Realwaste ندارند و صرفاً برای شفافیت بهتر در تفاوت رویکرد دو مدل آورده شده‌اند.

از آنجا که تصاویر مجموعه Realwaste روی یک زباله تمرکز دارند، سعی شده است با تکنیک‌های ترکیب تصاویر، شرایط بهتری برای آموزش مدل چندبرچسبی ایجاد شود. در این پروژه از مدل EfficientNetB0 برای نقطه شروع آموزش، کمک گرفته شده، اما تغییرات لازم و مطابقت دادن با داده‌های خاص این پروژه، اعمال شده است؛ در ادامه توضیحاتی ارائه می‌گردد. این مدل معرفی شده توسط پژوهشگران شرکت گوگل، روی حدود ۱/۲ میلیون تصویر با حدود ۱۰۰۰ دسته، آموزش دیده است. اما در پاسخ به این سوال که این مدل چه کمکی می‌تواند به این پروژه‌ی خاص با ۸ دسته، جهت تفکیک زباله کند؟ می‌توان گفت: از این مدل استفاده شده تا از ویژگی‌های عمومی و پایه‌ای تصاویر

¹ Data Augmentation

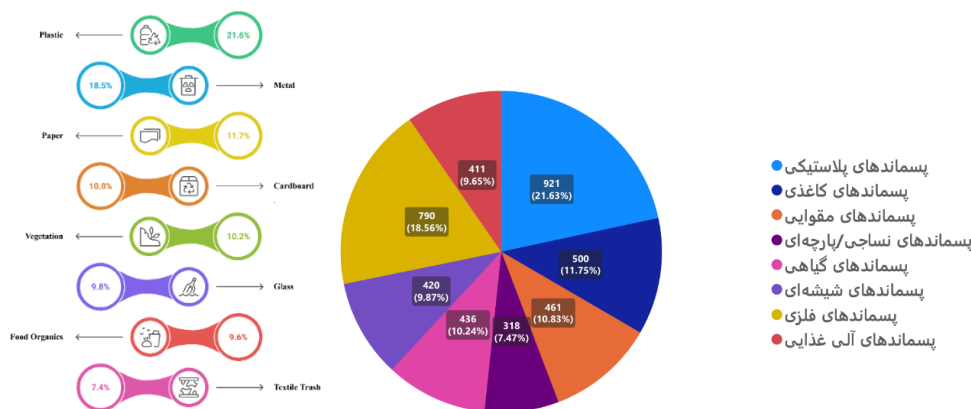
² Overfitting

که مدل روی داده‌ها با تعداد زیاد آموخته است (مثل تشخیص لبه‌ها، اشکال، الگوهای پایه‌ای) بهره برده شود. اما مدل جدید، برای یک مسئله‌ی خاص طراحی شده و روی حدود ۵۰۰۰ تصویر آماده شده آموزش دیده است (مجموعه داده‌ی Realwaste و تصاویر اضافه شده به آن). مدل چندبرچسبی آماده شده با عملکرد مدل پژوهشگران شرکت گوگل که تک‌برچسبی است، متفاوت است.

یک شبکه عصبی (مثل EfficientNetB0) از تعداد زیادی لایه تشکیل شده است که هر لایه، وظیفه‌ای دارد (Khanam et al., 2024). مدل معرفی شده پژوهشگران گوگل، بیش از ۲۰۰ لایه دارد. از این مدل کمک گرفته شده، اما نه برای طبقه‌بندی در ۱۰۰۰ دسته بلکه برای طبقه‌بندی در ۸ دسته‌ی مسئله‌ی خاص مورد بررسی در این پژوهش، کمک گرفته شده است. به نوعی از این مدل به عنوان یک نقطه شروع استفاده شده است، اما تغییراتی اعمال شده تا برای مسئله‌ی خاص مورد بررسی، مناسب گردد. لایه‌هایی حذف شده اند و لایه‌هایی اضافه شده اند و مدل به جای ۱۰۰۰ دسته، ۸ دسته تشخیص می‌دهد. انجام این تغییرات با کدنویسی به زبان پایتون صورت گرفته است. داده‌ها با تکنیک‌هایی مثل CutMix و MixUp متنوع‌تر شده اند.

مدل EfficientNet، می‌تواند در یاد گرفتن ویژگی‌های عمومی (که برای تشخیص تمام و یا اکثر تصاویر کاربردی است) مثل لبه‌ها مفید باشد. ابتدا برخی لایه‌ها، غیرقابل تغییر و ثابت شدند و سپس لایه‌های اضافه شده، آموزش دیدند (روی داده‌های این پروژه) و سپس برخی لایه‌های ثابت شده و فریز شده آزاد شدند تا مطابقت بهتری با دیتاهای خاص پروژه تفکیک زباله داشته باشند اما لایه‌های ابتدایی تا انتها، فریز شده ماندند چون ویژگی‌های عمومی تصاویر را دارند و نیازی به تغییر آن‌ها نیست. این کار به مدل اجازه می‌دهد تا ابتدا روی ویژگی‌های عمومی مانند لبه‌ها و الگوهای پایه تمرکز کند و فقط لایه‌های جدید که اضافه شده اند آموزش ببینند. این تکنیک و استفاده از انتقال یادگیری، توانست کمک کند تا مسیر بهتری برای آموزش مدل، پیگیری شود. در این پژوهش، روش یا الگوریتم مورد استفاده، نسبت به مدل EfficientNet تغییر کرده است. برخلاف مدل ذکر شده، از الگوریتم Adaptive Moment Estimation و یا Adam برای بهینه‌سازی استفاده شد. مدل EfficientNetB0 با RMSProp آموزش دیده است اما در این پروژه از Adam استفاده شده زیرا برای مجموعه داده‌های کوچک‌تر (درقیاس با دیتاهایی که مدل EfficientNetB0 روی آن‌ها آموزش دیده که تصاویر بسیار زیادی هستند) و مسائل سفارشی شده، عملکردی پایدارتر و همگرایی سریع‌تری دارد و برای دیتاهای کوچک‌تر مناسب‌تر است (Kingma & Ba, 2014).

شکل ۳، نشان‌دهنده‌ی درصد تصاویر هر دسته از تصاویر در بین تمام تصاویر مجموعه‌داده Realwaste پس از حذف دسته متفرقه است.



شکل ۳. درصد وزنی هر دسته از تصاویر، نسبت به کل تصاویر

Figure 3. Weight percentage of each category of images, relative to the total images

همانطور که از شکل ۳ مشخص است، به دلیل عدم توازن در تعداد تصاویر مربوط به دسته‌های مختلف، وزن‌دهی کلاس‌ها به صورت خودکار براساس فراوانی هر کلاس انجام گرفت تا در حین آموزش، مدل نسبت به دسته‌های کم‌نمونه، دقت بیشتری نشان دهد. در این پروژه، از کتابخانه‌هایی در کدنویسی پایتون استفاده گردید؛ دو نمونه از کتابخانه‌های اصلی عبارت اند از: Scikit-learn و TensorFlow، و برنامه‌نویسی در Visual Studio Code انجام گرفت.

در مدل تک‌برچسبی، مدل فقط یک برچسب و اطمینان مربوط به همان برچسب را در خروجی نمایش می‌دهد (مدل، برچسبی که بالاترین اطمینان را در آن دارد، خروجی می‌دهد). در این پژوهش داده‌های آموزش و اعتبارسنجی با نسبت ۷۰ درصد به ۳۰ درصد تعیین شدند.

در این پژوهش، هر دو مدل بر پایه‌ی خروجی‌های مستقل sigmoid طراحی شدند؛ به این معنا که برای هر کلاس، یک مقدار بین صفر و یک تولید می‌شود و این مقادیر الزاماً جمعی برابر با یک ندارند (Cheng et al., 2022). این رویکرد در مدل تک‌برچسبی هم برقرار بود و علت آن یکسان‌سازی معماری خروجی دو مدل برای مقایسه‌پذیری ساده‌تر می‌باشد. بنابراین، مدل تک‌برچسبی در زمان پیش‌بینی، تنها برچسبی را که بیشترین مقدار را دارد به عنوان پاسخ نهایی گزارش می‌کند، در حالی که مدل چندبرچسبی همه‌ی برچسب‌هایی را که مقدار خروجی آن‌ها از آستانه‌ی تعیین شده (۰/۲۵) بیشتر باشد نمایش می‌دهد.

یافته‌ها

در این پژوهش، با بهره‌گیری از توانمندی‌های یادگیری عمیق و بینایی ماشین، گامی موثر در جهت توسعه‌ی سامانه‌ای هوشمند برای طبقه‌بندی و تفکیک خودکار زباله‌ها برداشته شد. استفاده از معماری کارآمد EfficientNetB0 و بهره‌گیری از تکنیک‌هایی مانند افزایش مصنوعی داده‌ها، فریز کردن لایه‌ها و بهینه‌سازی الگوریتم آموزش باعث شد که مدل نهایی، عملکردی مناسب و قابل قبول در دسته‌بندی تصاویر زباله‌ها از خود نشان دهد که نتایج حاصل در قالب شکل، آورده شده است.

ساخت دو مدل مجزا برای طبقه‌بندی تک‌برچسبی و چندبرچسبی، امکان مقایسه و بررسی کارایی رویکردهای مختلف در تفکیک زباله را فراهم ساخت. در مدل تک‌برچسبی تفاوت بین خطای آموزشی^۱ و خطای اعتبارسنجی^۲ در طول آموزش مدل، مقداری افزایش یافت؛ این نشان‌دهنده‌ی این است که احتمال بیش‌برازش خفیف وجود دارد اما به اندازه‌ای نیست که به مدل آسیب جدی بزند. در مدل چندبرچسبی، فاصله‌ی خطای آموزشی و اعتبارسنجی حین آموزش مدل، متعادل‌تر و مناسب بود که مدل احتمالاً نه کم‌برازش^۳ است و نه بیش‌برازش شده که اتفاق خوبی است. افزایش مصنوعی بیشتر داده‌ها و استفاده از تصاویر ترکیبی، در این موضوع تاثیرگذار بوده اند. همچنین کاهش تعداد دوره‌های آموزش و یا اپک‌ها در جلوگیری از بیش‌برازش شدن مدل چندبرچسبی تاثیرگذار بوده است؛ چراکه پس از تشخیص بیش‌برازش خفیف در مدل تک‌برچسبی، در آموزش مدل چندبرچسبی، تعداد اپک‌ها کاهش داده شد. با اینکه مدل چندبرچسبی از نظر بیش‌برازش شدن محافظت بیشتری داشت اما همانطور که گفته شده، سطح بیش‌برازش شدن مدل تک‌برچسبی نیز قابل قبول است.

مدل‌های تک‌برچسبی و چندبرچسبی با تصاویری جدید که مدل‌ها در زمان آموزش، آن‌ها را ندیده اند، تست شدند (این تصاویر از اینترنت دانلود شدند). نتایج حاصل از ارزیابی نهایی مدل‌ها روی تصاویر جدید، نشان‌دهنده نقاط قوت

^۱ training loss

^۲ validation loss

^۳ Underfit

و ضعف مدل‌ها است. با استفاده از این نتایج می‌توان مشخص کرد که مدل‌های فعلی در چه مواردی کاربرد دارند و جهت چه استفاده‌هایی نیاز به ارتقاء مدل‌های فعلی وجود دارد.



شکل ۴. تصویر دسته پسماندهای کاغذی
Figure 4. Image of paper waste pile

اولین تصویر دانلود شده از اینترنت که مدل‌ها روی آن تست شدند یعنی تصویر شکل ۴، متعلق به دسته‌ی پسماندهای کاغذی است که خروجی چاپ شده مدل چندبرچسبی در ترمینال^۱ نرم‌افزار به این صورت بود:

Predicted Labels²: Paper: 0.76

مدل چندبرچسبی با اطمینان ۰/۷۶ از ۱ یا ۷۶ درصدی، پسماند کاغذی تشخیص داد که صحیح است. مدل برای این تصویر تنها یک برچسب تولید کرد که نشان می‌دهد اطمینان مدل برای تعلق گرفتن این تصویر به سایر دسته‌ها، کمتر از حد آستانه است که در این پروژه، ۲۵ درصد تعیین شده است. باتوجه به اینکه تصویر دقیقاً در دسته‌ی پسماندهای کاغذی قرار دارد، مدل به درستی عمل کرده است. خروجی مدل تک‌برچسبی در ترمینال نرم‌افزار:

Predicted Class: Paper (0.84)

مدل تک‌برچسبی با اطمینان ۰/۸۴ از ۱ یا ۸۴ درصدی، پسماند کاغذی تشخیص داد که صحیح است. درمورد این تصویر مشاهده می‌شود که مدل تک‌برچسبی بهتر عمل کرده است (۸ درصد اطمینان بالاتر دارد).



شکل ۵. تصویر دسته پسماندهای نساجی/پارچه‌ای
Figure 5. Image of textile/fabric waste category

دومین تصویر دانلود شده از اینترنت که مدل روی آن تست شد یعنی شکل ۵، متعلق به دسته‌ی پسماندهای نساجی/پارچه‌ای است که خروجی چاپ شده مدل چندبرچسبی در ترمینال به این صورت بود:

Predicted Labels: Textile Trash: 0.87

^۱ Terminal

^۲ برچسب‌های پیش‌بینی شده

مدل چندبرچسبی با اطمینان ۰/۸۷ از ۱ یا ۸۷ درصدی، پسماند نساجی/پارچه‌ای تشخیص داد که صحیح است. مدل برای این تصویر فقط یک برچسب تولید کرد. خروجی مدل تکبرچسبی در ترمینال نرم‌افزار:

Predicted Class: Textile Trash (0.80)

مدل تکبرچسبی با اطمینان ۰/۸۰ از ۱ یا ۸۰ درصدی، پسماند نساجی/پارچه‌ای تشخیص داد که صحیح است. درمورد این تصویر مدل چندبرچسبی با ۸۷ درصد اطمینان، بهتر از مدل تکبرچسبی با اطمینان ۸۰ درصدی عمل کرد، اما هر دو مدل برچسب صحیح تولید کردند.



شکل ۶. تصویر دسته پسماندهای آلی غذایی

Figure 6. Image of organic food waste category

سومین تصویر داللود شده از اینترنت که مدل روی آن تست شد یعنی شکل ۶، متعلق به دسته‌ی پسماندهای آلی غذایی است که خروجی چاپ شده مدل چندبرچسبی در ترمینال به این صورت بود:

Predicted Labels: Food Organics: 0.93

Predicted Labels: Textile Trash: 0.31

مدل دو برچسب تولید کرد؛ با اطمینان ۰/۹۳ از ۱ یا ۹۳ درصدی، پسماند آلی غذایی و با اطمینان ۰/۳۱ از ۱ یا ۳۱ درصدی، پسماند نساجی/پارچه‌ای پیش‌بینی شدند. از آنجا که مدل با اطمینان سه برابر بالاتر، تصویر را پسماند آلی غذایی تشخیص داده پس می‌توان برچسب نسبت داده شده از مدل برای تصویر را همان Food Organics در نظر گرفت که صحیح است. همچنین در صورت تمایل می‌توان کدنویسی کرد و این شرط را تعیین کرد که به عنوان مثال اگر اطمینان مدل بالای ۶۵ درصد بود، برچسب نمایش داده شود. با انجام این کار، زمانی که اطمینان مدل زیاد نیست، برچسب مدل نمایش داده نمی‌شود و این عدد (۶۵ درصد) را نیز می‌توان به دلخواه در کد تست مدل، تغییر داد. خروجی مدل تکبرچسبی در ترمینال نرم‌افزار:

Predicted Class: Food Organics (0.87)

مدل تکبرچسبی با اطمینان ۰/۸۷ از ۱ یا ۸۷ درصدی، پسماند آلی غذایی تشخیص داد که صحیح است. مدل چندبرچسبی با اطمینان ۹۳ درصدی، درمورد تشخیص برچسب صحیح این تصویر، بهتر عمل کرده است.



شکل ۷. تصویر دسته پسماندهای پلاستیکی

Figure 7. Image of plastic waste pile

چهارمین تصویر دانلود شده از اینترنت که مدل روی آن تست شد یعنی شکل ۷، متعلق به دسته‌ی پسماندهای پلاستیکی است که خروجی چاپ شده مدل چندبرچسبی در ترمینال به این صورت بود:

Predicted Labels: Plastic: 0.94

مدل چندبرچسبی با اطمینان ۰/۹۴ از ۱ یا ۹۴ درصدی، پسماند پلاستیکی تشخیص داد که صحیح است. مدل برای این تصویر فقط یک برچسب تولید کرد. خروجی مدل تک‌برچسبی در ترمینال نرم‌افزار:

Predicted Class: Plastic (0.91)

مدل تک‌برچسبی با اطمینان ۰/۹۱ از ۱ یا ۹۱ درصدی، پسماند پلاستیکی تشخیص داد که صحیح است. مدل چندبرچسبی با اطمینان ۹۴ درصدی، درمورد تشخیص برچسب صحیح این تصویر، بهتر عمل کرده است. با مقایسه‌ی عملکرد هر دو مدل در پیش‌بینی برچسب تصاویر ۴ تا ۷، می‌توان نتیجه گرفت که مدل چندبرچسبی در ۳ مورد از ۴ مورد، با اطمینان بیشتری دسته‌ی صحیح را تشخیص داده است و همچنین متوسط اطمینان مدل چندبرچسبی در تشخیص دسته‌ی صحیح ۰/۸۷۵ از ۱ بوده است و این عدد برای مدل تک‌برچسبی، ۰/۸۵۵ از ۱ بوده است.



شکل ۸. تصویر دسته متفرقه

Figure 8. Miscellaneous category image

پنجمین تصویر دانلود شده از اینترنت که مدل روی آن تست شد یعنی شکل ۸، متعلق به هیچ‌کدام از ۸ دسته اصلی که مدل روی تصاویر آن‌ها آموزش دیده است نیست که خروجی چاپ شده مدل چندبرچسبی در ترمینال به این صورت بود که یعنی: هیچ برچسبی پیش‌بینی نشد (همه‌ی اطمینان‌ها کمتر از آستانه‌ی تعیین شده اند):

No labels predicted (all confidence below threshold).

مدل برچسبی اختصاص نداد؛ چراکه ویژگی‌های موجود در تصویر، با ویژگی‌های تصاویری که مدل روی آن‌ها آموزش دیده (۸ دسته)، بسیار متفاوت است و مدل به اطمینان قابل قبولی جهت ارائه برچسب نرسید. حداقل آستانه تعیین شده برای مدل جهت چاپ برچسب، اطمینان ۰/۲۵ از ۱ یا ۲۵ درصدی است.

خروجی مدل تک‌برچسبی در ترمینال نرم‌افزار:

Predicted Class: Metal (0.29)

مدل تک‌برچسبی اطمینان پایینی روی این تصویر دارد (۰/۲۹ از ۱ یا ۲۹ درصدی). اما از آنجا که حداقل اطمینان لازم برای چاپ برچسب ۲۵ درصد تعیین شده است (که می‌توان آن را تغییر داد)، مدل تک‌برچسبی، برچسب پسماند فلزی را تولید کرده است، اما مدل چندبرچسبی از آنجا که هیچ برچسبی تولید نکرده است، بنابراین اطمینانی پایین‌تر از ۲۵ درصد برای این تصویر در تمام دسته‌ها داشته است و از آنجا که این تصویر در هیچ دسته‌ای قرار نمی‌گیرد، بنابراین می‌توان گفت مدل چندبرچسبی بهتر عمل کرده است.



شکل ۹. تصویر دسته تصاویر پیچیده (حضور هم‌زمان چند نوع پسماند)

Figure 9. Image of a complex image cluster (simultaneous presence of multiple types of waste)

ششمین تصویر دانلود شده از اینترنت که مدل روی آن تست شد یعنی شکل ۹، تصویری است که از ترکیب پنج نوع مختلف از تصاویر پسماند که مدل‌ها روی آن‌ها آموزش دیده اند ایجاد شده است، که تصویری پیچیده به حساب می‌آید. هدف از ارائه این تصویر به مدل‌ها این است که توانایی آن‌ها روی تصاویر پیچیده سنجیده شود. خروجی چاپ شده مدل چندبرچسبی در ترمینال به این صورت بود:

Predicted Labels: Food Organics: 0.35

Predicted Labels: Glass: 0.30

مشاهده می‌شود که مدل نتوانست تمام برچسب‌ها را به درستی پیش‌بینی کند و همچنین مدل اطمینان‌های پایینی دارد (۰/۳۵ از ۱ یا ۳۵ درصد و ۰/۳۰ از ۱ یا ۳۰ درصد)، البته برچسب‌هایی که مدل پیش‌بینی کرده است، صحیح هستند (با اطمینان ۳۰ درصدی پسماند شیشه‌ای و با اطمینان ۳۵ درصدی پسماند آلی غذایی) اما این یک خروجی ناقص است. این تصویر دقیقاً نقطه ضعف مدل‌های فعلی را بیان می‌کند. در صورتی که هدف، تحلیل تصاویر شلوغ که دربرگیرنده چندین دسته مختلف هستند باشد، استفاده از مدل‌های تشخیص اشیاء مثل YOLO یکی از راه‌حل‌های مقابله با این مشکل است.

خروجی مدل تک‌برچسبی در ترمینال نرم‌افزار:

Predicted Class: Food Organics (0.28)

مدل تک‌برچسبی با اطمینان ۰/۲۸ از ۱ یا ۲۸ درصدی، پسماند آلی غذایی تشخیص داد. از آنجایی که مدل تک‌برچسبی تنها یک برچسب تولید می‌کند، مدل تصویر را پسماند آلی غذایی تشخیص داد که یکی از پنج تصویر

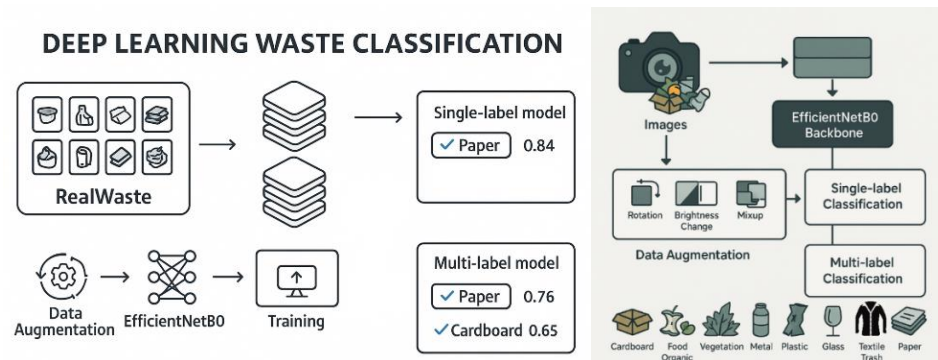
شکل ۵، پسماند آلی غذایی است اما به جهت پیچیدگی تصویر، مدل دقت پایینی دارد. همچنین مشاهده می‌شود که مدل چندبرچسبی نیز برچسب را تولید کرده است اما با دقت بالاتری نسبت به مدل تک‌برچسبی (دقت ۳۵ درصدی) بنابراین درمورد این تصویر مدل چندبرچسبی بهتر عمل کرده است.

مقایسه تجربی نمونه‌های آزمون که شرح داده شد، نشان داد که مدل چندبرچسبی در بسیاری از موارد با اطمینان مناسب‌تری برچسب‌های درست را گزارش کرده است. یکی از دلایل محتمل این رفتار، کاهش تعداد دورها در آموزش مدل چندبرچسبی است؛ زیرا مدل تک‌برچسبی، نشانه‌هایی از بیش‌برازش خفیف را نشان می‌داد، در حالی که در مدل چندبرچسبی با کاهش تعداد دورهای آموزش، این مشکل تا حد زیادی کنترل شد. در نتیجه به عنوان یکی از دلایل، بهبود مشاهده شده در مدل چندبرچسبی را می‌توان تا حدی به کاهش بیش‌برازش نسبت داد. همچنین برتری مدل چندبرچسبی در این مقاله باید به صورت یک مشاهده‌ی تجربی تفسیر شود. مشاهده‌ی تجربی نشان از آن داشت که مدل چندبرچسبی در تحلیل تصاویر با یک شیء، از مدل تک‌برچسبی بهتر عمل کرد اما به دلیل محدودیت‌های معماری EfficientNet در تحلیل تصاویر با چند شیء، مدل چندبرچسبی نتوانست در تحلیل تصویر با چندین پسماند، اطمینان قابل قبولی ارائه دهد، هرچند در این تحقیق، مدل چندبرچسبی در تحلیل تصاویر پیچیده، بهتر از مدل تک‌برچسبی عمل کرد. به همین منظور از نتایج پژوهش می‌توان برداشت کرد که جهت تحلیل تصاویر چندشیئی، بهتر است از انواع دیگری از مدل‌ها کمک گرفت که YOLO پیشنهاد می‌شود.

بحث

در این پژوهش، عملکرد مدل‌ها به صورت تجربی و با اعمال آن‌ها بر چند تصویر جدید دانلود شده از اینترنت در حالت‌های مختلف، مقایسه و ارزیابی شد. با این حال، جداسازی درصد قابل قبول و مناسبی از داده‌ها پیش از آموزش مدل و سپس ارزیابی مدل نهایی بر روی این داده‌ها که در فرایند آموزش توسط مدل مشاهده نشده اند، همراه با گزارش معیارهایی مانند دقت، precision، یادآوری و F1-score، می‌تواند به شناخت دقیق‌تر عملکرد مدل‌ها کمک کند. در پژوهش حاضر، برای امکان‌پذیر شدن مقایسه‌ی تجربی مدل‌ها در تشخیص دسته‌ی صحیح، خروجی مدل تک‌برچسبی نیز همانند مدل چندبرچسبی به صورت sigmoid تعریف شد و در مرحله‌ی پیش‌بینی، مدل تک‌برچسبی برچسب دارای بیشترین مقدار را به عنوان خروجی نهایی در نظر گرفت. با این حال، ارزیابی مدل‌ها با مجموعه داده‌ی آزمون مستقل، تصاویر بیشتر و معیارهای کمی متنوع‌تر، می‌تواند در پژوهش‌های آتی دنبال شود.

استفاده از مدل‌های تشخیص اشیاء مثل YOLO می‌تواند مدل را برای تحلیل تصاویر پیچیده‌تر و استفاده در محل‌های دفن زباله در دنیای واقعی، قابل اعتمادتر و مناسب‌تر کند. در این پژوهش از مدل EfficientNetB0 به عنوان مدل پایه استفاده شد و مدل فعلی، علی‌رغم تمام نقطه قوت‌هایش، در موقعیت‌هایی که تصویر دارای بیش از یک نوع زباله است یا تصویر پیچیده است، ممکن است کارایی لازم را در مقایسه با مدل‌هایی مثل YOLO نداشته باشد. استفاده از مدل‌های YOLO می‌تواند این مشکل را به خوبی مدیریت کند. مدل‌های تشخیص شیء، هم موقعیت شیء و هم نوع آن را در تصاویر پیچیده با چندین نوع پسماند در یک تصویر مشخص می‌کنند. در این پژوهش محدودیت مدل‌های EfficientNet در تحلیل تصاویر چندشیئی دیده شد اما استفاده از YOLO انجام نشد. به کار بردن YOLO در پژوهش‌های آتی، توصیه می‌گردد.



شکل ۱۰. مدل گرافیکی پروژه

Figure 10. Graphical model of the project

شکل ۱۰، مدل گرافیکی پروژه شامل افزایش مصنوعی داده‌ها، معماری مدل، طبقه‌های پیش‌بینی شده توسط مدل و انواع مدل‌ها را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

استفاده از یادگیری ماشین و به خصوص یادگیری عمیق باعث می‌شود بتوان مسائل پیچیده را با هزینه‌ی کمتر و سرعت و دقت بالاتر انجام داد و محیط زیست یکی از حوزه‌هایی است که می‌تواند از این پتانسیل به خوبی بهره‌برد. در این پژوهش، با بهره‌گیری از توانمندی‌های یادگیری عمیق و بینایی ماشین، گامی موثر در جهت توسعه سامانه‌ای هوشمند برای طبقه‌بندی و تفکیک خودکار زباله‌ها در هشت دسته برداشته شد. استفاده از معماری کارآمد EfficientNetB0 و بهره‌گیری از تکنیک‌هایی مانند افزایش مصنوعی داده‌ها، فریز کردن لایه‌ها، وزن‌دهی کلاس‌ها و بهینه‌سازی الگوریتم آموزش با Adam منجر به این شد که مدل‌های نهایی، عملکردی مناسب و قابل قبول در دسته‌بندی تصاویر زباله‌ها از خود نشان دهند. ساخت دو مدل مجزا برای طبقه‌بندی تک‌برچسبی و چندبرچسبی، امکان مقایسه و بررسی کارایی رویکردهای مختلف در تفکیک زباله را فراهم ساخت.

نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌ها روی تصاویر جدید نشان داد که در این تحقیق هر دو مدل در طبقه‌بندی تصاویر، عملکرد مناسبی داشتند، اما مدل چندبرچسبی در مجموع نسبت به مدل تک‌برچسبی، دقیق‌تر عمل کرد. مدل چندبرچسبی همچنین در تشخیص تصویر نامرتب با دسته‌های آموزش دیده و تصویر پیچیده که شامل چندین نوع پسماند بود، عملکرد بهتری از خود نشان داد. مدل تک‌برچسبی در تحلیل تصاویر با یک نوع پسماند گاهی اطمینان بالاتری ارائه داد اما مدل چندبرچسبی به دلیل مدیریت بهتر آموزش مدل، در مجموع در آزمون تجربی موفق‌تر عمل کرد. به طور کلی رویکرد چندبرچسبی به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر در تشخیص هم‌زمان چندین کلاس، برای کاربردهای واقعی در خطوط بازیافت که با تنوع بالای پسماندها مواجه هستند، گزینه‌ی مناسب‌تری محسوب می‌شود که البته معماری EfficientNet، انتخاب مطمئن و یا بهترین انتخاب برای تحلیل تصاویر با چندین نوع پسماند در تصاویر پیچیده نمی‌باشد.

از منظر نظری، این پژوهش با مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های تک‌برچسبی و چندبرچسبی در حوزه تفکیک پسماند، به غنای ادبیات موجود در زمینه‌ی کاربرد یادگیری عمیق در مدیریت محیط زیست کمک کرده است. از منظر عملی، مدل‌های توسعه یافته می‌توانند ضمن ارزیابی‌های لازم و بررسی انطباق از نظر ماهیت و نوع میان تصاویری که مدل روی آن‌ها آموزش دیده با تصاویری که مدل قرار است آن‌ها را تحلیل کند؛ در خطوط بازیافت و سامانه‌های هوشمند مدیریت پسماند مورد استفاده قرار گیرند و به کاهش هزینه‌ها، تسریع در انجام امور و کاهش خطای انسانی کمک

کنند. استقرار مدل‌های پردازش تصویر در سامانه‌های هوشمند مدیریت پسماند می‌تواند گامی موثر در جهت تحقق اهداف توسعه پایدار و مدیریت بهینه‌ی منابع محسوب شود.

References

- Aghdam, F. Z., Hasanlou, M., & Dehghanijabbarlou, M. (2024). Quantifying urban air quality through multispectral satellite imagery and Google earth Engine. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 261, 106301. DOI: 10.1016/j.jastp.2024.106301
- Ahmad, G., Aleem, F. M., Alyas, T., Abbas, Q., Nawaz, W., Ghazal, T. M., ... & Ibrahim, A. M. (2025). Intelligent waste sorting for urban sustainability using deep learning. *Scientific reports*, 15(1), 27078. DOI: 10.1038/s41598-025-08461-w
- Ali, H., Shifa, N., Benlamri, R., Farooque, A. A., & Yaqub, R. (2025). A fine tuned EfficientNet-B0 convolutional neural network for accurate and efficient classification of apple leaf diseases. *Scientific Reports*, 15(1), 25732. DOI: 10.1038/s41598-025-04479-2
- Alotaibi, E., & Nassif, N. (2024). Artificial intelligence in environmental monitoring: in-depth analysis. *Discover Artificial Intelligence*, 4(1), 84. DOI: 10.1007/s44163-024-00198-1
- Arishi, A. (2025). Real-time household waste detection and classification for sustainable recycling: A deep learning approach. *Sustainability*, 17(5), 1902. DOI: 10.3390/su17051902
- Bai, T., Wang, L., Yin, D., Sun, K., Chen, Y., Li, W., & Li, D. (2023). Deep learning for change detection in remote sensing: a review. *Geo-spatial Information Science*, 26(3), 262-288. <https://doi.org/10.1080/10095020.2022.2085633>
- Bayatzadeh, M., Hosseini Rahman, S. A., Karbalai Hasani, H., & Sheikhi, M. (2025). *Dry waste detection based on an intelligent convolutional neural network system in the Arak Municipal Waste Management Organization Paya Shahr*, 7(77). [In Persian]. <https://civilica.com/doc/2333531>
- Biglarijoo, N., Shams, A., & Hadipour, V. (2025). The use of machine learning techniques in water and wastewater treatment processes: opportunities and challenges. *Numerical Methods in Civil Engineering*, 10(2), 86-101. DOI: 10.66224/NMCE.2511.1106
- Chen, L., Li, S., Bai, Q., Yang, J., Jiang, S., & Miao, Y. (2021). Review of image classification algorithms based on convolutional neural networks. *Remote Sensing*, 13(22), 4712. DOI: 10.3390/rs13224712
- Chen, Y. C. (2018). Effects of urbanization on municipal solid waste composition. *Waste management*, 79, 828-836. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.04.017
- Cheng, C. S., Chen, P. W., & Ho, Y. (2022). Control chart concurrent pattern classification using multi-label convolutional neural networks. *Applied Sciences*, 12(2), 787. <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/2/787>
- Dawar, I., Srivastava, A., Singal, M., Dhyani, N., & Rastogi, S. (2025). A systematic literature review on municipal solid waste management using machine learning and deep learning. *Artificial Intelligence Review*, 58(6), 183. DOI: 10.1007/s10462-025-11196-9
- De Mauro, A., Sestino, A., & Bacconi, A. (2022). Machine learning and artificial intelligence use in marketing: a general taxonomy. *Italian Journal of Marketing*, 2022(4), 439-457. DOI: 10.1007/s43039-022-00057-w
- Dhiman, R., Miteff, S., Wang, Y., Ma, S. C., Amirikas, R., & Fabian, B. (2024). Artificial intelligence and sustainability—A review. *Analytics*, 3(1), 140-164. DOI: 10.3390/analytics3010008
- Fang, B., Yu, J., Chen, Z., Osman, A. I., Farghali, M., Ihara, I., ... & Yap, P. S. (2023). Artificial intelligence for waste management in smart cities: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(4), 1959-1989. <https://doi.org/10.1007/S10311-023-01604-3>
- Himeur, Y., Rimal, B., Tiwary, A., & Amira, A. (2022). Using artificial intelligence and data fusion for environmental monitoring: A review and future perspectives. *Information Fusion*, 86, 44-75. DOI: 10.1016/j.inffus.2022.06.003
- Jordan, M. I., & Mitchell, T. M. (2015). Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349(6245), 255-260. DOI: 10.1126/science.aaa8415

- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications.
- Khanam, R., Hussain, M., Hill, R., & Allen, P. (2024). A comprehensive review of convolutional neural networks for defect detection in industrial applications. *IEEE Access*, 12, 94250-94295. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3425166
- Kingma, D. P., & Ba, J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. *arXiv preprint arXiv:1412.6980*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>
- Ma, L., Liu, Y., Zhang, X., Ye, Y., Yin, G., & Johnson, B. A. (2019). Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 152, 166-177. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015
- Mehadjbia, A., & Slaoui-Hasnaoui, F. (2024). Real-time waste detection based on YOLOv8. In *2024 4th Interdisciplinary Conference on Electrics and Computer (INTCEC)* (pp. 1-6). IEEE. DOI: 10.1109/INTCEC61833.2024.10603365
- Mohammadzadeh, M., Delavar, M. R., & Rabiei Dastjerdi, H. (2026). Mapping Urban Garden Destruction in Tehran Using Landsat Imagery and Machine Learning. *ISPRS Annals of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10, 533-540. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W8-2025-533-2026>
- Sarker, I. H. (2021). Deep learning: a comprehensive overview on techniques, taxonomy, applications and research directions. *SN computer science*, 2(6), 1-20. DOI: 10.1007/s42979-021-00815-1
- Sayem, F. R., Islam, M. S. B., Naznine, M., Nashbat, M., Hasan-Zia, M., Kunju, A. K. A., ... & Chowdhury, M. E. (2025). Enhancing waste sorting and recycling efficiency: robust deep learning-based approach for classification and detection. *Neural Computing and Applications*, 37(6), 4567-4583. DOI: 10.1007/s00521-024-10855-2
- Single, S., Iranmanesh, S., & Raad, R. (2023). Realwaste: a novel real-life data set for landfill waste classification using deep learning. *Information*, 14(12), 633. DOI: 10.3390/info14120633
- Tan, M., & Le, Q. (2019, May). Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In *International conference on machine learning* (pp. 6105-6114). PMLR. DOI: 10.48550/arXiv.1905.11946
- Vinuesa, R., Azizpour, H., Leite, I., Balaam, M., Dignum, V., Domisch, S., ... & Fuso Nerini, F. (2020). The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals. *Nature communications*, 11(1), 233. DOI: 10.48550/arXiv.1905.00501
- Wu, J., & He, J. (2025). Trustworthy Transfer Learning: A Survey. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 84. <https://doi.org/10.1613/jair.1.176021>
- Yuan, Q., Shen, H., Li, T., Li, Z., Li, S., Jiang, Y., ... & Zhang, L. (2020). Deep learning in environmental remote sensing: Achievements and challenges. *Remote sensing of Environment*, 241, 111716. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111716
- Zhu, X. X., Tuia, D., Mou, L., Xia, G. S., Zhang, L., Xu, F., & Fraundorfer, F. (2017). Deep learning in remote sensing: A comprehensive review and list of resources. *IEEE geoscience and remote sensing magazine*, 5(4), 8-36. DOI: 10.1109/MGRS.2017.2762307
- Zhuang, F., Qi, Z., Duan, K., Xi, D., Zhu, Y., Zhu, H., ... & He, Q. (2020). A comprehensive survey on transfer learning. *Proceedings of the IEEE*, 109(1), 43-76. DOI: 10.1109/JPROC.2020.3004555



The Role of Macrobenthic Indicator Species as Bioindicators for Assessing Marine Ecosystem Health

Ali Abbasi^{a*}, Mehran Loghmani^a

^aDepartment of Marine Biology, Faculty of Marine Sciences, Chabahar University of Maritime & Marine Sciences, Chabahar, Sistan & Baluchestan, Iran.

*Corresponding author: aliabbasi1376.2014@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-4934-0158>

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 2026/01/27
Received in revised form:
2026/02/19
Accepted 2026/02/29
Available online: 2026/03/06

Keywords:
Marine ecosystem,
Marine pollution,
Environmental monitoring,
Biodiversity,
Macrobenthic indicator
species.

ABSTRACT

Marine ecosystems are under increasing pressure from human activities & climate change, making effective monitoring more important than ever. Among the available tools, macrobenthic indicator species stand out as practical & reliable options for assessing environmental conditions in coastal & offshore waters. This review looks at what these organisms are, why they matter ecologically, & how they can be used in real-world monitoring programs. We cover the main taxonomic groups involved, including mollusks, crustaceans, annelids, echinoderms, & demersal fish, & discuss their specific roles in environmental assessment. Macrobenthic organisms work well as bioindicators for several reasons. They don't move around much, they live long enough to show cumulative effects, they respond clearly to environmental changes, & they build up pollutants in their tissues over time. These traits make them useful for judging habitat quality, tracking ecosystem health, & spotting potential problems before they get worse. Methods like IndVal, AMBI, & M-AMBI have helped make benthic assessments more reliable by adding quantitative rigor to what used to be mostly descriptive work. The literature shows that different groups serve different purposes. Polychaetes like *Capitella capitata* & *Heteromastus filiformis* are well known as signs of organic enrichment & sediment contamination. Filter-feeding bivalves are good for long-term heavy metal monitoring because they concentrate contaminants in their tissues. Amphipods respond quickly to sediment toxicity, while echinoderm larvae are sensitive to various stressors. Demersal fish add another layer by accumulating pollutants at higher positions in the food web. What makes this review different is that it brings together ecological perspectives on macrobenthic indicators while also pointing out how newer biotechnological tools could improve species identification & monitoring accuracy. Putting together regional databases of these species would make future work easier & help build more effective conservation strategies. The review also highlights that while these methods are widely used, there's still room for improvement in how species are selected & how results are interpreted across different regions.

Cite this article: Abbasi, A., & Loghmani, M. (2026). The Role of Macrobenthic Indicator Species as Bioindicators for Assessing Marine Ecosystem Health.. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 1(1), 41-59. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252593>



Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.
DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252593>

Introduction

Marine ecosystems are increasingly exposed to a wide range of anthropogenic pressures, including coastal development, industrial pollution, eutrophication, overfishing, habitat degradation, & climate change. These stressors have altered the structure & functioning of benthic habitats & have intensified the need for reliable environmental monitoring tools. Coastal & offshore marine environments provide essential ecosystem services, including nutrient cycling, carbon sequestration, food provision, & shoreline protection, all of which are critical for human well-being & economic development. However, the growing intensity & frequency of human activities in marine environments have led to unprecedented rates of biodiversity loss, habitat fragmentation, & ecosystem dysfunction, prompting urgent calls for effective monitoring & management strategies.

Among the available biological indicators, macrobenthic organisms have received considerable attention due to their ecological importance, relatively sedentary lifestyle, broad distribution, & high sensitivity to environmental disturbances. Benthic communities inhabit the seafloor & are directly exposed to contaminants, organic enrichment, & physical disturbances that accumulate in sediments. Their limited mobility prevents them from avoiding unfavorable conditions, making them reliable indicators of local environmental quality. Additionally, macrobenthic organisms exhibit a wide range of life-history traits, feeding strategies, & physiological tolerances, allowing them to reflect ecological conditions across different spatial & temporal scales. Benthic communities are also relatively easy to sample using standard grab or corer techniques, & their taxonomic identification is well-established for most major groups, facilitating standardized monitoring programs worldwide.

Macrobenthic indicator species can provide valuable information about ecosystem health by reflecting both short-term & long-term ecological changes. The presence, absence, abundance, & diversity of benthic species respond to variations in sediment characteristics, organic matter loading, oxygen availability, & contaminant concentrations. Opportunistic species often proliferate under disturbed conditions, while sensitive species decline or disappear, resulting in predictable shifts in community composition that can be quantified using ecological indices. This capacity to integrate ecological stressors over time makes macrobenthic indicators particularly valuable for assessing cumulative impacts & tracking recovery trajectories following management interventions.

The present review aimed to investigate the concept of macrobenthic indicator species, examine their ecological significance, identify major taxonomic groups used in marine environmental assessment, & evaluate their applications in monitoring marine ecosystem quality. Furthermore, this study highlights the advantages, limitations, & future prospects of using macrobenthic indicators in environmental management & conservation programs.

Method

This study was conducted as a comprehensive review of scientific literature related to macrobenthic indicator species & their applications in marine environmental monitoring. A systematic literature search was performed using major scientific databases, including Google Scholar, Scopus, Web of Science, & ResearchGate, to ensure broad coverage of peer-reviewed publications. The literature search was performed using keywords such as “indicator species,” “macrobenthos,” “marine ecosystem monitoring,” “ecological indicators,” & “benthic community structure.” Boolean operators were used to combine search terms & refine the results. The search was limited to English-language publications, & no specific time restrictions were applied to capture both foundational studies & recent advances. Studies were selected based on scientific quality, relevance to the research topic, publication in peer-reviewed journals, & contribution to ecological assessment & environmental monitoring. Preference was

given to studies that provided quantitative data, validated methodologies, & practical applications in different marine regions.

Information extracted from the selected studies was categorized & analyzed to identify common patterns, methodological approaches, major findings, & existing challenges. Particular attention was given to the ecological responses of macrobenthic communities to environmental stressors, the development of indicator-species methodologies, & the application of ecological indices such as Indicator Value Analysis (IndVal), AZTI Marine Biotic Index (AMBI), & Multivariate AMBI (M-AMBI). The extracted data were synthesized to develop a comprehensive overview of the current state of knowledge, identify methodological strengths & weaknesses, & propose directions for future research. The review also considered the geographic distribution of studies to assess the regional applicability of different indicator approaches & identify areas where knowledge is limited.

Results

The reviewed studies demonstrate that various macrobenthic groups, including polychaetes, mollusks, crustaceans, echinoderms, cnidarians, & demersal fishes, serve as effective indicators of environmental quality in marine ecosystems. Polychaete worms, particularly opportunistic species such as *Capitella capitata* & *Heteromastus filiformis*, are widely recognized as indicators of organic enrichment, sediment contamination, & hypoxic conditions. These species are often among the first to colonize disturbed sediments & can rapidly proliferate under high organic loading, making them sensitive indicators of eutrophication & wastewater discharge. Mollusks, especially filter-feeding bivalves, are capable of accumulating heavy metals & other pollutants, making them valuable biomonitors for long-term contamination assessment. Their sedentary nature & feeding behavior result in direct exposure to sediment-associated contaminants, allowing them to reflect bioavailable pollutant concentrations in the environment. Amphipod crustaceans are sensitive to sediment toxicity & organic pollution, whereas echinoderms exhibit strong responses to environmental stress during their larval stages & can indicate habitat deterioration. Demersal fish also contribute to environmental monitoring through the bioaccumulation of contaminants within higher trophic levels, providing an integrated measure of ecosystem-level contamination.

The findings further reveal that macrobenthic communities are strongly influenced by environmental variables such as sediment grain size, organic matter content, dissolved oxygen concentration, salinity, water depth, & hydrodynamic conditions. The loss of sensitive taxa & the proliferation of tolerant species lead to simplified community structures & reduced functional diversity, which can impair ecosystem functioning & resilience.

The review also highlights the growing application of quantitative methods for identifying indicator species. Approaches such as IndVal combine species abundance & frequency of occurrence to determine species-environment relationships & improve ecological assessments. Similarly, AMBI & M-AMBI have become widely used tools for evaluating ecological status based on benthic community composition. These indices assign species to ecological groups based on their sensitivity to disturbance & enable the classification of sites into quality classes ranging from undisturbed to heavily impacted.

Conclusions

The review confirms that macrobenthic indicators offer a practical & scientifically robust approach to marine environmental monitoring. Their ecological relevance, cost-effectiveness, & ability to integrate environmental conditions over time make them invaluable for detecting & quantifying anthropogenic impacts. However, successful implementation requires careful consideration of indicator selection, methodological standardization, & regional calibration. The development of comprehensive databases & continuous refinement of ecological indices will further strengthen the utility of macrobenthic indicators in environmental management.

Macrobenthic indicator species represent powerful & cost-effective tools for assessing marine environmental quality & ecosystem health. Their sensitivity to environmental changes, limited mobility, long life span, & capacity to integrate ecological conditions over time make them particularly suitable for monitoring anthropogenic impacts & climate-related disturbances. The use of indicator species can facilitate habitat assessment, early detection of environmental degradation, ecological risk evaluation, & the development of conservation strategies. However, improving the reliability of biological assessments requires careful species selection, incorporation of local ecological knowledge, long-term monitoring programs, & the application of advanced analytical & biotechnological techniques. The development of comprehensive regional & global databases for macrobenthic indicator species, together with the refinement of ecological indices, will significantly enhance future marine monitoring efforts & support sustainable management of marine ecosystems in the face of increasing environmental challenges. Future research should focus on integrating molecular & traditional taxonomic approaches to improve species.



نقش گونه های شاخص ماکروبنیک به عنوان ابزارهای زیستی در ارزیابی سلامت اکوسیستم های دریایی

علی عباسی^{a*}، مهران لقمانی^a

^aگروه زیست شناسی دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، سیستان و بلوچستان، ایران.

*نویسنده مسئول: علی عباسی aliabbasi1376.2014@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۱۵

کلیدواژه ها:

اکوسیستم دریایی،

آلودگی دریایی،

پایش زیست محیطی،

تنوع زیستی،

گونه های شاخص ماکروبنیک.

اکوسیستم های دریایی روز به روز بیشتر تحت تأثیر فعالیت های انسانی و تغییرات اقلیمی قرار می گیرند و این موضوع نیاز به پایش دقیق تر را دوچندان کرده است. در این میان، گونه های شاخص ماکروبنیک به عنوان ابزارهایی حساس و قابل اعتماد برای ارزیابی شرایط زیست محیطی دریاها شناخته شده اند. این پژوهش با رویکرد مروری، مفهوم گونه های شاخص ماکروبنوتوز، گروه های اصلی آن ها شامل نرم تنان، سخت پوستان، کرم های حلقوی، خارپوستان و ماهی های کفزی را معرفی کرده و کاربردهای عملی آن ها را در پایش زیست محیطی بررسی می کند. ماکروبنوتوزها به دلایل متعددی شاخص های زیستی مناسبی به شمار می روند. تحرک پایین، طول عمر نسبتاً زیاد، حساسیت به تغییرات محیطی و توانایی انباشت آلاینده ها در بافت، از جمله ویژگی هایی است که آن ها را برای پایش بلندمدت مناسب می سازد. این موجودات می توانند در ارزیابی کیفیت زیستگاه، سنجش سلامت اکوسیستم و شناسایی تهدیدات بالقوه محیطی مفید واقع شوند. روش های کمی مانند آنالیز ارزش شاخص (IndVal)، شاخص AMBI و نسخه چند متغیره آن (M-AMBI) دقت ارزیابی های اکولوژیک را افزایش داده اند. بر اساس یافته ها، گروه های مختلف ماکروبنوتوز هر کدام کاربرد خاصی دارند. پرتاران مقاوم و فرصت طلب مانند *Capitella capitata* و *Heteromastus filiformis* با شرایط غنی سازی مواد آلی و آشفته گی رسوب مرتبط هستند و فراوانی فزاینده آنها می تواند به عنوان شاخصی از شرایط تنش زا مورد استفاده قرار گیرد. دوکفه ای های فیلترخوار به خاطر تجمع فلزات سنگین در بافت، برای پایش بلندمدت آلودگی فلزی مناسب اند. دوجورپایان به سمیت رسوبات حساس بوده و خارپوستان در مراحل لاروی پاسخ های واضحی به تنش های محیطی نشان می دهند. ماهیان کفزی نیز از طریق تجمع زیستی آلاینده ها در سطوح بالای زنجیره غذایی اطلاعات مفیدی ارائه می دهند. نکته قابل توجه در این مطالعه، نگاه چندبعدی به توانایی های زیست محیطی گونه های شاخص ماکروبنیک و اشاره به نقش روش های نوین بیوتکنولوژی در افزایش دقت شناسایی و پایش است. تهیه بانک اطلاعاتی جامع از این گونه ها می تواند پژوهش های آینده را تسهیل کرده و به مدیریت مؤثرتر اکوسیستم های دریایی کمک کند.

استناد به این مقاله: عباسی، علی و لقمانی، مهران. (۱۴۰۴). نقش گونه های شاخص ماکروبنیک به عنوان ابزارهای زیستی در ارزیابی سلامت اکوسیستم های دریایی.

راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، (۱)، ۵۹-۴۱. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252593>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252593>.

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

با توسعه سریع جوامع بشری و افزایش فشارهای ناشی از فعالیت‌های انسانی، تأثیرات منفی بر محیط‌زیست به‌ویژه در اکوسیستم‌های دریایی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. بر اساس مطالعات مختلف، تقریباً تمامی بوم‌سازگان‌های دریایی در حال حاضر تحت تأثیر مستقیم یا غیرمستقیم این فعالیت‌ها قرار دارند (Halpern et al., 2008). تقریباً نیمی از محیط دریایی با استرس‌های مختلفی مانند اسیدی شدن اقیانوس‌ها، آلودگی‌های مختلف، کم‌اکسیژنی دائمی یا فصلی، صید بی‌رویه و تخریب زیستگاه‌ها روبه‌رو است (Halpern et al., 2015). این فشارهای محیطی نه تنها به کاهش تنوع زیستی و اختلال در عملکرد اکوسیستم‌ها منجر شده، بلکه توانایی آن‌ها را برای مقابله با تغییرات اقلیمی نیز محدود کرده است. با افزایش نیاز به حفاظت از اکوسیستم‌های دریایی، پایش دقیق وضعیت محیطی آن‌ها اهمیت بیشتری یافته است. یکی از روش‌های مؤثر در این زمینه، استفاده از گونه‌های شاخص ماکروبنطیک است که به‌دلیل حساسیت بالا به تغییرات فیزیکی و شیمیایی، می‌توانند تغییرات اکوسیستمی و اثرات آلاینده‌ها را بهتر از روش‌های شیمیایی نمایان سازند (Gislason et al., 2017). برخلاف ارزیابی‌های شیمیایی که تنها به سنجش غلظت آلاینده‌ها محدودند و قادر به شبیه‌سازی اثرات بلندمدت و ترکیبی نیستند (Coutellec & Barata, 2013)، ارزیابی زیستی با بهره‌گیری از این گونه‌ها می‌تواند کیفیت زیستگاه و وضعیت کلی اکوسیستم را در طول زمان منعکس کند. همچنین، از طریق بررسی تجمع زیستی و روندهای انباشت آلودگی، امکان پیش‌بینی تهدیدات آینده نیز فراهم می‌شود (Geng et al., 2019).

در میان گروه‌های مختلف موجودات دریایی، درشت‌کفزیان^۱ به دلیل تنوع زیستی بالا، فراوانی و حساسیت به تغییرات محیطی از جمله شاخص‌های بارز برای ارزیابی اکولوژیکی به‌شمار می‌آیند (De Cáceres et al., 2010; Bendtsen & Hansen, 2013). ماکروبنطوزها، گروهی از جانوران آبری هستند که در تمام یا بخشی از چرخه زندگی خود در بستر دریا یا رسوبات زیست می‌کنند. بر اساس یک تعریف رایج، آن دسته از موجوداتی که از توری با چشمه ۰/۵ میلی‌متر عبور نمی‌کنند، به عنوان ماکروبنطوز شناخته می‌شوند. این گروه بخشی کلیدی از اکوسیستم‌های دریایی محسوب می‌شوند، زیرا از طریق فعالیت‌هایی مانند تغذیه، حفر تونل و ساخت لوله‌ها، ساختار فیزیکی رسوبات را دگرگون می‌کنند. تولید مواد مخاطی و تغییر در زبری یا نرمی بستر باعث دگرگونی در توپوگرافی موضعی، ساختار اولیه رسوبات و ویژگی‌های زیستی میکروارگانیسم‌های همراه می‌شود که در نهایت ترکیب مواد مغذی محیط دریایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین، جوامع ماکروبنطیک نقش مهمی در چرخه‌های ژئوشیمیایی عناصر کلیدی مانند کربن، نیتروژن و گوگرد ایفا می‌کنند. آن‌ها منبع اصلی تغذیه برای جانوران کفزی و حتی گونه‌های موجود در کل ستون آب هستند و از طریق فعالیت‌هایی مانند تغذیه و شکار، در ایجاد ساختار و عملکرد اکوسیستم دریایی مشارکت می‌کنند (Liu et al., 2007; Liu et al., 2009). برای نمونه، میانگین زی‌توده سالانه ماکروبنطوزها در دریای زرد شمالی به ۹۹/۶۶ گرم بر متر مربع می‌رسد که نشان‌دهنده میزان بالای تولید ثانویه و تنوع زیستی بالای آن‌ها است. در منطقه دریای زرد و دریای بوهای، تاکنون حداقل ۱۰ رده و ۸۰۰ گونه از ماکروبنطوزها شناسایی شده‌اند (Xu & Li, 2021).

این گونه‌ها به‌طور خاص در برابر تغییرات فیزیکی محیطی، مانند تغییرات در ترکیب بستر و شرایط اکسیژنی، واکنش‌های خاصی نشان می‌دهند که می‌تواند به‌طور مستقیم به تغییرات کیفیت محیط اشاره کند. بررسی پاسخ‌های آن‌ها در مراحل مختلف زندگی، از لاروهای پلانکتونی تا موجودات بالغ، می‌تواند به ما کمک کند تا تأثیرات سریع و بلندمدت تغییرات محیطی بر اکوسیستم‌های دریایی را شبیه‌سازی کنیم. به‌عنوان مثال، مرحله لاروی پلانکتونی که به‌شدت به شرایط هیدرودینامیکی و سطوح اکسیژن حساس است، می‌تواند اطلاعات مفیدی درباره پراکنش و استقرار موفقیت‌آمیز جمعیت‌ها و در نتیجه وضعیت عمومی اکوسیستم‌های دریایی فراهم کند (Bendtsen & Hansen, 2013). از سوی دیگر، مرحله بالغ این گونه‌ها نشان‌دهنده تغییرات بلندمدت در کیفیت زیستگاه‌ها و دسترسی به منابع محیطی است. به این معنا که تغییرات در توزیع و فراوانی درشت‌کفزیان می‌تواند نشانه‌هایی از تغییرات پایدار در کیفیت اکوسیستم‌ها باشد. این ویژگی‌ها موجب می‌شود که درشت‌کفزیان به‌عنوان ابزارهایی مهم برای پیش‌بینی و پایش وضعیت اکولوژیکی در دریاها مورد توجه قرار گیرند (Leonardsson et al., 2009).

^۱ Macrobenthos

واقع، توجه به این ویژگی‌ها و ارزیابی‌های زیستی مبتنی بر گونه‌های شاخص می‌تواند در مدیریت بهتر منابع دریایی و حفاظت از این اکوسیستم‌ها مؤثر واقع شود.

حیات‌وحش ماکروبنیتیک به دلیل ایفای نقش‌های کلیدی در عملکرد اکوسیستم‌های دریایی، از جمله چرخه مواد مغذی، تجزیه و متابولیسم آلاینده‌ها، تولید زیست‌توده ثانویه، و همچنین نقش آن‌ها به عنوان حلقه‌های مهم در زنجیره غذایی، از اهمیت بالایی برخوردار است (Wang et al., 2021). ساختار و تنوع این جوامع کفزی، به شدت تحت تأثیر عوامل محیطی مانند اندازه ذرات رسوب، میزان مواد آلی، عمق و شوری قرار دارد، که هر یک به طور مستقیم می‌توانند پویایی جمعیت آن‌ها را در مقیاس‌های فضایی مختلف تغییر دهند (Ellis et al., 2017; Khedhri et al., 2016). با این حال، یکی از متغیرهای مهمی که در بسیاری از مطالعات مورد غفلت قرار گرفته، فشارهای انسان‌زاد است؛ عواملی مانند آلودگی، ساخت‌وساز ساحلی و بهره‌برداری بی‌رویه، که می‌توانند به طور مستقیم ترکیب، عملکرد و حتی مقاومت جوامع ماکروبنیتیک را تغییر دهند. درک بهتر این تأثیرات انسان‌زاد، به‌ویژه در کنار متغیرهای طبیعی، می‌تواند تصویر دقیق‌تری از وضعیت واقعی اکوسیستم‌های کفزی ارائه داده و در طراحی راهبردهای مدیریتی مؤثرتر برای حفاظت از تنوع زیستی دریایی مفید باشد (Alsaffar et al., 2019).

ماکروبنیتوز مانند کرم‌های پرتار، نرم‌تنان و سخت‌پوستان، به دلیل سکونت در بستر دریا و حساسیت بالا به تغییرات محیطی، از دیرباز به عنوان شاخص‌های زیستی برای پایش وضعیت اکولوژیکی دریاها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بیشتر این جانداران دارای زندگی کم‌تحرک یا ساکن هستند و به سرعت به آلودگی‌ها یا آشفته‌گی‌های محیطی پاسخ می‌دهند. تغییرات در تعداد و فراوانی این گونه‌ها می‌تواند اطلاعات دقیقی درباره میزان تخریب یا فشار وارده بر اکوسیستم کف دریا ارائه دهد (Martin et al., 2019).

تاریخچه استفاده از گونه‌های شاخص در ارزیابی زیست‌محیطی به اوایل قرن بیستم بازمی‌گردد؛ زمانی که Kolkwitz و Marsson مفهوم استفاده از حضور و فراوانی گونه‌ها برای ارزیابی آلودگی را مطرح کردند. این رویکرد به تدریج از ارزیابی کیفی حضور یا عدم حضور گونه‌ها به سمت تحلیل کمی پاسخ جوامع زیستی در برابر فشارهای محیطی توسعه یافت. در محیط‌های دریایی نیز استفاده از ماکروبنیتوزها، به‌ویژه پرتاران، برای ارزیابی غنی‌شدگی آلی و کیفیت رسوبات گسترش پیدا کرد. با پیشرفت روش‌های آماری، رویکردهای طبقه‌بندی و تحلیل گونه‌های شاخص توسعه یافتند و در نهایت روش تحلیل ارزش شاخص (IndVal) توسط Legendre و Dufrène (۱۹۹۷) چارچوبی کمی برای شناسایی گونه‌های مرتبط با گروه‌ها یا شرایط محیطی مشخص فراهم کرد. امروزه، این رویکردها در کنار شاخص‌های چندمتغیره‌ای مانند AMBI و M-AMBI برای ارزیابی کیفیت اکولوژیک و پایش تغییرات محیطی در اکوسیستم‌های دریایی به کار می‌روند. بنابراین، روند تاریخی این حوزه نشان‌دهنده گذار از استفاده ساده از گونه‌ها به سمت روش‌های کمی و چندمتغیره است که امکان ارزیابی دقیق‌تر پاسخ جوامع ماکروبنیتیک به فشارهای محیطی را فراهم می‌کنند.

استفاده از گونه‌های شاخص در ارزیابی آلودگی‌های محیطی به اوایل قرن بیستم بازمی‌گردد؛ زمانی که Kolkwitz و Marsson با تهیه فهرست‌هایی از گونه‌های مرتبط با آلودگی آب، حضور یا عدم حضور گونه‌ها را به عنوان معیاری برای ارزیابی کیفیت محیط پیشنهاد کردند (Kolkwitz & Marsson, 1908, 1909). این رویکرد به تدریج به توسعه سامانه‌های زیستی ارزیابی کیفیت آب و شکل‌گیری مفهوم «گونه‌های شاخص» منجر شد (Keup et al., 1967). متعاقباً، استفاده از گونه‌های حساس به آلودگی آلی و همچنین گونه‌های مقاوم و فرصت‌طلب، از جمله پرتاران جنس Capitella در محیط‌های دریایی، گسترش یافته است. در همین حال، افزایش فراوانی گونه‌های مقاوم و فرصت‌طلب مانند Capitella بیشتر به عنوان نشانه‌ای از غنی‌سازی آلی و اختلال محیطی تفسیر می‌شود و نباید به عنوان شاخص مستقیم سلامت اکوسیستم در نظر گرفته شود (Reish, 1985). با توسعه روش‌های ارزیابی زیستی، تمرکز از شناسایی کیفی گونه‌های حساس به سمت بررسی کمی فراوانی و وقوع گونه‌ها و مقایسه جوامع بین مناطق شاهد و تحت تأثیر تغییر یافت (Mcarthur et al., 2010; Bustos-Baez & Frid, 2003). در این روند، روش TWINSpan در سال ۱۹۷۹ برای طبقه‌بندی جوامع زیستی توسعه یافت (Hill, 1979) و سپس روش تحلیل گونه‌های شاخص (ISA) و شاخص IndVal با ترکیب فراوانی و میزان وقوع گونه‌ها، چارچوبی کمی برای شناسایی گونه‌های شاخص فراهم کردند (Dufrene & Legendre, 1997). این تحول تاریخی نشان‌دهنده گذار از استفاده ساده از حضور

یا عدم حضور گونه‌ها به سوی روش‌های کمی و تحلیلی برای شناسایی گونه‌های شاخص و ارزیابی پاسخ جوامع زیستی به تغییرات محیطی است.

امروزه، گونه‌های شاخص در ارزیابی زیستگاه، پایش تغییرات محیطی و شناسایی زود هنگام اختلالات اکولوژیک کاربرد گسترده‌ای دارند و توجه علمی به این رویکرد نیز افزایش یافته است (Siddig et al., 2016; Gallo et al., 2014). با وجود این، محدودیت‌ها و مزایا و معایب کاربرد گونه‌های شاخص کمتر از جنبه‌های کاربردی آن بررسی شده است (Siddig et al., 2016). در میان گروه‌های زیستی، ماکروبنتوزها به دلیل تحرک محدود، وابستگی به زیستگاه و پاسخ مستقیم به تغییرات محیطی، ابزار مناسبی برای پایش اکولوژیک محسوب می‌شوند و استفاده از جوامع بنتیک در برنامه‌های پایش محیطی و ارزیابی سلامت اکوسیستم‌های ساحلی توسعه یافته است (ISO, 1979; Xu & Li, 2021).

علیرغم افزایش استفاده از ماکروبنتوزها و گونه‌های شاخص در ارزیابی وضعیت اکولوژیکی محیط‌های دریایی، مطالعات قبلی عمدتاً بر روی یک گروه طبقه‌بندی واحد، یک نوع فشار محیطی، یک منطقه جغرافیایی یا یک شاخص بیولوژیکی خاص متمرکز بوده‌اند. به عنوان مثال، برخی از مطالعات بر پاسخ ماکروبنتوزها به غنی‌سازی آلی و اوتریفیکاسیون، برخی بر تجمع فلزات سنگین در نرم‌تنان و برخی دیگر بر استفاده از شاخص‌هایی مانند AMBI و M-AMBI در ارزیابی کیفیت اکولوژیکی تمرکز کرده‌اند. اگرچه این مطالعات اطلاعات ارزشمندی ارائه داده‌اند، اما نتایج آنها به صورت پراکنده ارائه شده است و رابطه بین ویژگی‌های گونه‌های شاخص، نوع فشار محیطی، پاسخ جوامع ماکروبنتوز و قابلیت استفاده از شاخص‌های بیولوژیکی در یک چارچوب منسجم کمتر به خوبی خلاصه شده است. همچنین، تفاوت در پاسخ گونه‌های شاخص در مناطق جغرافیایی مختلف و تأثیر عوامل طبیعی مانند دما، عمق، نوع رسوب و ویژگی‌های هیدرودینامیکی بر عملکرد شاخص‌های بیولوژیکی، نشان دهنده نیاز به بررسی و مقایسه همزمان مطالعات انجام شده است. بنابراین، شکاف اصلی، فقدان یک خلاصه یکپارچه از کاربرد گونه‌ها و جوامع شاخص ماکروبنتوز، فشارهای محیطی مرتبط با آنها، شاخص‌های مورد استفاده، قابلیت‌ها و محدودیت‌های هر رویکرد و الزامات استفاده از این ابزارها در برنامه‌های پایش محیطی است.

بر این اساس، هدف این مطالعه بررسی و تحلیل مطالعات انجام شده در مورد استفاده از گونه‌ها و جوامع ماکروبنتوز به عنوان شاخص‌های زیستی در ارزیابی و پایش وضعیت اکولوژیکی اکوسیستم‌های دریایی و ساحلی است. در این راستا، گروه‌های اصلی ماکروبنتوز، شامل پرتاران، نرم‌تنان، سخت‌پوستان، خارپوستان و ماهیان کفزی، از نظر پاسخ آنها به فشارهای محیطی و کاربرد آنها در پایش محیطی بررسی می‌شوند. همچنین، مطالعات انجام شده در مورد استفاده از گونه‌های شاخص در شناسایی غنی‌سازی آلی، آلودگی فلزات سنگین، سمیت رسوبات، یوتریفیکاسیون، تغییرات در ساختار جوامع کفزی و سایر فشارهای انسانی بررسی و مقایسه می‌شوند. علاوه بر این، هدف از مطالعه حاضر، بررسی رویکردها و شاخص‌های مورد استفاده برای شناسایی و ارزیابی گونه‌های شاخص، از جمله AMBI، M-AMBI، و شناسایی مزایا، محدودیت‌ها و چالش‌های کاربرد آنها در پایش اکوسیستم‌های دریایی است. در نهایت، با جمع‌بندی یافته‌های مطالعات قبلی، تلاش شده است تا مهم‌ترین شکاف‌های تحقیقاتی و نیازهای موجود برای توسعه روش‌های دقیق‌تر، بومی‌سازی شاخص‌ها، ادغام داده‌های زیستی و محیطی و طراحی برنامه‌های پایش بلندمدت شناسایی شود. بر این اساس، این مقاله می‌تواند چارچوبی برای انتخاب و کاربرد مناسب گونه‌ها و جوامع ماکروبنتوز در ارزیابی سلامت اکوسیستم‌های دریایی ارائه دهد و جهت تحقیقات آینده را تعیین کند.

روش‌شناسی پژوهش

این مطالعه به صورت مروری انجام شده است و هدف آن بررسی و تحلیل مقالات و پژوهش‌های خارجی در زمینه کاربرد گونه‌های شاخص ماکروبنتیک در ارزیابی و پایش محیط‌های دریایی می‌باشد. برای این منظور، مقالات علمی منتشر شده در پایگاه‌های معتبر مانند Google Scholar، Scopus، Web of Science، ResearchGate بررسی شدند. معیارهای انتخاب مقالات شامل کیفیت علمی بالا، انتشار در مجلات معتبر با شاخص تأثیر بالا، و پوشش جامع در زمینه‌های بوم‌شناسی دریایی و ارزیابی سلامت اکوسیستم‌ها بود. فرایند جستجو از طریق استفاده از کلیدواژه‌های مرتبط مانند "indicator species"، "benthic community" و "macrobenthos"، "marine ecosystem monitoring"، "ecological indicators" و "benthic community" انجام شد.

structure" انجام گرفت. مقالاتی که بیشترین ارتباط با موضوع تحقیق داشته و در زمینه‌های ارزیابی اکولوژیکی و پایش تغییرات زیست‌محیطی براساس گونه‌های شاخص فعالیت کرده بودند، انتخاب شدند. پس از گردآوری مقالات مرتبط، اطلاعات استخراج شده و دسته‌بندی شدند تا روندهای اصلی و یافته‌های مشترک در این مطالعات شناسایی گردد. در نهایت، مقاله حاضر به منظور ایجاد یک بینش جامع و هماهنگ، نتایج بدست‌آمده از تحقیقات مختلف را تجزیه و تحلیل کرده و به بحث درباره چالش‌های موجود و فرصت‌های پیش‌رو در این حوزه پرداخته‌است. جست‌وجوی منابع، مطالعات منتشرشده از سال ۱۹۰۲ تا پایان سال ۲۰۲۵ را دربر گرفت و با هدف پوشش روند تاریخی شکل‌گیری مفهوم گونه‌های شاخص و همچنین جدیدترین پژوهش‌های مرتبط با کاربرد ماکروبنیتوزها در پایش زیست‌محیطی انجام شد. مطالعات انتخاب‌شده بر اساس گروه طبقه‌بندی، نوع فشار محیطی، پاسخ زیستی، منطقه جغرافیایی و شاخص یا روش مورد استفاده، بررسی و کدگذاری شدند. سپس، یافته‌ها با استفاده از رویکرد سنتز روایی و مقایسه کیفی-موضوعی، در محورهای اصلی کاربرد ماکروبنیتوزها در پایش و ارزیابی وضعیت اکولوژیکی، دسته‌بندی و تحلیل شدند. به دلیل ناهمگونی مطالعات، متاآنالیز آماری انجام نشد.

این مطالعه، یک مطالعه مروری با دامنه جغرافیایی بین‌المللی است و به بررسی و تحلیل مطالعات منتشر شده از مناطق مختلف دریایی و ساحلی جهان، بدون محدود شدن به یک منطقه جغرافیایی خاص، می‌پردازد. هدف از این رویکرد، مقایسه واکنش گونه‌ها و جوامع ماکروبنیتیک در شرایط محیطی و جغرافیایی مختلف و شناسایی الگوهای قابل تعمیم در کاربرد آنها به عنوان شاخص‌های زیستی است. در این میان، مطالعات انجام شده در مناطق مختلف از جمله دریای زرد، دریای بوهایی، دریای سیاه، سواحل اروپا و سایر مناطق ساحلی به عنوان مطالعات موردی در این بررسی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به اهمیت دریای عمان و خلیج فارس برای پایش محیط زیست در ایران، یافته‌های این مطالعات نیز در بخش پیشنهادات و مسیرهای تحقیقاتی آینده از منظر قابلیت بومی‌سازی و کاربرد منطقه‌ای مورد توجه قرار گرفته است.

یافته‌ها و بحث

بر اساس خلاصه مطالعات بررسی شده، انتخاب یک گونه یا جامعه شاخص ماکروبنیتوزی می‌تواند در قالب یک چارچوب چند معیاره در نظر گرفته شود. در این چارچوب، ابتدا باید رابطه گونه یا جامعه با فشار محیطی مورد نظر تعیین شود؛ سپس حساسیت یا تحمل آن به فشار، میزان پایداری پاسخ، فراوانی و قابلیت تشخیص آن و همچنین وابستگی پاسخ به شرایط طبیعی منطقه مانند نوع رسوب، عمق، دما، شوری و اکسیژن ارزیابی می‌شود. در مرحله بعد، توانایی استفاده از گونه یا جامعه مورد نظر برای تمایز شرایط مرجع از مناطق تحت تأثیر و سازگاری آن با شاخص‌های کمی مانند AMBI, IndVal و M-AMBI بررسی می‌شود. بنابراین، انتخاب یک گونه شاخص نباید صرفاً بر اساس فراوانی یا حضور یک گونه باشد، بلکه باید بر اساس ترکیبی از ویژگی‌های زیستی، پاسخ اکولوژیکی، شرایط محیطی و قابلیت کاربرد آن در برنامه پایش باشد.

روش‌های مبتنی بر گونه‌های شاخص می‌توانند ابزارهای مؤثری برای ارزیابی وضعیت اکولوژیکی اکوسیستم‌های دریایی باشند و امکان تجزیه و تحلیل رابطه بین گونه‌ها و شرایط محیطی را فراهم کنند. یکی از روش‌های مهم در این زمینه، روش IndVal است که برای شناسایی گونه‌هایی که رابطه خاصی با زیستگاه‌ها، شرایط محیطی یا گروه‌های مورد مطالعه دارند، استفاده می‌شود. این روش با ترکیب فراوانی نسبی و حضور گونه‌ها، میزان ارتباط یک گونه با یک شرایط یا گروه محیطی خاص را تعیین می‌کند (Dufrene & Legendre, 1997). بنابراین، شناسایی یک گونه توسط IndVal لزوماً به معنای آن نیست که آن یک "شاخص سلامت اکوسیستم" است، بلکه به این معنی است که حضور یا فراوانی آن با یک شرایط یا وضعیت محیطی خاص مرتبط است. به عنوان مثال، برخی مطالعات نشان داده‌اند که *Heteromastus filiformis* و *Capitella capitata* با محیط‌های غنی از مواد آلی و رسوبات تحت تنش مرتبط هستند. با توجه به تحمل آنها در برابر شرایط نامساعد و توانایی سازگاری با محیط‌های غنی از مواد آلی، این گونه‌ها اغلب به عنوان گونه‌های مقاوم یا فرصت‌طلب و نشانه‌ای از استرس یا اختلال محیطی تعبیر می‌شوند و نباید به عنوان شاخص مستقیم سلامت اکوسیستم در نظر گرفته شوند (Zhang et al., 2012). بنابراین، استفاده از IndVal باید با توجه به جهت و ماهیت پاسخ گونه و همراه با سایر اطلاعات بیولوژیکی و محیطی انجام شود تا از تفسیر نادرست یک گونه مقاوم یا فرصت‌طلب به عنوان شاخص سلامت اکوسیستم جلوگیری شود (Antonelli et al., 2016).

نتایج بررسی حاضر نشان می‌دهد که گروه‌های مختلف ماکروبن‌توز، از جمله پرتاران، خارپوستان، نرم‌تنان، سخت‌پوستان و ماهیان کفزی، به‌طور مؤثری به عنوان گونه‌های شاخص در پایش زیست‌محیطی دریاها مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از پرتاران، به ویژه گونه‌های مقاوم و فرصت‌طلب مانند *Capitella capitata* و *Heteromastus filiformis*، با شرایط نامساعد و غنی‌سازی آلی رسوبات مرتبط هستند و افزایش فراوانی آنها می‌تواند نشان‌دهنده افزایش استرس یا آشفته‌گی محیطی باشد. بنابراین، این گونه‌ها نباید به عنوان شاخص‌های مستقیم سلامت اکوسیستم در نظر گرفته شوند، بلکه حضور یا افزایش فراوانی آنها به عنوان نشانه‌ای از شرایط استرس‌زا، آشفته‌گی یا آلودگی آلی تفسیر می‌شود (Dean, 2015; Ito et al., 2016; Nasi et al., 2021; Sobczyk et al., 2021). خارپوستان^۱ به‌ویژه در مراحل لاروی نسبت به تغییرات کیفی محیط زیست دریایی و آلاینده‌های مختلف بسیار حساس هستند. در مقابل، بسیاری از خارپوستان، و به ویژه مراحل لاروی آنها، به برخی از آلاینده‌ها و تغییرات محیطی حساس هستند؛ بنابراین، کاهش بقا، فراوانی یا موفقیت رشد آنها می‌تواند در برخی شرایط به عنوان نشانه‌ای از افزایش فشار محیطی یا کاهش کیفیت زیستگاه تفسیر شود (Rakaj et al., 2021). همچنین، مرجان‌سانان^۲ مانند شقایق‌های دریایی نیز به دلیل پاسخ‌دهی به آلاینده‌هایی نظیر هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) و فلزات سنگین، در پایش آلودگی و تغییرات کیفیت زیست‌محیطی اهمیت دارند (Gadelha et al., 2013). نرم‌تنان^۳، به‌ویژه دوکفه‌ای‌ها مانند صدف‌های سیاه و صدف‌های خوراکی، با توانایی تغذیه فیلتری و انباشت تدریجی آلاینده‌ها در بافت، ابزار مناسبی برای پایش بلندمدت آلودگی فلزات سنگین در محیط‌های دریایی محسوب می‌شوند. تغییرات در ساختار و تنوع جامعه این گروه اغلب به عنوان شاخصی از تخریب کیفیت آب و رسوبات در نظر گرفته می‌شود (Gérard & Lance, 2019; Liu et al., 2023). در میان سخت‌پوستان^۴، دوجورپایان^۵ به دلیل زیست کفزی، چرخه زندگی کوتاه و حساسیت بالا به آلاینده‌ها، شاخص‌های مفیدی برای ارزیابی سمیت رسوبات و آلودگی آلی شناخته شده‌اند. با این حال، اثربخشی آنها اغلب محدود به مناطقی است که اطلاعات کافی از تاکسونومی و بوم‌شناسی آنها در دسترس است (Podlesińska & Dąbrowska, 2019). ماهیان کفزی^۶ به دلیل قرارگیری در سطوح بالاتر زنجیره غذایی و توانایی تجمع زیستی آلاینده‌ها به‌ویژه فلزات سنگین، همچون روی در بافت‌هایی مانند کبد، برای پایش آلودگی زیست‌محیطی مفید هستند (de la Vega et al., 2023).

در کنار تحلیل گروه‌های زیستی، بررسی واژگان و مفاهیم به کار رفته برای گونه‌های شاخص نشان داد که اصطلاحاتی چون «نشانگر زیستی» و «پایشگر زیستی» گرچه به‌طور گسترده و گاه به‌جای یکدیگر به کار می‌روند، اما ممکن است تفاوت‌های مفهومی وابسته به بستر پژوهشی داشته باشند (Burger, 2006). این ابهام در کاربرد، بر اهمیت تعریف دقیق و هماهنگ این مفاهیم در مطالعات بعدی می‌افزاید.

گونه‌های شاخص ماکروبن‌تیک به‌دلیل ویژگی‌هایی چون تحرک محدود، طول عمر بالا، حساسیت محیطی و توانایی در تجمع زیستی آلاینده‌ها، ابزارهایی مؤثر برای پایش بلندمدت اکوسیستم‌های دریایی هستند. این گونه‌ها می‌توانند هم تغییرات ناگهانی و هم روندهای تدریجی تخریب زیستگاه را نمایان کنند. با این حال، چالش‌هایی مانند نبود معیارهای علمی برای انتخاب گونه‌ها، پیچیدگی‌های زیستی درون جامعه ماکروبن‌تیک، و دشواری تمایز میان تغییرات انسانی و طبیعی، ممکن است تحلیل‌ها را با خطا مواجه کند. برای افزایش دقت، استفاده از داده‌های محلی، فهرست‌های به‌روز و رویکردهای چندرشته‌ای ضروری است. در صورت طراحی صحیح، بهره‌گیری از این گونه‌ها می‌تواند چارچوبی علمی و کاربردی برای ارزیابی سلامت اکوسیستم‌های دریایی و مدیریت آنها در برابر تهدیدات محیطی و تغییرات اقلیمی فراهم آورد (Carvalho et al., 2017; Bouchet et al., 2018).

حفاظت از زیستگاه‌های طبیعی برای حفظ عملکرد و پایداری اکوسیستم‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. موفقیت برنامه‌های حفاظتی به‌شدت وابسته به شناسایی و حفاظت از زیستگاه‌هایی است که به‌عنوان مخازن تنوع زیستی عمل کرده و برای عملکرد اکوسیستم‌ها ضروری هستند. در این راستا، پس از شناسایی زیستگاه‌ها، می‌توان آنها را به‌منظور توسعه برنامه‌های پایش استفاده

¹ Echinoderms

² Cnidarians

³ Mollusks

⁴ Crustaceans

⁵ Amphipods

⁶ Demersal fish

کرد. یکی از چالش‌های عمده در تعریف زیستگاه‌ها، به‌ویژه در زیستگاه‌های نرم‌بستر دریایی، به دلیل تغییرات مستمر و دینامیک این محیط‌هاست. این چالش‌ها اغلب به ویژگی‌های رسوبی و محیط‌های بیولوژیکی مرتبط هستند و استفاده صرف از شاخص‌های غیرزیستی ممکن است به نتایج نادرستی منجر شود (Mcarthur et al., 2010). بنابراین، در این گونه زیستگاه‌ها، تعاملات پیچیده گونه‌ها و محیط باید در نظر گرفته شود تا بتوان زیستگاه‌ها را به‌طور دقیق تعریف کرد (Fonseca & Gallucci, 2016). در این راستا، استفاده از گونه‌های شاخص می‌تواند به تسهیل برنامه‌های پایش کمک کند. از آنجایی که گونه‌های شاخص قادرند وضعیت زیستگاه‌ها را با دقت بیشتری نمایان کنند، شناسایی این گونه‌ها و تعیین روابط آن‌ها با ویژگی‌های زیست‌محیطی برای حفظ و مدیریت این اکوسیستم‌ها حائز اهمیت است. به‌منظور پایش و حفاظت مؤثر از زیستگاه‌های نرم‌بستر دریایی، چارچوبی ترکیبی از روش‌های آماری و رویکرد گونه‌های شاخص پیشنهاد شده است (Checon et al., 2018).

گونه‌های شاخص ماکروبنیتیک به دلیل حساسیت بالا به آلودگی، ابزار مؤثری در پایش محیط‌های دریایی هستند و می‌توانند تغییرات زیست‌محیطی را از طریق حضور یا غیاب خود نشان دهند. با این حال، انتخاب ناآگاهانه و بدون داده‌های بلندمدت از این گونه‌ها ممکن است به نتایج نادرست و تفسیرهای اشتباه منجر شود. واکنش گونه‌ها به آلودگی در مناطق مختلف می‌تواند متغیر باشد و تنها برخی گونه‌ها، مانند *Abra alba* و *Amphiura filiformis*، پیوستگی مشخصی با آلودگی دارند (Bustos-Baez & Frid, 2003). بنابراین، استفاده دقیق و مبتنی بر داده‌های محلی و به‌روز از گونه‌های شاخص برای دستیابی به ارزیابی‌های قابل‌اعتماد ضروری است. گونه‌های شاخص ماکروبنیتیک، مانند *Bellamya purificata* و *Radix auricularia*، به دلیل واکنش سریع و حساس به تغییرات زیست‌محیطی از جمله آلودگی و نوسانات دمایی، نقش کلیدی در پایش سلامت اکوسیستم‌های دریایی ایفا می‌کنند. مطالعات نشان داده‌اند که فاکتورهایی مانند عمق آب، میزان رطوبت رسوبات و حضور گیاهان آبی بر رشد و پراکنش این گونه‌ها تأثیر می‌گذارند. به‌ویژه، گیاهان غوطه‌ور می‌توانند با فراهم‌سازی زیستگاه مناسب، به بهبود شرایط زیستی و افزایش تراکم گونه‌هایی نظیر *Radix auricularia* کمک کنند، در حالی که کاهش کیفیت ورودی آب می‌تواند باعث افت جمعیت گونه‌هایی مانند *Bellamya purificata* شود. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که احیای زیستگاه‌های آبی، به‌ویژه از طریق بازسازی پوشش گیاهی، نه تنها موجب ارتقاء تنوع زیستی می‌شود، بلکه ابزار مؤثری برای مدیریت و بهبود کیفیت اکولوژیکی دریاچه‌ها و رودخانه‌ها به شمار می‌آید (Yang et al., 2024).

در اکوسیستم‌های گرمسیری که با تنوع زیستی بالا و تهدیدات زیست‌محیطی گسترده روبه‌رو هستند، ماکروبنیتوزها به‌ویژه به عنوان شاخص‌های زیستی حساس برای پایش وضعیت اکوسیستم‌های آبی و دریایی اهمیت دارند. در این مناطق، گروه‌هایی مانند *Polychaeta*، *Gastropoda* و *Bivalvia* غالب‌اند و ترکیب و ساختار آن‌ها به شدت تحت تأثیر عواملی نظیر بافت رسوب، میزان شوری، و الگوهای جزر و مد قرار دارد. در نواحی بین‌مدی، زوناسیون گونه‌ای بر اساس ارتفاع جزر و مد مشخص می‌شود و تنوع گونه‌ای در مناطق پایین‌تر بیشتر است. بررسی‌ها نشان داده‌اند که فعالیت‌های انسانی و آلودگی‌های ناشی از شهرنشینی منجر به کاهش غنای زیستی و تغییر ترکیب جوامع زیستی شده‌اند. همچنین، در دوره‌های غیرموسمی تنوع و عملکرد ماکروبنیتیک بهبود می‌یابد. برخی خانواده‌ها مانند *Spionidae* و *Cossuridae* که توان تحمل شرایط هیپوکسی را دارند، در مناطق دچار کم‌اکسیژنی فراوانی بیشتری دارند و می‌توانند به عنوان نشانه‌هایی از اختلالات اکولوژیکی در این نواحی عمل کنند (Sukumaran et al., 2021).

توسعه استفاده از گونه‌های شاخص در ارزیابی وضعیت زیست‌محیطی، روندی را نشان می‌دهد که از مشاهده ساده حضور یا عدم حضور گونه‌ها در مکان‌های نمونه‌برداری به ابزارهای پیچیده‌تری مانند تحلیل‌های چند متغیره و شاخص‌های کمی گسترش یافته است. همانطور که در مطالعات مختلف اشاره شده است، گونه‌ها و جوامع ماکروبنیتوز می‌توانند به عنوان ابزارهای مفیدی برای ردیابی تغییرات زیست‌محیطی و اثرات آلودگی عمل کنند و پاسخ‌های آن‌ها در مراحل مختلف چرخه زندگی، از مراحل لاروی تا بزرگسالی، می‌تواند اطلاعات متفاوتی در مورد شرایط محیطی کوتاه‌مدت و بلندمدت ارائه دهد. این فرآیند، به‌ویژه با استفاده از مدل‌های تحلیلی پیشرفته، بهبود یافته است و می‌تواند نقش مهمی در ارزیابی دقیق‌تر وضعیت اکولوژیکی داشته باشد. به‌طور خاص، استفاده از شاخص‌هایی مانند *IndVal*، با ترکیب اطلاعات مربوط به فراوانی و پراکندگی گونه‌ها، به شناسایی گونه‌های مرتبط با شرایط یا گروه‌های خاص محیطی کمک می‌کند (Han & Han, 2024).

توزیع فضایی ماکروبتوزها به شدت تحت تأثیر عواملی مانند عمق آب و ترکیب رسوبات است (Levin & Gage, 1998). مطالعات نشان می‌دهند که فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه در نزدیکی سواحل، بندار و مزارع پرورش آبزیان، منجر به تغییرات چشمگیر در ساختار و پراکنش جوامع ماکروبتوزی می‌شود. معمولاً تعداد گونه‌ها و فراوانی ماکروبتوزها در مناطق ساحلی کاهش و در نواحی دور از ساحل افزایش می‌یابد، که این روند منعکس‌کننده شدت فشارهای انسانی است. به‌ویژه، پرورش آبزیان با ایجاد اختلال در تبادل آب و افزایش آلودگی‌های آلی، می‌تواند کیفیت رسوبات و ساختار بستر دریا را تحت تأثیر قرار دهد. این تغییرات زیستی نشان‌دهنده تأثیر جدی این فعالیت‌ها بر سلامت اکوسیستم‌های دریایی است. بنابراین، لزوم پایش و مدیریت دقیق‌تر این نواحی برای جلوگیری از تخریب زیستگاه‌ها و حفظ تنوع زیستی ضروری است (Zhang et al., 2013; Liu et al., 2021).

در زمینه بررسی نقش گونه‌های شاخص ماکروبتیک در پایش زیست‌محیطی، در میان مطالعات بررسی‌شده، تحقیقات انجام‌شده در دریای بوهای و بخش شمالی دریای زرد نیز نمونه‌ای از کاربرد شاخص M-AMBI در ارزیابی وضعیت اکولوژیکی جوامع ماکروبتوزی است. در این مطالعات، تغییرات در ترکیب گونه‌ای، فراوانی و زیست‌توده جوامع ماکروبتوزی در رابطه با عواملی مانند عمق، دما، نوع بستر و اکسیژن محلول بررسی شده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ادغام داده‌های زیستی و محیطی می‌تواند در ارزیابی کیفیت اکولوژیکی مناطق ساحلی مؤثر باشد.

در بحث استفاده از گونه‌های شاخص ماکروبتیک در پایش زیست‌محیطی دریاهای، مطالعه‌های مختلف نشان می‌دهند که این گونه‌ها به دلیل دقت بالا و هزینه پایین در پایش تغییرات اکولوژیکی، ابزارهای مؤثری هستند. اما انتخاب گونه‌های شاخص مناسب و برقراری روابط واضح میان آن‌ها و کاربردهای خاص همچنان یک چالش بزرگ محسوب می‌شود (Siddig et al., 2016). در این راستا، اهمیت انتخاب گروه‌های شاخص که به‌طور مؤثری نمایانگر وضعیت زیست‌محیطی باشند و همچنین درک روابط علت و معلولی میان این گونه‌ها و فرآیندهای بوم‌شناختی، برای افزایش دقت ارزیابی‌ها ضروری است. شاخص IndVal، که در این زمینه به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته، می‌تواند در تعیین این روابط نقش مهمی ایفا کند (Dufrêne & Legendre, 1997). با این حال، کاربرد مؤثر گونه‌های شاخص نیازمند اتخاذ رویکردهای دقیق‌تری است که در آن‌ها معیارهای انتخاب گونه‌ها، حذف سوگیری‌ها در فرآیند انتخاب و استفاده از تحلیل‌های آماری پیشرفته لحاظ شود. همچنین، تدوین استراتژی‌های جامع پایش زیست‌محیطی دریایی با در نظر گرفتن تنوع طبیعی جمعیت‌ها و استفاده از قضاوت متخصصان برای کالیبراسیون شاخص‌ها در مناطق مختلف می‌تواند به بهبود دقت ارزیابی‌ها کمک کند (L&res et al., 1988; De Cáceres et al., 2010). به‌طور کلی، همان‌طور که مطالعه‌ها نشان می‌دهند، استفاده از گونه‌های شاخص در پایش زیست‌محیطی دریایی روندی رو به رشد دارد و همچنان نیاز به تحقیقات بیشتر و مرورهای سیستماتیک دارد تا نقش این گونه‌ها در پایش و ارزیابی سلامت اکوسیستم‌های دریایی تقویت شود.

کاهش بیوماس و تغییر در گونه‌های غالب جوامع ماکروبتوزی، نشان‌دهنده تأثیر مستقیم فعالیت‌های انسانی و تغییرات محیطی است و می‌تواند به‌عنوان شاخصی مؤثر در ارزیابی سلامت اکوسیستم‌های دریایی به کار رود. این تغییرات اغلب ناشی از افزایش محتوای آلی و تولید اولیه در اثر فعالیت‌هایی مانند کشاورزی دریایی و آلودگی‌های ساحلی، به‌ویژه در نواحی ساحلی دریای بوهای، رخ می‌دهد. پایش ساختار این جوامع، ابزاری کارآمد برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی محسوب می‌شود. استفاده از گونه‌های شاخص ماکروبتیک نه تنها ارزیابی زیستی را ساده‌تر می‌کند، بلکه درک دقیق‌تری از روندهای محیطی و پیش‌بینی تغییرات آینده اکوسیستم‌های دریایی ارائه می‌دهد. برای مدیریت مؤثر و حفظ تنوع زیستی، بررسی مستمر این گونه‌ها ضروری است (Liu et al., 2014; Chen et al., 2016).

فعالیت‌های انسانی در نواحی ساحلی، به‌ویژه ورود مواد مغذی از طریق رواناب رودخانه‌ای، منجر به برهم خوردن تعادل نسبت نیتروژن به فسفر (N/P) و بروز پدیده یوتروفیکاسیون در آب‌های ساحلی شده است. این آلودگی عمدتاً ناشی از ورود فاضلاب خانگی و صنعتی است. چنین شرایطی منجر به کاهش تنوع گونه‌ای در جوامع بنتوزی می‌شود، به‌ویژه در نواحی دهانه رودخانه‌ها که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم این ورودی‌ها بر ساختار و عملکرد اکولوژیکی ماکروبتوزهاست. در این شرایط، استفاده از گونه‌های شاخص ماکروبتیک می‌تواند به شناسایی و ارزیابی دقیق‌تر اثرات آلودگی و یوتروفیکاسیون کمک کند. تغییر در تنوع و ترکیب گونه‌ای در چنین نواحی آلوده، می‌تواند به‌عنوان یک هشدار زود هنگام برای تغییرات اکولوژیکی محسوب شود. این موضوع اهمیت

انتخاب درست گونه‌های شاخص و تعیین حساسیت آن‌ها به تغییرات کیفیت آب و رسوب را دوچندان می‌کند (Sters, 1958). از سوی دیگر، ساختار جامعه ماکروبنطوزها ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های فیزیکی رسوبات دارد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که ترکیب دانه‌بندی رسوبات (مانند نسبت ماسه، سیلت و رس) یکی از عوامل اصلی تعیین‌کننده در توزیع و فراوانی ماکروبنطوزهاست. یافته‌های تأیید می‌کند که، همبستگی مثبت معناداری بین میزان ماسه و فراوانی ماکروبنطوزها وجود دارد، در حالی که با افزایش سیلت و رس، فراوانی کاهش می‌یابد (Li et al., 2020). این نتایج بیانگر آن است که گونه‌های شاخص می‌توانند به‌طور خاص برای ارزیابی ویژگی‌های رسوبی نیز مورد استفاده قرار گیرند، چرا که برخی از آن‌ها نسبت به نوع بستر حساسیت مشخصی دارند. شاخص‌های AMBI و M-AMBI ابزارهای مهمی برای ارزیابی وضعیت اکولوژیکی جوامع ماکروبنطوزی در محیط‌های دریایی و ساحلی هستند. در شاخص AMBI، گونه‌های ماکروبنطوزی بر اساس حساسیت یا تحمل آنها به افزایش غنی‌سازی آلی و فشار محیطی به پنج گروه اکولوژیکی (EG I تا EG V) طبقه‌بندی می‌شوند. گروه‌های EG I و EG II عمدتاً شامل گونه‌های حساس‌تر یا کم‌تحمل‌تر، EG III شامل گونه‌های نسبتاً مقاوم به غنی‌سازی آلی و EG IV و EG V شامل گونه‌های فرصت‌طلب با تحمل بالاتر هستند. نسبت فراوانی نسبی این گروه‌ها در جامعه ماکروبنطوزی برای محاسبه مقدار AMBI و ارزیابی وضعیت اکولوژیکی جامعه استفاده می‌شود (Borja et al., 2000). در جدول ۱ طبقه‌بندی اکولوژیک گروه‌های زیستی ماکروبنطیک در شاخص AMBI ارائه شده است.

جدول ۱. طبقه‌بندی اکولوژیک گروه‌های زیستی ماکروبنطیک در شاخص AMBI
Table 1. Ecological classification of macrobenthic biological groups in the AMBI index

گروه اکولوژیک	ویژگی گونه‌ها	پاسخ به افزایش غنی‌شدگی آلی
EG I	گونه‌های بسیار حساس به غنی‌شدگی آلی و معمولاً مرتبط با شرایط بدون اختلال	با افزایش فشار محیطی کاهش یافته یا حذف می‌شوند
EG II	گونه‌های نسبتاً بی‌تفاوت به غنی‌شدگی، معمولاً با فراوانی پایین و تغییرات محدود	در شرایط کم‌اختلال حضور دارند و تغییرات آن‌ها محدود است
EG III	گونه‌های مقاوم به افزایش مواد آلی	ممکن است در شرایط عادی حضور داشته باشند، اما با غنی‌شدگی آلی افزایش یابند
EG IV	گونه‌های فرصت‌طلب درجه دوم، عمدتاً برخی پرتاران کوچک‌جثه	در شرایط دارای اختلال متوسط تا شدید افزایش می‌یابند
EG V	گونه‌های فرصت‌طلب درجه اول و بسیار مقاوم	در شرایط شدیداً مختل و رسوبات احیایی می‌توانند غالب شوند

اما برای استفاده دقیق و مؤثر از این شاخص‌ها در شناسایی گونه‌های شاخص ماکروبنطیک، باید به دو عامل کلیدی توجه داشت: نخست، روش نمونه‌برداری تأثیر مستقیمی بر دقت این شاخص‌ها دارد. از آنجا که ماکروبنطوزها تحرک کمی دارند و نسبت به آلودگی‌های رسوبی حساس هستند، استفاده از تله‌های رسوبی برای نمونه‌برداری می‌تواند داده‌های دقیق‌تری فراهم آورد. در مقابل، روش‌هایی مانند تور ترال کفروب (مانند نمونه‌برداری Agassiz) ممکن است باعث کاهش دقت و بروز سوگیری در نتایج شود (Li et al., 2017). دوم، دقت شاخص AMBI وابسته به طبقه‌بندی دقیق گونه‌ها است. اگرچه فهرست گونه‌های AMBI تا سال ۲۰۲۰ به‌روزرسانی شده، اما این فهرست عمدتاً برای مناطق اروپایی تدوین شده است و بسیاری از گونه‌های موجود در سایر مناطق جهان هنوز طبقه‌بندی نشده‌اند یا در مناطق مختلف به شکل متفاوتی رده‌بندی می‌شوند (. این موضوع ضرورت توسعه فهرست جهانی گونه‌ها با همکاری متخصصان را نشان می‌دهد. برخی گروه‌های دیگر مانند آمفی‌پودها (به‌ویژه زیرراسته Gammaridea) نقش کلیدی در اکوسیستم دارند و با تسهیل فرآیندهای اکسایش و نیتریفیکاسیون، به‌عنوان نشانگرهای زیستی برای فرآیندهای بازسازی محیطی شناخته می‌شوند (Gómez-Gesteira & Dauvin, 2000). این نتایج نشان می‌دهد که نسبت فراوانی بین گونه‌های فرصت‌طلب و گونه‌های کلیدی، به‌ویژه در بین ماکروبنطوزها، می‌تواند به‌عنوان شاخص اکولوژیکی دقیق و مؤثر برای سنجش وضعیت آلودگی و بازسازی زیستی در مناطق دریایی مورد استفاده قرار گیرد. لذا انتخاب و کاربرد

هدفمند گونه‌های شاخص، با تکیه بر شاخص‌های AMBI و M-AMBI، یک ابزار راهبردی در بوم‌شناسی دریایی محسوب می‌شود.

جدول ۱. خلاصه مطالعات پژوهشی درباره کاربرد گونه‌ها و اجتماعات ماکروبنطیک به عنوان شاخص‌های زیستی در

ارزیابی و پایش زیست‌محیطی اکوسیستم‌های دریایی و ساحلی

Table 1. Summary of research studies on the use of macrobenthic species & communities as biological indicators in environmental assessment & monitoring of marine & coastal ecosystems.

مطالعه	عامل یا فشار محیطی	یافته اصلی، منطقه مورد مطالعه و کاربرد در پایش زیست‌محیطی
Amaral et al., (1998)	غنی‌شدگی آلی و آلودگی	در سواحل شمالی ساووپاولو، برزیل، <i>H. filiformis</i> و <i>C. capitata</i> در مناطق دارای شرایط نامناسب و غنی‌شدگی آلی فراوانی بیشتری داشتند. این یافته نشان می‌دهد که پرتاران فرصت‌طلب می‌توانند برای شناسایی غنی‌شدگی آلی و اختلال در رسوبات ساحلی به عنوان شاخص زیستی مورد استفاده قرار گیرند.
Castro et al. (2006)	سمیت و آلودگی رسوبات	در خور Ria de Aveiro، پرتغال، رشد و باروری <i>C. multisetosum</i> نسبت به بقا حساسیت بیشتری به شرایط نامطلوب رسوبات نشان داد. این پاسخ حساسیت، کاربرد دوجورپایان را در زیست‌سنجی سمیت و پایش کیفیت رسوبات نشان می‌دهد.
Yap et al. (2003)	Zn و Pb, Cd	در سواحل غربی مالزی، تجمع فلزات در بافت‌ها و رشته‌های بیسوس صدف بررسی شد و رشته‌های بیسوس به‌ویژه برای Zn قابلیت مناسبی برای زیست‌پایش نشان داد. بنابراین <i>P. viridis</i> و بافت‌های آن می‌توانند برای شناسایی آلودگی فلزات سنگین در محیط ساحلی استفاده شوند.
Wong et al. (2005)	فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی	در پایش شش‌ساله آب‌های ساحلی هنگ‌کنگ، الگوهای مکانی متفاوت آلاینده‌ها در بافت صدف مشاهده شد و برخی مناطق نزدیک منابع صنعتی غلظت بیشتری داشتند. این نتایج قابلیت <i>P. viridis</i> را برای پایش مکانی و زمانی آلودگی‌های ساحلی نشان می‌دهد.
Maanan (2007)	فلزات سنگین	در ساحل Safi مراکش، غلظت بالاتر برخی فلزات در ایستگاه‌های تحت تأثیر منابع صنعتی و شهری مشاهده شد. نتایج، کاربرد <i>M. galloprovincialis</i> را به عنوان زیست‌پایشگر آلودگی فلزات سنگین در مناطق ساحلی تأیید کرد.
Szefer et al. (2005)	فلزات سنگین	در سواحل دریای سیاه رومانی، غلظت فلزات در بافت‌های مختلف صدف بین مناطق متفاوت بود و تجمع فلزات در آبشش و توده احشایی قابل توجه بود. این نتایج استفاده از صدف را برای بررسی تجمع و پراکنش مکانی فلزات در محیط دریایی پشتیبانی می‌کند.
Fichet et al. (1998)	Pb, Cu, Cd و Zn	در مطالعه رسوبات بنادر، مواجهه لاروها با رسوبات آلوده موجب افزایش تجمع برخی فلزات و اختلال در رشد و تکوین شد. بنابراین مراحل لاروی بی‌مهرگان دریایی می‌توانند برای ارزیابی زیست‌دسترسی و سمیت آلاینده‌های رسوبی استفاده شوند.
Radenac et al. (2001)	Pb, Cu, Cd و Zn	در شرایط آزمایشگاهی، جنین و لارو <i>P. lividus</i> توانایی تجمع فلزات را نشان دادند و افزایش غلظت برخی فلزات با افزایش تجمع آن‌ها همراه بود. این حساسیت، کاربرد مراحل جنینی و لاروی خارپوستان را در پایش سمیت و زیست‌دسترسی فلزات نشان می‌دهد.
Li et al. (2017)	فلزات سنگین و عوامل محیطی	در دلتای رود زرد چین، ارزیابی M-AMBI وضعیت نامطلوب اکولوژیک را نشان داد و فلزات سنگین، دما و عمق از عوامل مهم مرتبط با ساختار جامعه بودند. بنابراین اجتماعات ماکروبنطیک و M-AMBI می‌توانند برای ارزیابی سلامت اکولوژیک مناطق ساحلی تحت فشار انسانی استفاده شوند.
Yan et al. (2020)	یوتریفیکاسیون و فشارهای محیطی	در مجاورت مصب رود یانگ‌تسه چین، شاخص‌های AMBI، M-AMBI و BOPA وضعیت اکولوژیک را ارزیابی کردند و M-AMBI عملکرد مناسب‌تری در منطقه مطالعه داشت. این نتایج کاربرد شاخص‌های زیستی مبتنی بر ماکروبنطوز را در پایش یوتریفیکاسیون و فشارهای محیطی نشان می‌دهد.
Li et al. (2022)	کیفیت رسوب، اکسیژن محلول و فشارهای انسانی	در مناطق ساحلی شمال یانتای چین، ۱۵۳ گونه ثبت شد و ساختار جامعه با عمق، اکسیژن محلول و ویژگی‌های رسوب ارتباط داشت؛ مناطق نزدیک بنادر و آبی‌پروری کیفیت اکولوژیک پایین‌تری داشتند. این یافته‌ها استفاده از ساختار جامعه و M-AMBI را برای پایش کیفیت اکولوژیک آب‌های ساحلی پشتیبانی می‌کند.
Marujo Neves et al. (2025)	فلزات ردیابی، ماده آلی و فعالیت‌های انسانی	در یک سامانه خوری پرتغال، ارزیابی جامعه ماکروبنطیک با AMBI و M-AMBI در جاتی از اختلال اکولوژیک را نشان داد و نتایج به نحوه شناسایی گونه‌ها نیز وابسته بود. این یافته بر اهمیت شناسایی دقیق گونه‌ها و تلفیق داده‌های زیستی و شیمیایی در پایش کیفیت اکولوژیک تأکید می‌کند.

نتیجه‌گیری

مروری بر مطالعات نشان داد که گونه‌ها و جوامع ماکروبنیتیک می‌توانند ابزارهای مؤثری برای ارزیابی و پایش وضعیت اکولوژیکی اکوسیستم‌های دریایی باشند؛ با این حال، اثربخشی آنها به نوع استرس محیطی، ویژگی‌های بیولوژیکی گونه و شرایط اکولوژیکی منطقه بستگی دارد. تغییرات در ترکیب و فراوانی جوامع ماکروبنیتیک در رابطه با عواملی مانند یوتروفیکاسیون، تخریب زیستگاه، کیفیت رسوبات و تغییرات اکسیژن محلول می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد وضعیت محیط زیست ارائه دهد. بنابراین، انتخاب یک گونه یا جامعه شاخص نباید صرفاً بر اساس حضور یا فراوانی آن باشد، بلکه باید همزمان حساسیت و دامنه پاسخ گونه، ویژگی‌های زیستگاه، تنوع طبیعی و ارتباط آن با استرس مورد نظر را در نظر گرفت.

همچنین، مقایسه مطالعات مناطق مختلف نشان داد که تفاوت در دما، شوری، عمق، نوع رسوب و شدت فشارهای انسانی می‌تواند بر عملکرد شاخص‌ها تأثیر بگذارد؛ بنابراین، تعمیم نتایج بین مناطق مختلف بدون اعتبارسنجی و کالیبراسیون مناسب می‌تواند منجر به تفسیر نادرست شود. در این زمینه، استفاده از شاخص‌هایی مانند AMBI، M-AMBI و IndVal به همراه داده‌های محیطی می‌تواند چارچوب مناسب‌تری برای ارزیابی وضعیت اکولوژیکی فراهم کند. در نهایت، توسعه و اعتبارسنجی شاخص‌های متناسب با شرایط اکولوژیکی هر منطقه، به ویژه در خلیج فارس و دریای عمان، می‌تواند دقت پایش و قابلیت استفاده مدیریتی ماکروبنیتوزها را افزایش دهد.

بر اساس یافته‌های این بررسی، تحقیقات آینده در مورد استفاده از گونه‌ها و جوامع ماکروبنیتوز به عنوان شاخص‌های زیستی باید از شناسایی صرف گونه‌های شاخص به سمت توسعه و اعتبارسنجی شاخص‌های بومی، چند عاملی و قابل تعمیم حرکت کند. اول، با توجه به تفاوت در پاسخ‌های گونه‌های ماکروبنیتوز در مناطق جغرافیایی مختلف، مطالعات میدانی طولانی مدت برای شناسایی گونه‌های شاخص بومی و تعیین دامنه و آستانه پاسخ‌های آنها به عوامل مختلفی مانند غنی‌سازی آلی، کاهش اکسیژن، فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی و تغییرات دما مورد نیاز است. دوم، با توجه به اینکه اکثر مطالعات بررسی شده مربوط به سایر مناطق دریایی جهان است، یکی از اولویت‌های تحقیقاتی برای ایران، انجام مطالعات میدانی و بلندمدت در خلیج فارس و دریای عمان به منظور شناسایی گونه‌ها و جوامع شاخص ماکروبنیتوز، تعیین دامنه و آستانه پاسخ آنها به فشارهای محیطی و اعتبارسنجی شاخص‌هایی مانند AMBI، M-AMBI و IndVal است.

نتایج این مطالعات می‌تواند زمینه لازم را برای توسعه و بومی‌سازی ابزارهای زیستی متناسب با شرایط اکولوژیکی آب‌های جنوب ایران فراهم کند. سوم، استفاده همزمان از داده‌های زیستی، فیزیکی، شیمیایی و رسوب‌شناسی و ادغام آنها با روش‌های آماری چند متغیره و مدل‌های پیش‌بینی می‌تواند به تشخیص بهتر اثرات عوامل طبیعی از فشارهای انسانی کمک کند. همچنین، توسعه روش‌های جدید شناسایی مولکولی، از جمله بارکدگذاری DNA و eDNA، می‌تواند محدودیت‌های شناسایی مورفولوژیکی و کمبود اطلاعات طبقه‌بندی را کاهش دهد. از سوی دیگر، ایجاد یک پایگاه داده جامع و منطقه‌ای از گونه‌های ماکروبنیتوز، ویژگی‌های اکولوژیکی، گروه‌های حساسیت به آلودگی و پاسخ آنها به عوامل محیطی می‌تواند زمینه را برای استانداردسازی برنامه‌های پایش فراهم کند. در نهایت، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر طراحی برنامه‌های پایش بلندمدت و چند فشاری متمرکز شوند تا تغییرات ناشی از آلودگی، تغییرات اقلیمی، اوتروفیکاسیون و تخریب زیستگاه‌ها به طور همزمان ارزیابی شده و نقش گونه‌های شاخص در پیش‌بینی تغییرات آینده در اکوسیستم‌های دریایی با دقت بیشتری تعیین شود.

References

- Alsaftar, Z., Cúrdia, J., Borja, A., Irigoien, X., & Carvalho, S. (2019). Consistent variability in beta-diversity patterns contrasts with changes in alpha-diversity along an onshore to offshore environmental gradient: the case of Red Sea soft-bottom macrobenthos. *Marine Biodiversity*, 49, 247-262. DOI: 10.1007/s12526-017-0791-3
- Amaral, A. C., Morgado, E. H., & Salvador, L. B. (1998). Polychaetes as bioindicators of organic pollution on the beaches of São Paulo. *Revista brasileira de biologia*, 58(2), 307-316. 10.1016/j.ocecoaman.2023.106645
- Antonelli et al., 2016: Antonelli, L., Foata, J., Quilichini, Y., & March&, B. (2016). Influence of season & site location on European cultured sea bass parasites in Corsican fish farms using indicator

species analysis (IndVal). *Parasite Research*, 115(2), 561-568. <https://doi.org/10.1007/s00436-015-4772-9>

Bendtsen & Hansen, 2013: Bendtsen, J., & Hansen, J. L. S. (2013). A model of life cycle, connectivity & population stability of benthic macro-invertebrates in the North Sea/Baltic Sea transition zone. *Ecological Modelling*, 267, 54-65. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.07.012>

Bouchet, V. M. P., Telford, R. J., Rygg, B., Oug, E., & Alve, E. (2018). Can benthic foraminifera serve as proxies for changes in benthic macrofaunal community structure? Implications for the definition of reference conditions. *Marine Environmental Research*, 137, 24-36. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2018.02.023>

Burger, J. (2006). Bioindicators: Types, development, & use in ecological assessment & research. *Environmental Bioindicators*, 1(1), 22-39. <https://doi.org/10.1080/15555270590966483>

Bustos-Baez, S., & Frid, C. (2003). Using indicator species to assess the state of macrobenthic communities: Advances in polychaete research. *Hydrobiologia*, 496(1-3), 299-309. <https://doi.org/10.1023/A:1026169520547>

Carvalho, L. R. S., Loiola, M., & Barros, F. (2017). Manipulating habitat complexity to understand its influence on benthic macrofauna. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology*, 489, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2017.01.014>

Castro, H., Ramalheira, F., Quintino, V., & Rodrigues, A. M. (2006). Amphipod acute & chronic sediment toxicity assessment in estuarine environmental monitoring: An example from Ria de Aveiro, NW Portugal. *Marine Pollution Bulletin*, 53(1-4), 91-99. [10.1016/j.marpolbul.2005.09.029](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.09.029)

Checon, H. H., Vieira, D. C., Corte, G. N., Sousa, E. C. P. M., Fonseca, G., & Amaral, A. C. Z. (2018). Defining soft bottom habitats & potential indicator species as tools for monitoring coastal systems: A case study in a subtropical bay. *Ocean & Coastal Management*, 164, 68-78. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.03.035>

Chen, L. L., Wang, Q. C., Li, X. J., Zhou, Z. Q., & Li, B. Q. (2016). Long-term trends of macrobenthos in southern Bohai Sea, China, in relation to environmental changes. *Scientia Sinica Vitae*, 46(9), 1121-1134. <https://doi.org/10.1360/N052016-00063>

Borja, A., Franco, J., & Pérez, V. (2000). A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine & coastal environments. *Marine pollution bulletin*, 40(12), 1100-1114. DOI: [10.1016/S0025-326X\(00\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00061-8)

Chytrý, M., Tichý, L., Holt, J., & Botta-Dukát, Z. (2002). Determination of diagnostic species with statistical fidelity measures. *Journal of Vegetation Science*, 13(1), 79-90. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2002.tb02025.x>

Coutellec, M., & Barata, C. (2013). Special issue on long-term ecotoxicological effects: An introduction. *Ecotoxicology*, 22(5), 763-766. <https://doi.org/10.1007/s10646-013-1092-7>

De Cáceres, M., Legendre, P., & Moretti, M. (2010). Improving indicator species analysis by combining groups of sites. *Oikos*, 119(10), 1674-1684. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18334.x> Digital Object Identifier (DOI)

De la Vega, C., Paar, M., Köhler, L., von Dorrien, C., Kriegl, M., Oesterwind, D., & Schubert, H. (2023). Trophic redundancy in benthic fish food webs increases with scarcity of prey items, in the southern Baltic Sea. *Frontiers in Marine Science*, Article 1143792. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1143792>

Dean, H. K. (2015). The use of polychaetes (Annelida) as indicator species of marine pollution: A review. *Revista de Biología Tropical*, 56, 1-11. DOI: [10.15517/RBT.V56I4.27162](https://doi.org/10.15517/RBT.V56I4.27162)

Dufrêne, M., & Legendre, P. (1997). Species assemblages & indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, 67(3), 345-366. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(1997\)067\[0345:SAAIST\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(1997)067[0345:SAAIST]2.0.CO;2)

Ellis, J., Anlauf, H., Kürten, S., Lozano-Cortés, D., Alsaffar, Z., Cúrdia, J., ... & Carvalho, S. (2017). Cross shelf benthic biodiversity patterns in the Southern Red Sea. *Scientific reports*, 7(1), 437. DOI: [10.1038/s41598-017-00507-y](https://doi.org/10.1038/s41598-017-00507-y)

Fichet, D., Radenac, M.-H., & Miramand, P. (1998). Experimental studies of impacts of harbour sediments resuspension to marine invertebrates larvae: Bioavailability of Cd, Cu, Pb & Zn & toxicity. *Marine Pollution Bulletin*, 36(7), 509-518. [10.1016/S0025-326X\(97\)00190-2](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(97)00190-2)

- Fonseca, G., & Gallucci, F. (2016). The need of hypothesis-driven designs & conceptual models in impact assessment studies: An example from the free-living marine nematodes. *Ecological Indicators*, 71, 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.051>
- Gadelha, J. R., Morgado, F., & Soares, A. M. V. M. (2013). Histology & histochemistry of sea anemones in environmental contamination studies. *Microscopy & Microanalysis*, 19(S4), 57-58. <https://doi.org/10.1017/S1431927613000901>
- Gallo, L., Corapi, A., Loppi, S., & Lucadamo, L. (2014). Element concentrations in the lichen *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf transplanted around a cement factory (Southern Italy). *Ecological Indicators*, 46, 566-574. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.029>
- Geng, N., Wu, Y., Zhang, M., Tsang, D. C., Rinklebe, J., Xia, Y., ... & Ok, Y. S. (2019). Bioaccumulation of potentially toxic elements by submerged plants & biofilms: A critical review. *Environment international*, 131, 105015. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105015
- Gérard, C., & Lance, E. (2019). Decline of freshwater gastropods exposed to recurrent interacting stressors implying cyanobacterial proliferations & droughts. *Aquatic Ecology*, 53(1), 79-96. <https://doi.org/10.1007/s10452-019-09674-8>
- Gesteira, J. G., & Dauvin, J. C. (2000). Amphipods are good bioindicators of the impact of oil spills on soft-bottom macrobenthic communities. *Marine Pollution Bulletin*, 40(11), 1017-1027. DOI: 10.1016/S0025-326X(00)00046-1
- Gislason, H., Bastardie, F., Dinesen, G. E., Egekvist, J., & Eigaard, O. R. (2017). Lost in translation? Multi-metric macrobenthos indicators & bottom trawling. *Ecological Indicators*, 82, 260-270. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.004>
- Halpern, B. S., Frazier, M., Potapenko, J., Casey, K. S., Koenig, K., Longo, C., ... & Walbridge, S. (2015). Spatial & temporal changes in cumulative human impacts on the world's ocean. *Nature communications*, 6(1), 7615. <https://www.nature.com/articles/ncomms8615>
- Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., Bruno, J. F., Casey, K. S., Ebert, C., Fox, H. E., Fujita, R., Heinemann, D., Lenihan, H. S., Madin, E. M. P., Perry, M. T., Selig, E. R., Spalding, M., Steneck, R., Watson, R. (2008). A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 319(5865), 948-952. <https://doi.org/10.1126/science.1149345>
- Han, W., & Han, Q. (2024). Macrobenthic indicator species: From concept to practical applications in marine ecology. *Global Ecology & Conservation*, e03262.
- Han, W., Yan, R., Peng, S., Zhou, W., Yang, Y., & Han, Q. (2025). Integrated macrobenthic TITAN, AMBI, & M-AMBI indices for assessment of marine ecological quality in the East China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 214, 117704. 10.1016/j.marpolbul.2025.117704
- Hill, M. O. (1979). Twinspan: A Fortran program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of individual & attributes. Cornell University Press.
- ISO. (1979). International Organisation for Standardisation (ISO) (1979). Assessment of the biological quality of rivers by a macroinvertebrate "score". ISO/TC 147/SC 5/WG 6/N5 (Geneva: International Organisation for Standardisation, ISO) 18.
- Ito, M., Ito, K., Ohta, K., Hano, T., Onduka, T., Mochida, K., & Fujii, K. (2016). Evaluation of bioremediation potential of three benthic annelids in organically polluted marine sediment. *Chemosphere*, 163, 392-399. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.046>
- Keup, L. E., Mackenthun, K. M., & Ingram, W. M. (1967). Biology of water pollution: A collection of selected papers on stream pollution, waste water, & water treatment. United States Department of the Interior, Federal Water Pollution Control Administration.
- Khedhri, I., Atoui, A., Ibrahim, M., Afli, A., & Aleya, L. (2016). Assessment of surface sediment dynamics & response of benthic macrofauna assemblages in Boughrara Lagoon (SW Mediterranean Sea). *Ecological Indicators*, 70, 77-88.
- Kolkwitz, R., & Marsson, M. (1908). Ecological plant saprobionts. *Bericht der Deutschen Botanischen Gesellschaft*, 26a, 505-519.
- Kolkwitz, R., & Marsson, M. (1909). Ecology of animal saprobionts. *International Review of Hydrobiology & Hydrography*, 2, 126-152.
- L&res, P. B., Verner, J., & Thomas, J. W. (1988). Ecological uses of vertebrate indicator species: a critique. *Conservation biology*, 2(4), 316-328.

- Leonardsson, K., Blomqvist, M., & Rosenberg, R. (2009). Theoretical & practical aspects on benthic quality assessment according to the EU Water Framework Directive – Examples from Swedish waters. *Marine Pollution Bulletin*, 58(9), 1286-1296. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.05.007>
- Levin, L. A., & Gage, J. D. (1998). Relationships between oxygen, organic matter & the diversity of bathyal macrofauna. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 45(1-3), 129-163.
- Li, B., Jiang, S., Lü, J., Chen, L., Yan, L., Liu, C., Li, X., Song, B., & Li, X. (2020). Species composition & long-term variation of macrobenthos in intertidal zone & offshore areas of the Yellow River Delta. *Biodiversity Science*, 28(12), 1511–1522. <https://doi.org/10.17520/biods.2020164>
- Li, B., Li, X., Bouma, T. J., Soissons, L. M., Cozzoli, F., Wang, Q., Zhou, Z., & Chen, L. (2017). Analysis of macrobenthic assemblages & ecological health of Yellow River Delta, China, using AMBI & M-AMBI assessment method. *Marine Pollution Bulletin*, 119(2), 23–32. [10.1016/j.marpolbul.2017.03.044](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.044)
- Li, B., Li, X., Bouma, T. J., Soissons, L. M., Cozzoli, F., Wang, Q., ... & Chen, L. (2017). Analysis of macrobenthic assemblages & ecological health of Yellow River Delta, China, using AMBI & M-AMBI assessment method. *Marine Pollution Bulletin*, 119(2), 23-32.
- Li, B., Wang, Q., & Li, B. (2013). Assessing the benthic ecological status in the stressed coastal waters of Yantai, Yellow Sea, using AMBI & M-AMBI. *Marine pollution bulletin*, 75(1-2), 53-61.
- Li, F., Ma, Y., Song, X., Li, S., Zhang, X., Wang, X., Wang, T., & Sun, Z. (2022). Community structure & ecological quality assessment of macrobenthos in the coastal sea areas of Northern Yantai, China. *Frontiers in Marine Science*, 9, 989034. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.989034>
- Liu, C., Xu, Q., Wang, Z., Jiang, X., Ding, G., Ren, Q., Song, J., & Liu, M. (2023). Community structure of benthic molluscs shaped by environmental & ecological variables in the coastal waters of Changle, Fujian Province, China. *Frontiers in Marine Science*, 10, Article 1045393. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1045393>
- Liu, L. S., Li, Z. Y., Meng, W., Zheng, B. H., & Hu, X. A. (2007). The community structure of zoobenthos & bioassessment of water quality in the lower reaches of the Songhua River. *Research of Environmental Sciences*, 20(3), 81-86.
- Liu, L. S., Meng, W., Li, X. Z., Li, Z. C., Zheng, B. H., Lei, K., & Li, Z. Y. (2009). Studies on macrobenthos in the northern waters of Liaodong Bay: II. Biodiversity & community structure. *Research of Environmental Sciences*, 22(2), 155-161.
- Liu, X. D., Wang, J. S., Sun, L. E., Cui, W. L., & Li, Z. (2021). Community structure & diversity of macrozoobenthos at Bohai Sea off Sh&ong. *Marine Environmental Science*, 40(6), 929-936.
- Liu, X. S., Zhao, R., Hua, E., Lu, L., & Zhang, Z. N. (2014). Macrofaunal community structure in the Laizhou Bay in summer & the comparison with historical data. *Mar. Sci. Bull*, 33(10).
- Luo, X. X., & Yang, J. Q. (2009). Progress in researches on benthic indices of assessing marine ecosystem health. *Marine Science Bulletin*, 28(3), 106-112.
- Maanan, M. (2007). Biomonitoring of heavy metals using *Mytilus galloprovincialis* in Safi coastal waters, Morocco. *Environmental Toxicology*, 22(5), 525–531. <https://doi.org/10.1002/tox.20301>
- Martin, J. P., Lizarralde, Z. I., Pittaluga, S., Sar, A. M., Perroni, M., & Torres, S. (2019). Macrobenthic assemblages of intertidal flats in Southern Patagonia, Argentina. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 35, 689-705.
- Marujo Neves, J., Martins, M., Adão, H., Mil-Homens, M., Costa, M. H., & Lobo-Arteaga, J. (2025). Ecological quality assessment of estuarine macrobenthic communities using an integrative approach. *Marine Pollution Bulletin*, 210, 117316.
- McArthur, M. A., Brooke, B. P., Przeslawski, R., Ryan, D. A., Lucieer, V. L., Nichol, S., McCallum, A. W., Mellin, C., Cresswell, I. D., Radke, L. C. (2010). On the use of abiotic surrogates to describe marine benthic biodiversity. *Estuarine, Coastal & Shelf Science*, 88(1), 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.03.003>
- Nasi, F., Nordström, M. C., Bonsdorff, E., Auriemma, R., Cibic, T., & Del Negro, P. (2018). Functional biodiversity of marine soft-sediment polychaetes from two Mediterranean coastal areas in relation to environmental stress. *Marine Environmental Research*, 137, 121-132. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2018.03.002>
- Podleśińska, W., & Dąbrowska, H. (2019). Amphipods in estuarine & marine quality assessment – a review. *Oceanologia*, 61(2), 179-196. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2018.09.002>

- Radenac, G.-H., Fichet, D., & Miramand, P. (2001). Bioaccumulation & toxicity of four dissolved metals in *Paracentrotus lividus* sea-urchin embryo. *Marine Environmental Research*, 51(2), 151–166. 10.1016/S0141-1136(00)00092-1
- Rakaj, A., Morroni, L., Grosso, L., Fianchini, A., Pensa, D., Pellegrini, D., & Regoli, F. (2021). Towards sea cucumbers as a new model in embryo-larval bioassays: *Holothuria tubulosa* as test species for the assessment of marine pollution. *Science of the Total Environment*, 787, Article 147593. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147593>
- Reish, D. I. (1985). A discussion of the importance of screen size in washing quantitative marine bottom samples. *Ecology*, 46(2), 307-309. <https://doi.org/10.2307/1930047>
- Somers, H. L. (1958). Benthic Studies in Buzzards Bay. I. Animal-Sediment Relationships 1. *Limnology & oceanography*, 3(3), 245-258.
- Siddig, A. A. H., Ellison, A. M., Ochs, A., Villar-Leeman, C., & Lau, M. K. (2016). How do ecologists select & use indicator species to monitor ecological change? Insights from 14 years of publication in ecological indicators. *Ecological Indicators*, 60, 223-230. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.036>
- Sobczyk, R., Czortek, P., Serigstad, B., & Pabis, K. (2021). Modelling of polychaete functional diversity: Large marine ecosystem response to multiple natural factors & human impacts on the West African continental margin. *Science of the Total Environment*, 792, Article 148075. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148075>
- Sukumaran, S., Vijapure, T., Mulik, J., & Ridha, H. (2021). Marine macrobenthos of North West India- Reviewing the known & unknown. *Frontiers in Marine Science*, 8, 671245.
- Szefer, P., Kim, B.-S., Kim, C.-K., Kim, E.-H., & Lee, C.-B. (2005). Biomonitoring of trace metals in the Black Sea (Romania) using mussels *Mytilus galloprovincialis*. *Water Research*, 39(4), 596–604. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.09.026>
- Wang, Z., Wang, H., Fan, S., Xin, M., & Sun, X. (2021). Community structure & diversity of macrobenthos in Jiaozhou Bay. *Marine Pollution Bulletin*, 171, 112781.
- Wong, C. K. C., Cheung, R. Y. H., & Wong, M. H. (2005). Biomonitoring of heavy metals & trace organics using the intertidal mussel *Perna viridis* in Hong Kong coastal waters. *Marine Pollution Bulletin*, 51(8–12), 857–875. 10.1016/j.marpolbul.2005.04.014
- Xu, Y., & Li, X. Z. (2021). Macrobenthos & offshore ecosystem health evaluation. *Science*, 73, 30-34.
- Yan, J., Sui, J., Xu, Y., Li, X., Wang, H., & Zhang, B. (2020). Assessment of the benthic ecological status in adjacent areas of the Yangtze River Estuary, China, using AMBI, M-AMBI & BOPA biotic indices. *Marine Pollution Bulletin*, 157, 111020. 10.1016/j.marpolbul.2020.111020
- Yang, C., Ding, S., Niu, Y., Zhang, X., & Li, J. (2024). Characteristics of Macrobenthic Communities & their Response to Environmental Changes in East Taihu Lake, China.
- Yap, C. K., Ismail, A., & Tan, S. G. (2003). Can the byssus of green-lipped mussel *Perna viridis* (Linnaeus) from the west coast of Peninsular Malaysia be a biomonitoring organ for Cd, Pb & Zn? Field & laboratory studies. *Environment International*, 29(4), 521–528. 10.1016/S0160-4120(03)00008-4
- Zhang, W., Liu, X., Cheng, H., Zang, J., & Xu, H. (2012). Distribution & community structure of macrobenthos in relation to environmental factors in the Yellow Sea. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 4050–4061
- Zhang, Y., Li, S. W., Lv, Z. B., Ma, Y. Q., Liu, Y. J., Wei, Z. H., & Chen, W. (2013). Application of polychaete in ecological environment evaluation of Laizhou Bay. *Acta Ecol. Sin.*, 33, 2522-2530.



Sustainable Management of Solar Panels within the Framework of a Circular Economy

Fatemeh Molaei^a, Mohsen Rezaeian^a, Jahanbakhsh Balist^{a*}

^aDepartment of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

*Corresponding author: j.balist@ut.ac.ir, <https://orcid.org/0000-0002-4431-3290>

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 2026/01/27
Received in revised form:
2026/02/20
Accepted 2026/02/27
Available online: 2026/03/10

Keywords:
Circular Economy,
Solar Panel Recycling,
Photovoltaic Waste,
Sustainable Development,
Producer Responsibility.

ABSTRACT

The rapid expansion of solar energy systems has played a significant role in reducing greenhouse gas emissions and accelerating the global transition toward renewable energy. However, the increasing deployment of photovoltaic (PV) technologies has also led to growing concerns regarding the management of end-of-life (EoL) photovoltaic modules, which are emerging as a major environmental, economic, and managerial challenge. As the installed capacity of PV systems continues to increase worldwide, a substantial volume of PV waste is expected to be generated in the coming decades. Consequently, developing effective strategies for the collection, recycling, and recovery of valuable materials has become an essential prerequisite for achieving a circular economy in the renewable energy sector. This study aims to comprehensively examine the challenges associated with end-of-life photovoltaic panel management and to identify sustainable recycling strategies through a descriptive-analytical review of recent scientific literature, international reports, and global best practices. The study investigates the technical, economic, environmental, institutional, and social dimensions of PV waste management while evaluating current mechanical, thermal, and chemical recycling technologies, Extended Producer Responsibility (EPR) policies, Design for Recycling (DfR) principles, regulatory frameworks, stakeholder engagement, and circular economy approaches. The findings indicate that insufficient recycling infrastructure, high processing costs, technological limitations, weak regulatory enforcement, inadequate investment, and the absence of integrated waste management systems remain the primary barriers to sustainable photovoltaic recycling, particularly in developing countries. Conversely, strengthening domestic recycling technologies, implementing Extended Producer Responsibility schemes, promoting recyclable product design, expanding secondary materials markets, enhancing collaboration among governments, industry, and research institutions, and increasing public awareness can significantly improve material recovery rates, reduce environmental impacts, and enhance resource efficiency throughout the photovoltaic value chain. The main contribution of this study is the development of an integrated and locally adaptable framework for sustainable end-of-life photovoltaic panel management in Iran. By combining technical, economic, institutional, and policy perspectives, the proposed framework provides practical guidance for supporting the transition toward a circular economy and improving resource sustainability within the renewable energy sector.

Cite this article: Molaie, F., rezaeian, M., & Balist, J. (2026). Sustainable Management of Solar Panels within the Framework of a Circular Economy. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 1(1), 60-78. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252594>



Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252594>

Introduction

The rapid growth of renewable energy technologies, especially photovoltaic systems, has played a pivotal role in the global transition to sustainable development and reduced dependence on fossil fuels. However, the accumulation of end-of-life solar modules has become one of the world's emerging environmental and management challenges. Estimates indicate that by the middle of this century, more than 78 million tons of photovoltaic panels will be discarded worldwide; a figure that, in the absence of recycling infrastructure, could pose a serious threat to soil, water, and human health. Solar panels are composed of materials such as glass (more than 70% by weight), aluminum, silicon, and silver, which have high economic value, but at the same time contain compounds such as lead and cadmium, which, if improperly disposed of, cause serious environmental pollution. The multilayer structure and thermal bonding of the panel components make separation and recycling difficult and costly. In Iran, with the growth of small-scale and home solar power plants (more than 500 MW of installed capacity by the end of 1402), the issue of end-of-life management of this equipment is becoming a national concern, but it still lacks binding laws, technological infrastructure, and effective regulatory mechanisms. The theoretical framework of this research is based on the principles of circular economy, which aims to preserve the value of materials in the production cycle and reduce resource waste. In this regard, two key concepts, including Extended Producer Responsibility (EPR) and Design for Recyclability (DfR), play a central role. The main objective of this research is to analyze the challenges and opportunities of photovoltaic panel waste management and to provide an integrated and indigenous framework for Iran that is based on Extended Producer Responsibility, product design with recyclability, development of mechanical, thermal, and chemical technologies appropriate to domestic capacity, and tracking and stakeholder participation mechanisms. The importance of the research is that by combining EPR policy, recyclable design, localized technologies, and stakeholder participation, it provides an operational model for sustainable management of solar waste in Iran that can be used as a model for other developing countries with similar conditions.

Method

This research is an analytical review study with a qualitative approach and is based on library and document studies. A systematic search was conducted in reputable international databases including ScienceDirect, Scopus, SpringerLink, and Google Scholar, as well as Persian databases including SID, Magiran, and Civilica with the combined keywords "solar panel recycling", "photovoltaic waste management", "circular economy", "extended producer responsibility", and their Persian equivalents including "solar panel recycling", "photovoltaic waste", "circular economy", and "producer responsibility". The search period was from 2010 to 2025 to cover the latest research, global policies, and technological developments in the field of solar panel recycling. Inclusion criteria included (1) direct relevance to the topic of photovoltaic panel waste management or recycling, (2) provision of quantitative or qualitative data on recycling technologies, EPR policies, or environmental-economic analysis, and (3) publication in reputable scientific journals or official reports of international organizations (such as IRENA, IEA, and EPA). From 112 primary sources, 40 articles and reports that were most relevant to the topic were selected and analyzed. The data extraction process was carried out qualitatively using the oriented content analysis method, and the information was categorized into four main axes: (1) technical challenges, (2) economic challenges, (3) institutional and legal challenges, and (4) cultural challenges and public awareness. Also, successful global models in the field of PV waste management (such as the European Union's experience in implementing the WEEE Directive, the EPR model in Germany and France, and the PV CYCLE project) were analyzed for localization in Iran. To analyze the current situation

in Iran, reports from Tavanir Company, the Renewable Energy Organization (SATBA), and related domestic research were used. The data were examined using comparative and content analysis methods, and based on that, a proposed integrated framework for sustainable management of solar panel waste and transition to a circular economy in Iran was designed.

Results

A systematic review of the literature and qualitative data analysis revealed that sustainable solar panel waste management faces significant challenges across technical, economic, institutional, and social dimensions. From a technical perspective, the complex multilayer structure of photovoltaic (PV) panels and the strong bonding of their components make recycling difficult and expensive. Recovering valuable materials such as silver and silicon requires advanced thermal and chemical technologies that are not yet widely commercialized. In addition, the lack of international standards for design for recyclability has limited the development of more recyclable PV modules.

Economically, the high cost of recycling, combined with the relatively low market value of some recovered materials, reduces the profitability of recycling activities. Limited government subsidies, insufficient financial incentives, and the absence of well-developed secondary markets further discourage private investment in recycling infrastructure. Institutionally, many countries, including Iran, still lack comprehensive regulations, monitoring systems, and unified technical standards for end-of-life PV management. The absence of Extended Producer Responsibility (EPR) mechanisms also weakens the collection and recycling of discarded panels. From a social perspective, limited public awareness regarding proper disposal and recycling, together with the rapid evolution of PV technologies and the increasing diversity of panel designs, creates additional challenges for establishing efficient recycling systems.

To address these challenges, several opportunities and policy measures were identified. These include promoting a circular economy through design for recycling, component reuse, and material recovery; implementing Extended Producer Responsibility (EPR) policies based on successful international experiences; developing indigenous recycling technologies using mechanical, thermal, and chemical processes, supported by emerging technologies such as artificial intelligence and nanotechnology; creating economic incentives through subsidies, tax exemptions, and take-back programs; improving panel design to facilitate recycling; establishing national monitoring and traceability systems using digital databases and QR codes; strengthening international cooperation and technology transfer; and enhancing public awareness through education and outreach programs. Together, these strategies can improve resource recovery, reduce environmental impacts, and support the long-term sustainability of the photovoltaic industry.

Conclusions

A systematic review of the literature and analysis of the challenges and opportunities of photovoltaic panel waste management showed that this issue is not just an environmental challenge, but a strategic issue for sustainable development in which smart policy-making, technological innovation, interagency cooperation, public participation, and culture-building play a central role. The challenges can be summarized in five categories: technical, economic, institutional, cultural, and emerging technologies, and opportunities such as the development of green recycling technologies, redesigning panels based on recyclability, strengthening the EPR system, establishing a national database, and active participation of the private sector pave the way for the transition to a circular economy. The proposed framework for Iran is based on three main axes: (1) an institutional and policy framework including the establishment of a national recycling institution, the adoption of an EPR law, and a digital tracking system; (2) the technical and economic model including the combination of mechanical, thermal, and chemical

technologies, regional centers with the PPP model, and the support system and economic incentives; and (3) the role of stakeholders and public participation including the government, municipalities, the private sector, the media, and citizens. If countries like Iran can respond to this issue in a timely manner and properly localize global models, they will not only prevent future environmental threats, but also provide them with new opportunities in the field of green economy, employment, and resource efficiency. It is suggested that future research should focus on quantitative assessment of waste generation, techno-economic feasibility of regional recycling centers, and comparative study of EPR policies in different countries. The establishment of the proposed integrated framework can increase the recovery of valuable materials, reduce environmental risks, and facilitate the transition to a circular economy in the renewable energy sector.



مدیریت پایدار پل های خورشیدی در چارچوب اقتصاد چرخشی

فاطمه مولائی^a، محسن رضائیان^a، جهانبخش بالیست^{a*}

^a گروه برنامه ریزی، مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: j.balist@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	رشد سریع بهره گیری از انرژی خورشیدی در سال های اخیر، اگرچه نقش مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و توسعه انرژی های تجدیدپذیر داشته است، اما هم زمان مسئله مدیریت پل های فتوولتائیک پایان عمر را به یکی از چالش های مهم محیط زیستی، اقتصادی و مدیریتی تبدیل کرده است. با افزایش ظرفیت نصب نیروگاه های خورشیدی، حجم پسماند این تجهیزات نیز در دهه های آینده به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت؛ از این رو طراحی و اجرای راهکارهای مؤثر برای جمع آوری، بازیافت و بازگرداندن مواد ارزشمند به چرخه تولید، از الزامات تحقق اقتصاد چرخشی در صنعت انرژی به شمار می رود. پژوهش حاضر با هدف تحلیل جامع چالش ها و ارائه راهبردهای پایدار برای مدیریت پل های فتوولتائیک پایان عمر، با استفاده از روش مرور تحلیلی و توصیفی، مطالعات علمی، گزارش های بین المللی و تجربیات کشورهای پیشرو را بررسی کرده است. در این مطالعه، چالش های فنی، اقتصادی، محیط زیستی، نهادی و اجتماعی مرتبط با بازیافت پل های خورشیدی مورد ارزیابی قرار گرفته و فناوری های متداول بازیافت مکانیکی، حرارتی و شیمیایی، سیاست های مسئولیت توسعه یافته تولیدکننده، طراحی برای بازیافت پذیری، الزامات قانونی، نقش ذی نفعان و ظرفیت های اقتصاد چرخشی تحلیل شده اند. یافته های پژوهش نشان می دهد که نبود زیرساخت های مناسب بازیافت، هزینه های بالای فرآوری، محدودیت فناوری، ضعف قوانین الزام آور، کمبود سرمایه گذاری و نبود نظام یکپارچه مدیریت پسماند، از مهم ترین موانع توسعه بازیافت پایدار پل های خورشیدی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، محسوب می شوند. در مقابل، توسعه فناوری های بومی بازیافت، استقرار نظام مسئولیت توسعه یافته تولیدکننده، بهبود طراحی مازول ها با هدف تسهیل جداسازی اجزا، توسعه بازار مواد بازیافتی، تقویت همکاری میان دولت، صنعت و مراکز پژوهشی و ارتقای آگاهی عمومی می تواند میزان بازیابی مواد ارزشمند را افزایش داده، آثار محیط زیستی را کاهش دهد و بهره وری زنجیره تأمین را بهبود بخشد. نوآوری این پژوهش، ارائه چارچوبی یکپارچه و بومی سازی شده برای مدیریت پایدار پسماند پل های فتوولتائیک در ایران است که با تلفیق ابعاد فنی، اقتصادی، نهادی و سیاستی، زمینه گذار به اقتصاد چرخشی و استفاده بهینه از منابع در صنعت انرژی های تجدیدپذیر را فراهم می سازد.

استناد به این مقاله: مولایی، فاطمه؛ رضائیان، محسن و بالیست، جهانبخش. (۱۴۰۴). مدیریت پایدار پل های خورشیدی در چارچوب اقتصاد چرخشی. راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، ۱(۱)، ۶۰-۸۷. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252594>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252594>.

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

رشد فزاینده تقاضای جهانی برای انرژی، نگرانی‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، موجب شده است توسعه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر به یکی از اولویت‌های اصلی سیاست‌های انرژی در بسیاری از کشورها تبدیل شود (Billewar et al., 2023). در این میان، سامانه‌های فتوولتائیک به دلیل دسترسی گسترده به منبع خورشیدی، کاهش مستمر هزینه تولید، پیشرفت فناوری ساخت و قابلیت نصب در مقیاس‌های مختلف، جایگاه ویژه‌ای در سبد انرژی جهان یافته‌اند. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی^۱ (IEA, 2023)، انرژی خورشیدی تا سال ۲۰۲۸ بیشترین سهم را در افزایش ظرفیت تولید برق از منابع تجدیدپذیر خواهد داشت و به موتور محرک گذار جهانی به سمت انرژی پاک تبدیل می‌شود. همچنین گزارش مشترک آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر^۲ و اتحادیه بین‌المللی مخابرات^۳ نشان می‌دهد که توسعه سریع صنعت فتوولتائیک، علاوه بر مزایای اقتصادی و محیط‌زیستی، چالش‌های جدیدی در زمینه مدیریت تجهیزات پایان عمر ایجاد کرده است؛ به گونه‌ای که مدیریت پایدار پنل‌های مستعمل به یکی از ارکان تحقق اقتصاد چرخشی و توسعه پایدار تبدیل شده است (Tripathi et al., 2026; Chowdhury et al., 2022; Askari Shayegan et al., 2024).

افزایش ظرفیت نصب سامانه‌های خورشیدی، به‌طور اجتناب‌ناپذیر موجب افزایش حجم پنل‌های خارج‌شده از چرخه بهره‌برداری خواهد شد. عمر مفید اغلب پنل‌های فتوولتائیک بین ۲۵ تا ۳۰ سال برآورد می‌شود؛ بنابراین نخستین نسل نیروگاه‌های خورشیدی که از دهه ۱۹۹۰ و اوایل دهه ۲۰۰۰ نصب شده‌اند، اکنون به پایان عمر عملیاتی خود نزدیک می‌شوند. برآوردهای انجام‌شده نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۷۸ میلیون تن پسماند پنل‌های خورشیدی در جهان تولید خواهد شد که در صورت نبود زیرساخت‌های مناسب برای جمع‌آوری، بازیافت و استفاده مجدد، می‌تواند به یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی و اقتصادی قرن حاضر تبدیل شود (Sandanayake et al., 2022). در همین راستا، مطالعات جدید نیز روند رو به رشد تولید پسماندهای فتوولتائیک را تأیید کرده و بر ضرورت توسعه سامانه‌های مدیریت پایان عمر تجهیزات تأکید دارند (Piedrahita et al., 2025; Khakpour et al., 2025).

پنل‌های خورشیدی از مواد ارزشمند و راهبردی نظیر شیشه، آلومینیوم، سیلیکون، مس و نقره تشکیل شده‌اند که بازیابی آن‌ها علاوه بر کاهش مصرف منابع طبیعی، می‌تواند ارزش اقتصادی قابل‌توجهی برای صنعت بازیافت ایجاد کند. در مقابل، وجود فلزات سنگین و ترکیباتی نظیر سرب، کادمیوم و برخی پلیمرهای مقاوم در ساختار این تجهیزات، در صورت دفن یا دفع غیراصولی، خطر آلودگی خاک، منابع آب و اکوسیستم‌های طبیعی را افزایش می‌دهد (Babaei & Nasr Esfahani, 2024; Sánchez et al., 2024). علاوه بر این، ساختار چندلایه ماژول‌های فتوولتائیک، استفاده از لایه‌های پلیمری مقاوم و اتصال حرارتی اجزای مختلف، فرآیند جداسازی مواد را با پیچیدگی‌های فنی و هزینه‌های بالا مواجه کرده است؛ به همین دلیل، توسعه فناوری‌های بازیافت مکانیکی، حرارتی، شیمیایی و ترکیبی به یکی از مهم‌ترین محورهای پژوهش‌های اخیر تبدیل شده است (Gerold & Antrekowitsch, 2024; Das & Sarmah, 2025; Wei et al., 2025; Celep et al., 2025).

همزمان با توسعه فناوری‌های بازیافت، مفهوم اقتصاد چرخشی به‌عنوان چارچوبی نوین برای مدیریت پایدار منابع، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. برخلاف الگوی اقتصاد خطی که بر استخراج، تولید، مصرف و دفع استوار است، اقتصاد چرخشی بر حفظ ارزش مواد، افزایش طول عمر محصولات، استفاده مجدد، بازتولید و بازیافت مؤثر تأکید

^۱ International Energy Agency (IEA)

^۲ International Renewable Energy Agency (IRENA)

^۳ International Telecommunication Union (ITU)

دارد. در صنعت فتوولتائیک، اجرای سیاست‌هایی مانند مسئولیت توسعه‌یافته تولیدکننده^۱، طراحی برای بازیافت‌پذیری^۲، توسعه بازار مواد بازیافتی و ایجاد زنجیره‌های تأمین بسته، از مهم‌ترین راهکارهای تحقق اقتصاد چرخشی به شمار می‌روند (Wambach et al., 2024; IRENA & ITU, 2023). مطالعات اخیر نشان می‌دهد که موفقیت این رویکرد مستلزم هم‌افزایی میان سیاست‌گذاران، تولیدکنندگان، مراکز پژوهشی، صنایع بازیافت و مصرف‌کنندگان است و بدون وجود چارچوب‌های قانونی، سرمایه‌گذاری در فناوری و مشارکت ذی‌نفعان، دستیابی به چرخه بسته مواد امکان‌پذیر نخواهد بود (Chowdhury et al., 2022; Askari Shayegan et al., 2024; Gerold & Antrekowitsch, 2024).

مرور ادبیات بین‌المللی نشان می‌دهد که طی سال‌های اخیر مطالعات متعددی به بررسی ابعاد مختلف مدیریت پسماند پنل‌های فتوولتائیک پرداخته‌اند. برخی پژوهش‌ها بر توسعه فناوری‌های بازیافت و افزایش راندمان بازیابی مواد ارزشمند تمرکز داشته‌اند (Sánchez et al., 2024; Das & Sarmah, 2025; Wei et al., 2025)، در حالی که گروهی دیگر ابعاد اقتصادی، سیاست‌گذاری و امکان‌سنجی استقرار اقتصاد چرخشی را مورد بررسی قرار داده‌اند (Piedrahita et al., 2025; Khakpour et al., 2025; Askari Shayegan et al., 2024). همچنین، مرورهای جامع انجام‌شده توسط Babaei & Nasr Esfahani (۲۰۲۴)، Chowdhury و همکاران (۲۰۲۲)، Wambach و همکاران (۲۰۲۴) و Celep و همکاران (۲۰۲۵) نشان می‌دهد که اگرچه پیشرفت‌های قابل‌توجهی در حوزه فناوری‌های بازیافت و سیاست‌های مدیریت پسماند حاصل شده است، اما همچنان شکاف قابل‌توجهی میان رشد حجم پسماندهای فتوولتائیک و ظرفیت واقعی بازیافت در بسیاری از کشورها وجود دارد. افزون بر این، اغلب مطالعات هر یک تنها بر یک یا چند بعد فنی، اقتصادی یا سیاستی تمرکز داشته‌اند و کمتر پژوهشی به ارائه چارچوبی یکپارچه برای تلفیق ابعاد فنی، اقتصادی، نهادی، اجتماعی و محیط‌زیستی مدیریت پنل‌های پایان عمر در چارچوب اقتصاد چرخشی پرداخته است.

در ایران نیز توسعه نیروگاه‌های خورشیدی طی سال‌های اخیر شتاب گرفته و برنامه‌های متعددی برای گسترش سامانه‌های خورشیدی خانگی و نیروگاه‌های مقیاس کوچک در دستور کار قرار گرفته است (Tavanir, 2023). با این حال، بررسی ادبیات داخلی نشان می‌دهد که پژوهش‌های انجام‌شده عمدتاً بر طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های فتوولتائیک، ارزیابی عملکرد نیروگاه‌های خورشیدی، تحلیل بازده پنل‌ها و امکان‌سنجی توسعه انرژی خورشیدی متمرکز بوده‌اند و موضوع مدیریت پسماند، بازیافت تجهیزات پایان عمر و به‌کارگیری اصول اقتصاد چرخشی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در میان مطالعات موجود، پژوهش Babaei & Nasr Esfahani (۲۰۲۴) یکی از معدود مطالعاتی است که مدیریت پایدار پسماند پنل‌های خورشیدی را از منظر اقتصاد چرخشی بررسی کرده و بر ضرورت تدوین سیاست‌های ملی، ایجاد زیرساخت‌های بازیافت، توسعه فناوری‌های بومی و مشارکت فعال ذی‌نفعان تأکید دارد. بنابراین، فقدان مطالعات جامع داخلی که بتوانند ابعاد فنی، اقتصادی، نهادی و سیاستی مدیریت پنل‌های پایان عمر را به‌صورت یکپارچه تحلیل کنند، بیانگر وجود شکاف پژوهشی قابل‌توجه در ادبیات ایران است.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف تحلیل جامع چالش‌ها و راهبردهای پایدار بازیافت پنل‌های فتوولتائیک پایان عمر در چارچوب اقتصاد چرخشی انجام شده است. این مطالعه با تلفیق یافته‌های پژوهش‌های جدید، گزارش‌های بین‌المللی و تجربیات کشورهای مختلف، چالش‌های فنی، اقتصادی، محیط‌زیستی، نهادی و اجتماعی مدیریت پسماندهای فتوولتائیک را بررسی کرده و با تأکید بر سیاست مسئولیت توسعه‌یافته تولیدکننده، طراحی برای بازیافت‌پذیری، توسعه فناوری‌های بومی، تقویت قوانین و ارتقای همکاری میان دولت، صنعت و مراکز پژوهشی،

¹ Extended Producer Responsibility (EPR)

² Design for Recycling (DfR)

چارچوبی یکپارچه برای مدیریت پایدار پنل‌های خورشیدی پایان عمر، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه و ایران، ارائه می‌دهد.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نوع مرور روایی تحلیلی است که با رویکرد کیفی و با هدف شناسایی، مقایسه و سنتز یافته‌های پژوهش‌های پیشین در زمینه مدیریت و بازیافت پسماند پنل‌های فتوولتائیک و ارتباط آن با اقتصاد چرخشی انجام شده است. فرایند مرور ادبیات بر اساس یک پروتکل چهارمرحله‌ای و به‌صورت تدریجی طراحی شد؛ به‌گونه‌ای که منابع از سطح اولیه اطلاعات (عنوان) به سطوح عمیق‌تر بررسی (متن کامل) منتقل شدند. دامنه زمانی مطالعات، سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ در نظر گرفته شد تا ضمن پوشش تحولات اولیه و توسعه فناوری‌های بازیافت پنل‌های خورشیدی، پژوهش‌ها و سیاست‌های جدیدتر نیز مورد توجه قرار گیرند.

۱. شناسایی و جستجوی منابع

جستجوی منابع در پایگاه‌های علمی معتبر شامل ScienceDirect، Scopus و Google Scholar انجام شد. برای شناسایی مطالعات مرتبط، از ترکیب کلیدواژه‌های انگلیسی شامل photovoltaic، solar panel recycling، waste management، photovoltaic module recycling، solar photovoltaic waste، circular economy، end-of-life photovoltaic panels و extended producer responsibility استفاده شد. در صورت امکان، کلیدواژه‌ها با استفاده از عملگرهای منطقی AND و OR ترکیب شدند تا دامنه جستجو ضمن حفظ جامعیت، بر موضوع پژوهش متمرکز باشد.

در مرحله شناسایی اولیه، در مجموع ۳۱۲ رکورد از پایگاه‌های مورد بررسی استخراج شد. پس از حذف موارد تکراری، تعداد ۲۴۷ رکورد برای ورود به فرایند غربالگری باقی ماند.

۲. پروتکل غربالگری و انتخاب مطالعات

به‌منظور افزایش شفافیت و قابلیت پیگیری فرایند انتخاب منابع، غربالگری مطالعات در چهار مرحله متوالی انجام شد:

مرحله اول: غربالگری عنوان^۱

در این مرحله عنوان تمامی ۲۴۷ رکورد بررسی شد. مطالعاتی که به‌طور آشکار با موضوع، هدف یا دامنه پژوهش ارتباط نداشتند، حذف شدند. پس از این مرحله، ۱۲۸ مقاله برای بررسی چکیده باقی ماند.

مرحله دوم: غربالگری چکیده^۲

در این مرحله چکیده ۱۲۸ مقاله مطالعه شد تا ارتباط محتوایی آن‌ها با محورهای اصلی پژوهش، شامل فناوری‌های بازیافت پنل‌های فتوولتائیک، مدیریت پسماند، سیاست‌های پایان عمر، مسئولیت تولیدکننده و اقتصاد چرخشی ارزیابی شود. مقالاتی که صرفاً از نظر واژگانی با موضوع پژوهش شباهت داشتند اما از نظر محتوایی ارتباط کافی نداشتند، حذف شدند. در پایان این مرحله، ۷۴ مقاله برای بررسی متن کامل انتخاب شد.

مرحله سوم: خوانش سریع متن کامل^۳

متن کامل ۷۴ مقاله به‌صورت اکتشافی و نسبتاً سریع بررسی شد. در این مرحله، ساختار کلی مقاله، مسئله پژوهش، چارچوب نظری، روش مطالعه، یافته‌ها و بحث بررسی شد تا میزان ارتباط واقعی مقاله با موضوع پژوهش و

^۱ Title Screening

^۲ Abstract Screening

^۳ Rapid Full-Text Reading

ارزش تحلیلی آن مشخص شود. مقالاتی که پس از بررسی متن کامل، ارتباط کافی با سؤال‌ها و اهداف پژوهش نداشتند یا اطلاعات تحلیلی قابل استفاده‌ای ارائه نمی‌کردند، کنار گذاشته شدند. پس از این مرحله، ۴۳ مقاله برای تحلیل عمیق باقی ماند.

مرحله چهارم: خوانش عمیق متن کامل^۱

در مرحله نهایی، ۴۳ مقاله با رویکرد تحلیلی و عمیق مطالعه شد. در این مرحله، اطلاعات مرتبط با مفاهیم و تعاریف کلیدی، مبانی نظری، فناوری‌های بازیافت، ترکیب و ارزش مواد قابل بازیابی، شیوه‌های مدیریت پسماند، سیاست‌های مسئولیت توسعه یافته تولیدکننده، مدل‌های اقتصاد چرخشی، یافته‌های کلیدی، نقاط توافق و اختلاف میان مطالعات و خلأهای پژوهشی استخراج و در قالب یک سنتز روایی با یکدیگر مقایسه شدند.

۳. معیارهای ورود و خروج مطالعات

معیارهای ورود شامل: (۱) ارتباط مستقیم یا معنادار با مدیریت، بازیافت یا پایان عمر پنل‌های فتوولتائیک؛ (۲) پرداختن به حداقل یکی از محورهای فناوری بازیافت، مدیریت پسماند، اقتصاد چرخشی یا سیاست‌های مرتبط؛ (۳) انتشار در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵؛ و (۴) دسترسی به عنوان و چکیده و، در مرحله نهایی، متن کامل مقاله بود. مطالعاتی که ارتباط محتوایی کافی با موضوع نداشتند، موارد تکراری، مطالعات فاقد ارزش تحلیلی برای اهداف پژوهش و منابعی که صرفاً به کاربرد انرژی خورشیدی پرداخته و موضوع پایان عمر یا مدیریت پسماند پنل‌ها را بررسی نکرده بودند، از فرایند مرور حذف شدند.

۴. استخراج، تحلیل و سنتز داده‌ها

پس از انتخاب نهایی مطالعات، اطلاعات هر مقاله به صورت ساختاریافته استخراج و در محورهای موضوعی اصلی دسته‌بندی شد. این محورها شامل فناوری‌های بازیافت و بازیابی مواد، ارزش اقتصادی مواد موجود در پنل‌ها، مدیریت پسماند در پایان عمر، سیاست‌های مسئولیت تولیدکننده، رویکردهای اقتصاد چرخشی، تجارب و الگوهای موفق بین‌المللی و الزامات بومی‌سازی در ایران بودند. سپس داده‌ها با استفاده از تحلیل مقایسه‌ای و تحلیل محتوای کیفی بررسی شدند. در این فرایند، ضمن شناسایی الگوهای مشترک و تفاوت‌های موجود میان مطالعات، نقاط قوت و محدودیت رویکردهای مختلف و خلأهای پژوهشی نیز مشخص شد.

در نهایت، یافته‌های مطالعات منتخب در قالب یک سنتز روایی تحلیلی یکپارچه شدند و بر اساس آن، مؤلفه‌های اصلی یک چارچوب پیشنهادی برای مدیریت پایدار پسماند پنل‌های خورشیدی و گذار به اقتصاد چرخشی در ایران استخراج و سازمان‌دهی شد. منطق کلی فرایند انتخاب و تحلیل مطالعات به صورت Title Screening → Abstract Screening → Rapid Full-Text Reading → Deep Full-Text Reading تعریف شد که در هر مرحله، با کاهش تدریجی تعداد مطالعات، تمرکز تحلیلی بر منابع مرتبط‌تر افزایش یافت.

یافته‌ها و بحث

در این بخش نتایج تحقیق به صورت موردی و سپس تحلیل آن‌ها ارائه شده است. چالش‌ها و مسائل مرتبط با مدیریت پسماند سلول‌های خورشیدی به شرح زیر است:

چالش‌ها و موانع مدیریت پسماند پنل‌های خورشیدی

مدیریت صحیح و پایدار پسماند پنل‌های خورشیدی با چالش‌های متعددی در ابعاد مختلف فنی، اقتصادی، نهادی و اجتماعی روبه‌رو است. این چالش‌ها در کشورهای مختلف بسته به سطح توسعه فناوری، زیرساخت، سیاست‌های قانونی و آگاهی عمومی، شدت و شکل متفاوتی دارند. در ادامه، مهم‌ترین این چالش‌ها به تفکیک بررسی می‌شوند:

^۱ Deep Full-Text Reading

چالش‌های فنی

یکی از اصلی‌ترین موانع، پیچیدگی فناوری بازیافت پنل‌های فتوولتائیک است. ساختار چندلایه این پنل‌ها و اتصال محکم مواد با روش‌هایی مانند لمینیشن حرارتی، فرآیند جداسازی اجزاء را دشوار و پرهزینه می‌کند. برای مثال، استخراج نقره و سیلیکون باکیفیت بالا از ماژول‌های قدیمی نیازمند فناوری‌هایی پیشرفته مانند روش‌های شیمیایی یا حرارتی است که هنوز در بسیاری از کشورها تجاری‌سازی نشده‌اند یا هزینه‌بر هستند (Wambach et al., 2024). همچنین، فقدان استانداردهای بین‌المللی برای طراحی پنل‌ها با قابلیت بازیافت‌پذیری بالا، موجب شده‌است بسیاری از تولیدکنندگان در طراحی اولیه به بازیافت‌پذیری توجه نکنند. این موضوع در آینده فرآیند بازیافت را پیچیده‌تر می‌کند.

چالش‌های اقتصادی

یکی دیگر از موانع جدی، نبود انگیزه اقتصادی کافی برای سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های بازیافت است. به دلیل پایین بودن ارزش بازار برخی از مواد بازیافتی، هزینه بازیافت اغلب بیشتر از منافع حاصل از فروش مواد ثانویه است. همچنین، نبود یارانه‌های دولتی، عدم تعریف مشوق‌ها یا نبود بازار رسمی برای مواد بازیافتی، انگیزه فعالان خصوصی را کاهش می‌دهد (Piedrahita et al., 2025). علاوه بر این، در بسیاری از کشورها هزینه حمل‌ونقل و پردازش پنل‌های فرسوده به مراکز بازیافت، توسط مصرف‌کننده یا پیمانکار پرداخت می‌شود که خود مانعی برای مشارکت داوطلبانه در فرآیند بازیافت به‌شمار می‌رود.

چالش‌های نهادی و قانونی

در بسیاری از کشورها، هنوز قوانین و مقررات جامع برای مدیریت پایان عمر پنل‌های خورشیدی تدوین نشده‌است. حتی در کشورهایی با چارچوب‌های قانونی، اغلب ناهماهنگی نهادی بین سازمان‌های مسئول، فقدان سامانه‌های پایش و ردیابی و نبود استانداردهای فنی یکپارچه، مانعی بر سر راه اجرای مؤثر نظام‌های جمع‌آوری، جداسازی و بازیافت پسماند PV است (Khakpour et al., 2025). نبود مکانیزم الزام‌آور برای تولیدکنندگان در مشارکت در جمع‌آوری و بازیافت مانند مدل EPR نیز موجب می‌شود بسیاری از پنل‌ها بدون نظارت رسمی از چرخه مصرف خارج شوند. از سوی دیگر، در کشورهای در حال توسعه، ضعف در نظارت محیط‌زیستی و عدم اجرای دقیق قوانین، به دفن غیرمجاز پنل‌ها یا صادرات غیرقانونی آن‌ها به کشورهای فقیرتر منجر می‌شود.

چالش‌های فرهنگی و آگاهی عمومی

در کنار چالش‌های زیرساختی و فنی، نبود آگاهی عمومی نسبت به ضرورت بازیافت پنل‌های خورشیدی نیز مانعی جدی است. بسیاری از کاربران خانگی یا حتی شرکت‌های نصب، برنامه مشخصی برای تحویل پنل‌های فرسوده ندارند. در نبود فرهنگ تفکیک و بازگشت، این پسماندها گاه به‌صورت غیرقانونی دفن یا سوزانده می‌شوند که پیامدهای محیط‌زیستی خطرناکی دارد (Babaei & Nasr Esfahani, 2024). همچنین، در برخی کشورها، اعتماد اندکی به عملکرد بازیافت رسمی وجود دارد و ترجیح داده می‌شود تجهیزات فرسوده در انبارها یا پشت‌بام‌ها رها شوند.

چالش‌های فناوری‌های نوظهور و تنوع طراحی

پیشرفت‌های سریع در فناوری‌های PV موجب تولید انواع مختلفی از پنل‌ها با ترکیبات و معماری‌های متفاوت شده‌است (مانند پنل‌های پرک‌سلولی، نازک‌لایه یا پرووسکایتی). این تنوع طراحی، فرآیند یکپارچه‌سازی روش‌های بازیافت را دشوار می‌سازد، چرا که هر نوع پنل نیازمند روش جداسازی خاص خود است. به‌علاوه، بسیاری از این فناوری‌های نوظهور هنوز فاقد داده‌های کافی درباره دوام، زیست‌پذیری و رفتار محیط‌زیستی در پایان عمر هستند. نبود این داده‌ها، پیش‌بینی چرخه زندگی و مدیریت بلندمدت آن‌ها را برای سیاست‌گذاران و متخصصان محیط‌زیست دشوار می‌کند. در نتیجه، رفع این چالش‌ها نیازمند طراحی سیاست‌های ترکیبی، سرمایه‌گذاری در پژوهش و فناوری‌های بازیافت، تقویت همکاری بین‌المللی و توسعه آموزش و فرهنگ‌سازی در همه سطوح است.

فرصت‌ها و راهکارهای پیشنهادی برای بهبود مدیریت پسماند پنل‌های خورشیدی

با وجود چالش‌های پیچیده در حوزه مدیریت پسماند فتوولتائیک، همزمان فرصت‌های قابل توجهی نیز برای بهبود وضعیت فعلی و حرکت به سوی توسعه پایدار وجود دارد. بهره‌گیری از این فرصت‌ها نیازمند رویکردهای سیستمی، ترکیبی و آینده‌نگرانه است. در این بخش، مهم‌ترین راهکارهای بهبود و فرصت‌های کلیدی به تفصیل بررسی می‌شوند:

ارتقاء مدل اقتصاد چرخشی در مدیریت پسماند PV

مفهوم اقتصاد چرخشی، جایگزین مدل خطی سنتی (تولید-مصرف-دفع) شده و بر حفظ ارزش مواد در چرخه تولید تأکید دارد. در زمینه پنل‌های خورشیدی، این مدل می‌تواند از طریق طراحی برای بازیافت، استفاده مجدد از اجزاء سالم و بازیابی ارزش افزوده از مواد، به کاهش اتلاف منابع کمک کند. نمونه‌هایی مانند طرح Circular PV Alliance در اتحادیه اروپا یا پروژه PV CYCLE، نشان داده‌اند که با طراحی چرخه‌های بسته برای تجهیزات PV می‌توان به صرفه‌جویی اقتصادی، کاهش انتشار و ایجاد اشتغال در صنایع بازیافتی دست یافت (Wambach et al., 2024).

پیاده‌سازی مدل مسئولیت توسعه‌یافته تولیدکننده

مدل EPR یکی از مؤثرترین ابزارهای سیاستی برای مدیریت پسماند تجهیزات الکترونیکی است. در این مدل، تولیدکننده موظف می‌شود تا پایان عمر محصول، مسئول جمع‌آوری، پردازش و بازیافت آن باشد. تجربه موفق پیاده‌سازی EPR در کشورهای اروپایی مانند آلمان و فرانسه، نشان می‌دهد که الزام قانونی به تولیدکننده موجب افزایش کیفیت طراحی (برای بازیافت‌پذیری) و همچنین توسعه زیرساخت‌های جمع‌آوری و بازیافت می‌شود (Khakpour et al., 2025). اجرای این مدل در کشورهای دیگر، مستلزم تصویب قوانین مشخص، ایجاد بانک اطلاعاتی جامع و هماهنگی میان نهادهای مرتبط است.

یکی از راهکارهای کلیدی برای غلبه بر چالش‌های فنی، سرمایه‌گذاری در توسعه فناوری‌های بومی و متناسب با انواع پنل‌های موجود در هر کشور است. استفاده از روش‌های مکانیکی (خردایش و جداسازی)، حرارتی (پیرولیز، ذوب) و شیمیایی (لیچینگ، شست‌وشو با اسید) باید بهینه شده و متناسب با نیاز و ظرفیت کشورها طراحی شود (Piedrahita et al., 2025). همچنین، بهره‌گیری از نانوفناوری و هوش مصنوعی در جداسازی هوشمند اجزاء یا پایش خودکار کیفیت مواد بازیافتی، می‌تواند به کارآمدی فرآیند بازیافت کمک کند.

ایجاد مشوق‌های اقتصادی و بازار ثانویه مواد

برای افزایش مشارکت بخش خصوصی و مصرف‌کنندگان، لازم است بسته‌های تشویقی اقتصادی طراحی شوند؛ از جمله یارانه برای فناوری‌های بازیافت، معافیت مالیاتی برای سرمایه‌گذاری در مراکز بازیافت، یا پرداخت‌های بازگشت مالی^۱ برای مصرف‌کنندگانی که پنل‌های مستعمل را تحویل مراکز مجاز می‌دهند. همچنین، ایجاد بازار رسمی برای مواد بازیافتی، قیمت‌گذاری شفاف، و اتصال زنجیره‌های تأمین بازیافتی می‌تواند به ارتقای اقتصادی این حوزه کمک کند (Babaei & Nasr Esfahani, 2024).

ارتقاء طراحی اولیه پنل‌ها برای بازیافت‌پذیری

یکی از راهکارهای کلیدی در سطح تولید، اصلاح طراحی اولیه پنل‌ها با درنظر گرفتن اصول بازیافت‌پذیری است. این شامل استفاده از اتصالات بازشدنی، اجتناب از ترکیب مواد ناسازگار، استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر یا استانداردسازی ساختار ماژول‌ها می‌شود. تولیدکنندگانی که این رویکرد را در طراحی لحاظ می‌کنند، در آینده مزیت رقابتی بالاتری در بازارهای پایدار خواهند داشت.

^۱ Refund Systems

توسعه نظام‌های نظارت، پایش و ردیابی

ایجاد پایگاه‌های داده ملی و منطقه‌ای برای ردیابی پنل‌ها از مرحله نصب تا پایان عمر، موجب افزایش شفافیت، مدیریت بهتر منابع و امکان سیاست‌گذاری دقیق‌تر خواهد شد. استفاده از بارکد، QR یا سامانه‌های دیجیتال برای رهگیری تجهیزات، از جمله اقدامات مؤثر در این راستا است.

همکاری بین‌المللی و انتقال دانش

باتوجه به ماهیت جهانی زنجیره تأمین تجهیزات PV، همکاری‌های بین‌المللی در انتقال فناوری، تدوین استانداردهای جهانی، و توسعه کنسرسیوم‌های مشترک (مانند IEA-PVPS یا Solar Waste Partnership) می‌تواند از تکرار تجربیات شکست‌خورده جلوگیری کرده و بهره‌وری جهانی را افزایش دهد.

آموزش و فرهنگ‌سازی

توسعه آگاهی عمومی در مورد مزایای بازیافت، مخاطرات دفن غیرمجاز و نحوه صحیح تحویل تجهیزات، نقش مهمی در ارتقای مشارکت داوطلبانه مردم دارد. این امر می‌تواند از طریق رسانه‌ها، آموزش‌های رسمی، برنامه‌های مدارس و کمپین‌های عمومی تحقق یابد.

مدل پیشنهادی برای مدیریت پسماند PV در ایران

تحلیل وضعیت موجود در ایران

در سال‌های اخیر، ایران با سیاست‌های گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه نیروگاه‌های خورشیدی کوچک‌مقیاس و خانگی، رشد چشم‌گیری در ظرفیت نصب‌شده فتوولتائیک تجربه کرده‌است. طبق گزارش شرکت مادر تخصصی توانیر، تا پایان سال ۱۴۰۲ بیش از ۵۰۰ مگاوات ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی در کشور نصب شده که بخش قابل‌توجهی از آن‌ها در قالب نیروگاه‌های پشت‌بامی خانگی بودند (Tavanir, 2023). این روند، هرچند امیدبخش است، اما منجر به شکل‌گیری نسل جدیدی از پسماندها خواهد شد که مدیریت آن‌ها تاکنون در کشور مورد توجه سیاست‌گذاران قرار نگرفته‌است.

در حال حاضر، نه‌تنها قانونی برای مدیریت پایان عمر تجهیزات فتوولتائیک در ایران وجود ندارد، بلکه هیچ نهادی نیز به‌طور مستقیم مسئول نظارت بر جمع‌آوری، پایش یا بازیافت این پسماندها نیست. این خلأ نهادی موجب شده بسیاری از پنل‌های معیوب یا مستعمل، در انبارها، حیاط‌ها یا طبیعت رها شوند. بر اساس پژوهش بابایی و نصر اصفهانی (۲۰۲۴)، اغلب شرکت‌های نصاب و مصرف‌کنندگان خانگی در ایران، از الزامات محیط‌زیستی مربوط به دفع پنل‌های فرسوده آگاه نیستند و بیشتر پنل‌های معیوب بدون هیچ مسیر بازیافتی به حاشیه رانده می‌شوند.

از منظر حقوقی نیز، برخلاف اتحادیه اروپا که ضوابط سخت‌گیرانه‌ای همچون دستورالعمل WEEE را برای مدیریت تجهیزات الکترونیکی و فتوولتائیک تدوین کرده است، در ایران تاکنون هیچ متن قانونی الزام‌آوری برای اعمال مسئولیت تولیدکننده (EPR) یا فرآیند رسمی بازیافت تدوین نشده‌است (Khakpour et al., 2025). به‌همین دلیل، نه شرکت‌های تولیدکننده داخلی و نه واردکنندگان ماژول‌های خارجی، خود را موظف به جمع‌آوری یا بازیافت پنل‌های پایان عمر نمی‌دانند.

در نهایت، فقدان سامانه ملی ردیابی تجهیزات PV و نبود آمار رسمی از میزان تولید پسماند، مانعی مهم برای برنامه‌ریزی کلان محسوب می‌شود. این وضعیت، ایران را در معرض شکل‌گیری بحران پنهانی از پسماندهای خورشیدی قرار می‌دهد که در آینده‌ای نه‌چندان دور، پیامدهای اقتصادی، بهداشتی و محیط‌زیستی جدی خواهدداشت.

چارچوب نهادی و سیاستی پیشنهادی

یکی از مهم‌ترین پیش‌نیازهای توسعه نظام مدیریت پسماند فتوولتائیک در ایران، ایجاد چارچوب نهادی یکپارچه و تدوین قوانین الزام‌آور برای بازیافت و مسئولیت‌پذیری تولیدکنندگان و واردکنندگان است. تجربه کشورهای موفق نشان

داده که بدون حمایت نهادی قوی و سازوکارهای نظارتی کارآمد، هیچ سیاستی در زمینه بازیافت پسماندهای خورشیدی به مرحله اجرا نمی‌رسد.

در ایران، مدیریت پسماندهای خاص به صورت پراکنده در حیطه مسئولیت دستگاه‌هایی مانند سازمان حفاظت محیط‌زیست، شهرداری‌ها، گمرک، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر (ساتبا) و وزارت صنعت قرار دارد، اما هیچ نهاد هماهنگ‌کننده‌ای برای مدیریت یکپارچه پسماندهای فتوولتائیک وجود ندارد (Mohebbi, 2026). در این راستا، پیشنهاد می‌شود نهاد ملی بازیافت تجهیزات انرژی تجدیدپذیر با ساختاری مستقل یا وابسته به سازمان محیط‌زیست تأسیس گردد. این نهاد وظیفه خواهد داشت تا سیاست‌گذاری، پایش و نظارت بر فرآیند جمع‌آوری، تفکیک و بازیافت پنل‌ها را به صورت شفاف و متمرکز انجام دهد.

از منظر سیاستی، ضروری است اصل مسئولیت توسعه‌یافته تولیدکننده به عنوان رکن اصلی قانون‌گذاری این حوزه در کشور تصویب شود. در قالب این مدل، کلیه واردکنندگان، تولیدکنندگان داخلی و توزیع‌کنندگان پنل‌های PV موظف می‌شوند هزینه جمع‌آوری، بازیافت و ردیابی تجهیزات پایان عمر را از پیش پرداخت کرده یا در یک سامانه مشارکت مالی داشته باشند (Khakpour et al., 2025). این مدل در کشورهای اروپایی با موفقیت اجرا شده و موجب رشد صنعت بازیافت، کاهش دفن غیرمجاز، و ایجاد زنجیره ارزش ثانویه شده است (Chowdhury et al., 2022).

همچنین، لازم است آیین‌نامه‌هایی جامع و کاربردی توسط نهاد ملی جدید تدوین گردد که شامل موارد زیر باشد: ثبت اطلاعات همه تجهیزات وارداتی و داخلی در سامانه ردیابی دیجیتال، تعیین عمر مفید، زمان تحویل، و محل تحویل پنل‌های مستعمل، الزام به برچسب‌گذاری محیط‌زیستی روی پنل‌ها با QR Code برای ردیابی، ممنوعیت دفن بدون مجوز یا صادرات غیررسمی تجهیزات فرسوده و تشویق به تولید پنل‌های قابل بازیافت با ارائه تسهیلات یا معافیت مالیاتی در نهایت، موفقیت چارچوب نهادی پیشنهادی در گرو همکاری منسجم بین بخش عمومی، بخش خصوصی، نهادهای محلی و نهادهای دانشگاهی خواهد بود. این چارچوب باید به گونه‌ای طراحی شود که علاوه بر رعایت اصول محیط‌زیستی، مشوقی برای توسعه فناوری‌های داخلی و اشتغال‌زایی در حوزه بازیافت نیز باشد.

مدل فنی و اقتصادی بازیافت پیشنهادی

باتوجه به شرایط خاص ایران، از جمله سطح فناوری، ظرفیت صنعتی، محدودیت‌های مالی و نیازهای محیط‌زیستی، طراحی یک الگوی بومی بازیافت پنل‌های خورشیدی ضروری است. الگویی که هم قابلیت اجرایی داشته باشد و هم از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر باشد. در این بخش، مدل پیشنهادی بازیافت براساس ترکیب فناوری‌های مختلف، ساختار منطقه‌ای و زنجیره ارزش اقتصادی ارائه می‌شود.

انتخاب فناوری‌های متناسب با ظرفیت داخلی

با بررسی تجربیات جهانی، سه فناوری اصلی در بازیافت ماژول‌های PV شناسایی شدند:

- فرآیندهای مکانیکی: شامل خردایش، جداسازی فیزیکی اجزاء (شیشه، فریم آلومینیومی، جعبه اتصال) با هزینه نسبتاً پایین و سازگار با ظرفیت صنعتی موجود در ایران.
- فرآیندهای حرارتی^۱: برای حذف لایه‌های پلیمری و جداسازی سلول‌های سیلیکونی، نیازمند کوره‌های کنترل شده است.
- فرآیندهای شیمیایی^۲: به منظور استخراج فلزاتی مانند نقره، مس و سرب. این روش دقت بالا دارد اما نیازمند مدیریت پسماند خطرناک و کنترل آلاینده‌گی است (Sánchez et al., 2024; Chowdhury et al., 2026).

ترکیب این سه روش به صورت مرحله‌ای، می‌تواند یک راه‌حل بهینه برای ایران باشد. به‌ویژه اگر اولویت با بازیابی سیلیکون و شیشه با خلوص بالا باشد.

^۱ Thermal/Pyrolysis

^۲ Chemical/Leaching

طراحی مراکز منطقه‌ای بازیافت

پیشنهاد می‌شود مراکز بازیافت با اولویت در استان‌هایی تأسیس شوند که بیشترین ظرفیت نصب پنل‌های خورشیدی را دارند، مانند:

۱. کرمان و یزد (به دلیل پتانسیل تابش بالا)
 ۲. تهران و البرز (به خاطر تمرکز شرکت‌های تولید و نصب)
 ۳. فارس و خراسان جنوبی (دارای پروژه‌های مقیاس بزرگ)
- هر مرکز می‌تواند بر اساس مدل PPP مشارکت دولتی-خصوصی با سرمایه‌گذاری مشترک بین دولت، شرکت‌های بازیافت و بخش خصوصی اجرا شود. تجهیزات پایه‌ای شامل خطوط خردایش، جداساز مغناطیسی، سیستم‌های حرارتی و واحد استخراج شیمیایی خواهد بود.

تحلیل اقتصادی زنجیره ارزش بازیافت

از منظر اقتصادی، اجزای پنل‌های خورشیدی ارزش بالقوه‌ای دارند:

- شیشه (بیش از ۷۰ درصد وزن ماژول): قابل بازیابی با کیفیت بالا
 - آلومینیوم فریم: ارزش‌افزوده صنعتی و بازیافت آسان
 - نقره و مس: قیمت بالا و تقاضای زیاد در بازار
 - سیلیکون: اگر خالص بازیابی شود، در صنایع نیمه‌هادی قابل استفاده است (Heath et al., 2020).
- براساس گزارش IRENA & ITU (2023)، هر تن پنل خورشیدی ممکن است تا ۲۵۰ دلار ارزش بازیافتی بالقوه داشته‌باشد، در صورتی‌که فرآیند بازیافت بهینه و تجاری باشد. با تعریف نظام حمایتی (یارانه، معافیت گمرکی تجهیزات بازیافت، خرید تضمینی مواد بازیافتی)، این زنجیره می‌تواند برای ایران سودآور باشد و حتی اشتغال محلی ایجاد کند.

نقش ذی‌نفعان، مشارکت مردمی و فرهنگ‌سازی

یکی از عناصر کلیدی موفقیت در مدیریت پایدار پسماند پنل‌های خورشیدی، مشارکت فعال همه ذی‌نفعان از مرحله تولید تا پایان عمر ماژول‌ها است (Suffian, 2026). بدون درگیرسازی مؤثر تولیدکنندگان، نهادهای دولتی، شهرداری‌ها، شرکت‌های نصب، مراکز بازیافت و مهم‌تر از همه، شهروندان، هیچ سیاستی در حوزه بازیافت PV به نتیجه نخواهد رسید.

نقش دولت‌ها و سیاست‌گذاران

دولت، به عنوان تنظیم‌گر اصلی، وظیفه دارد با وضع قوانین الزام‌آور نظیر مدل مسئولیت تولیدکننده، تولیدکنندگان و واردکنندگان را ملزم به جمع‌آوری و بازیافت محصولات خود پس از پایان عمر کند. همچنین، طراحی نظام مشوق‌ها (مانند معافیت مالیاتی برای شرکت‌های بازیافتی، یارانه برای مصرف‌کنندگان پنل‌های قابل بازیافت، یا تسهیلات خرید تجهیزات) از ابزارهای مهم برای ارتقای مشارکت بازار است (Khakpour et al., 2025).

نقش شهرداری‌ها و نهادهای محلی

شهرداری‌ها به دلیل نزدیکی به مردم، می‌توانند در خط مقدم جمع‌آوری و سامان‌دهی پنل‌های خورشیدی فرسوده عمل کنند (Ramezani et al., 2025). ایجاد ایستگاه‌های تحویل پنل فرسوده در نواحی شهری، همکاری با شرکت‌های نصب برای شناسایی مصرف‌کنندگان قدیمی، و اتصال به سامانه‌های پایش ملی، از جمله نقش‌های شهرداری در این سیستم خواهد بود.

نقش شرکت‌های خصوصی و استارت‌آپ‌ها

بخش خصوصی می‌تواند از طریق نوآوری در فناوری‌های بازیافت، طراحی مجدد ماژول‌های قابل جداسازی و ایجاد پلتفرم‌های دیجیتال برای ردیابی پنل‌ها، سهم چشم‌گیری در توسعه این صنعت ایفا کند. استارت‌آپ‌هایی که با هوش مصنوعی، بلاک چین یا اپلیکیشن‌های ردیابی تجهیزات کار می‌کنند، می‌توانند پل ارتباطی میان مصرف‌کننده و مراکز بازیافت باشند (Sánchez et al., 2024; Jiang & Bateer, 2025).

نقش نهادهای آموزشی، رسانه‌ها و سازمان‌های مردم‌نهاد

یکی از مهم‌ترین خلأهای موجود، ضعف آگاهی عمومی درباره خطرات محیط‌زیستی پسماند پنل‌ها و اهمیت بازیافت آن‌هاست. تدوین محتوای آموزشی برای مدارس، برگزاری کارگاه در جوامع محلی، تولید برنامه‌های تلویزیونی و رسانه‌ای، و استفاده از شبکه‌های اجتماعی، همگی ابزارهایی برای ارتقای فرهنگ عمومی در این زمینه هستند (Prasad et al., 2025; Babaei & Nasr Esfahani, 2024). همچنین، همکاری با سمن‌های محیط‌زیستی می‌تواند منجر به مطالبه‌گری مردمی در جهت تدوین سیاست‌های مسئولانه‌تر شود.

نقش شهروندان و مصرف‌کنندگان نهایی

در نهایت، رفتار مصرف‌کنندگان نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت سیستم بازیافت دارد. آموزش نحوه تفکیک پنل فرسوده، ثبت در سامانه آنلاین بازیافت و تحویل به مراکز مجاز باید به‌عنوان مسئولیت اجتماعی هر کاربر شناخته‌شود. ارائه مشوق‌هایی مانند تخفیف در نصب پنل جدید یا دریافت گواهی «مصرف‌کننده سبز» می‌تواند مشارکت داوطلبانه را افزایش دهد (Chowdhury et al., 2022; IRENA & ITU, 2023; Babaei & Nasr Esfahani, 2024).

نتیجه‌گیری

رشد سریع نصب سیستم‌های فتوولتائیک در دهه‌های اخیر، به‌ویژه در راستای سیاست‌های جهانی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و عبور از سوخت‌های فسیلی، موجب افزایش حجم قابل توجهی از پنل‌های خورشیدی در مدار مصرف شده‌است. با رسیدن این پنل‌ها به پایان عمر مفید خود (معمولاً در بازه ۲۵ تا ۳۰ سال)، مدیریت اصولی پسماند حاصل از آن‌ها به‌عنوان یک چالش پیچیده و چندبعدی مطرح شده‌است. پسماند پنل‌های PV شامل مواد باارزش مانند نقره، سیلیکون، آلومینیوم و شیشه و در عین حال مواد خطرناک مانند سرب یا کادمیوم است که در صورت رهاسازی یا دفع نادرست می‌تواند منجر به آلودگی‌های جدی آب، خاک و سلامت انسان شود.

این مقاله با مروری جامع بر ادبیات علمی و تجربیات جهانی، نشان داد که چالش‌های موجود در مدیریت پسماند PV را می‌توان در پنج دسته عمده خلاصه کرد: چالش‌های فنی (مانند تنوع فناوری پنل‌ها و دشواری جداسازی اجزا)، اقتصادی (هزینه‌بر بودن بازیافت نسبت به ارزش مواد بازیافتی)، نهادی و قانونی (فقدان مقررات الزام‌آور و ناهماهنگی بین‌نهادی)، فرهنگی و آگاهی عمومی (نبود فرهنگ بازگردانی و تحویل پنل‌های فرسوده) و در نهایت، تنوع فناوری‌های نوظهور که آینده بازیافت را پیچیده‌تر کردند. همچنین تحلیل‌های انجام‌شده حاکی از آن است که فرصت‌هایی همچون توسعه فناوری‌های بازیافت سبز، بازطراحی پنل‌ها بر مبنای بازیافت‌پذیری، تقویت نظام EPR، ایجاد پایگاه داده ملی و مشارکت فعال بخش خصوصی می‌تواند مسیر گذار به اقتصاد چرخشی در صنعت خورشیدی را هموار سازد.

در این میان، وضعیت ایران نیز مورد توجه قرار گرفت. اگرچه کشور ما در سال‌های اخیر گام‌هایی برای توسعه انرژی خورشیدی برداشته‌است، اما هنوز فاقد سیاست‌های رسمی برای مدیریت پایان عمر این پنل‌ها است. نبود سامانه‌های جمع‌آوری، دفن غیرمجاز و بی‌اطلاعی مصرف‌کنندگان از اهمیت تحویل پنل‌های فرسوده، مهم‌ترین چالش‌های جاری در کشور هستند. از سوی دیگر، ظرفیت بالقوه خوبی برای توسعه زیرساخت‌های بازیافت، تشکیل نهاد هماهنگ‌کننده،

استفاده از روش‌های بومی‌شده بازیافت (مکانیکی، حرارتی و شیمیایی) و راه‌اندازی کمپین‌های آگاه‌سازی مردمی وجود دارد که در صورت طراحی مدل ملی یکپارچه، می‌تواند به شکل‌گیری صنعت بازیافت پنل‌های خورشیدی منجر شود. نتیجه‌گیری کلیدی مقاله آن است که مدیریت پسماند پنل‌های فتوولتائیک، نه یک چالش صرفاً محیط‌زیستی، بلکه یک مسئله راهبردی برای توسعه پایدار است که در آن سیاست‌گذاری هوشمند، نوآوری فناورانه، همکاری بین‌نهادی، مشارکت مردمی و فرهنگ‌سازی نقش محوری دارند. اگر کشورهایی مانند ایران بتوانند در زمان مناسب نسبت به این مسئله واکنش نشان دهند و مدل‌های جهانی را به‌درستی بومی‌سازی کنند، نه تنها از تهدیدات محیط‌زیستی آینده جلوگیری خواهند کرد، بلکه فرصت‌های نوینی در حوزه اقتصاد سبز، اشتغال و بهره‌وری منابع برای‌شان فراهم خواهد شد.

References

- Askari Shayegan, M., et al. (2024). Solar Photovoltaics Value Chain and End-of-Life Management Practices: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 16(16), 7038. <https://doi.org/10.3390/su16167038>
- Babaei, A., & Nasr Esfahani, A. (2024). A review of photovoltaic waste management from a sustainable perspective. *Electricity*, 5(4), Article 36. <https://doi.org/10.3390/electricity5040036>
- Billewar, S. R., Londhe, G., & Mane, P. S. (2023). World energy demand. *Integrated Green Energy Solutions Volume 2*, 275-316. <https://doi.org/10.1002/9781394193738.ch36>
- Celep, O., Deveci, H., & Yazici, E. Y. (2025). A comprehensive review on recycling end-of-life solar photovoltaic panels. *Waste Management*, 206, 115092. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.115092>
- Chowdhury, H., Chang, N. L., Song, S., Xie, Z., Zuo, J., & Shen, Y. (2026). Life cycle assessment and techno-economic analysis of a laser-based end-of-life solar panel recycling process. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 302, 114358. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2026.114358>
- Chowdhury, M. S., Sumita, U., Islam, A., & Bedja, I. (2022). Sustainable solutions for end-of-life photovoltaic waste: A global review of policies, practices and progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112322>
- Das, H. J., & Sarmah, N. (2025). Photovoltaic module recycling: A review on material recovery methods and waste management approach. *Solar Energy*, 286, 113708. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113708>
- Gerold, E., & Antrekowitsch, H. (2024). Advancements and Challenges in Photovoltaic Cell Recycling: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 16(6), 2542. <https://doi.org/10.3390/su16062542>
- Heath, G. A., Silverman, T. J., Kempe, M., et al. (2020). Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy. *Nature Energy*, 5, 502–510. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0645-2>
- International Energy Agency (IEA). (2024). *World Energy Outlook 2024*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- International Energy Agency. (2023). *Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028*.
- International Renewable Energy Agency, & International Telecommunication Union. (2023). *End-of-life management of solar photovoltaic panels: Circular economy perspectives*.
- Jiang, X., & Bateer, B. (2025). A systematic review of plastic recycling: technology, environmental impact and economic evaluation. *Waste Management & Research*, 43(8), 1159-1178. <https://doi.org/10.1177/0734242X241310658>
- Khakpour, S., Akbari, M., & Ferrara, C. (2025). The solar waste challenge: Estimating and managing end-of-life photovoltaic panels in Italy. *Energies*, 18(9), 2219. <https://doi.org/10.3390/en18092219>
- Mohebbi, H. (2026). Comprehensive Assessment of Solar Cell Technology Localization in Iran: Challenges and Development Strategies. *Advances in Sustainable Energies and Environment*, 1(02), 33-45. <https://doi.org/10.22034/a-see.2026.2075408.1017>
- Piedrahita, D., Cárdenas, J., & Zapata, M. (2025). Solar panel waste management: Challenges, opportunities, and the path to a circular economy. *Energies*, 18(1), 123. <https://doi.org/10.3390/en18010123>

Ramezani, N., Tamošaitienė, J., Sarvari, H., & Golestanizadeh, M. (2025). Determining essential indicators for feasibility assessment of using initiative green building methods in revitalization of worn-out urban fabrics. *Sustainability*, 17(8), 3389. <https://doi.org/10.3390/su17083389>

Prasad, R. D., Chand, D. A., Lata, S. S., & Kumar, R. S. (2025). Beyond energy access: how renewable energy fosters resilience in island communities. *Resources*, 14(2), 20. <https://doi.org/10.3390/resources14020020>

Sánchez, A., Müller, T., & Kim, J. (2024). From waste to resource: Exploring the current challenges and recovery techniques in PV module recycling. *Journal of Cleaner Production*, 435, 140022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140022>

Sandanayake, M., Li, L., Zhao, J., & Joseph, P. (2022). Applications of solar panel waste in pavement construction—an overview. *Sustainability*, 14(22), 14823. <https://doi.org/10.3390/su142214823>

Suffian, H. M. (2026). Stakeholder management in project management: a context-sensitive framework for solar energy projects (Doctoral dissertation, Vilniaus universitetas.).

Tavanir. (2023). Gozaresh-e tose'e-ye nirugah-haye khorshidi-ye khanegi dar Iran [Report on the development of residential solar power plants in Iran]. Tavanir Holding Company.

Tripathi, A. K., Aruna, M., Thandlam, A. K., Sharma, S., Jhalani, A., & Kumar, R. (2026). Recovery strategies for EoL solar panels: sustainable and circular economy practices. *Green Materials*, 14(2), 165-174. <https://doi.org/10.1680/jgrma.24.00153>

Wambach, K., Libby, H., & Shaw, R. (2024). Advances in photovoltaic module recycling: Literature review and update to LCI data (IEA-PVPS Task 12 Report). IEA Photovoltaic Power Systems Programme.

Wei, G., Zhou, Y., Hou, Z., Li, Y., Liu, Q., Chen, J., & He, D. (2025). Review of c-Si PV module recycling and industrial feasibility. *EES Solar*, 1, 9–29. <https://doi.org/10.1039/D4EL00017J>



Investigating the Role of Latent Variables and Species Interactions in Joint Species Distribution Modeling of Fish Species in Rivers of the Southern Caspian Sea Basin

Mohammad Hajipour Mohammadabad^{a*}, Hossein Mostafavi^a, Khosro Piri^a, Asghar Abdoli^a

^aDepartment of Biodiversity and Ecosystem Management, Institute of Environmental Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

*Corresponding author: mohammad.hajipour.ir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8894-7498>

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 2026/01/30
Received in revised form:
2026/02/19
Accepted 2026/02/30
Available online: 2026/03/06

Keywords:
Ecological interactions,
Species co-distribution,
Riverine Fish,
Latent Variables.

ABSTRACT

Understanding the factors governing species distributions is fundamental to freshwater ecology and biodiversity conservation. Conventional Species Distribution Models (SDMs) primarily explain species occurrences using environmental variables but generally overlook interspecific interactions and unmeasured ecological processes. Joint Species Distribution Models (JSDMs) overcome this limitation by simultaneously modeling multiple species and incorporating latent variables to capture residual species associations. This study represents the first application of a latent-variable JSDM to freshwater fish communities in Iranian inland waters, aiming to evaluate the combined effects of environmental drivers and hidden ecological interactions on fish assemblages in the western and central ecoregions of the southern Caspian Sea basin. Fish occurrence data for 22 species were collected from 175 randomly selected passable river sites using standardized electrofishing protocols. Environmental predictors included climatic, topographic, hydrological, and land-use variables. After multicollinearity assessment, ten predictors were retained for modeling. A multivariate probit JSDM with latent variables was implemented using the JSDM package in R. Results demonstrated that temperature and annual precipitation were the dominant environmental determinants of fish distributions, while watershed characteristics and human land use further influenced species occurrence. Residual correlation matrices revealed substantial positive and negative species associations that were not explained by measured environmental variables, indicating potential habitat sharing, ecological similarity, competition, and the influence of invasive species. Positive associations were observed between *Salmo trutta* and *Oncorhynchus mykiss*, whereas several native species showed negative correlations with invasive taxa. These findings demonstrate that incorporating latent variables substantially improves community-level distribution modeling by accounting for hidden ecological processes. The proposed framework provides a robust scientific basis for river restoration, invasive species management, biodiversity conservation, and ecosystem-based freshwater management under ongoing environmental and climatic change.

Cite this article: Hajipourmohammadabad, M., Mostafavi, H., Piri, K., & Abdoli, A. (2026). Investigating the Role of Latent Variables and Species Interactions in Joint Species Distribution Modeling of Fish Species in Rivers of the Southern Caspian Sea Basin. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 1(1), 79-97. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252595>



© The Author(s).

Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252595>

Introduction

Understanding how biological communities respond to environmental variation remains one of the principal challenges in ecology. Species distributions are determined not only by abiotic conditions but also by complex ecological interactions, including competition, facilitation, habitat sharing, and other biotic processes operating across multiple spatial scales. Predicting these relationships is particularly important in freshwater ecosystems, where habitat fragmentation, climate change, invasive species, and increasing anthropogenic pressures continuously reshape community composition.

Species Distribution Models (SDMs) have become essential tools for predicting species occurrence and identifying suitable habitats. However, conventional SDMs generally assume ecological independence among species and therefore neglect biotic interactions that substantially influence community assembly. This limitation may reduce predictive accuracy and hinder conservation planning, especially in highly diverse freshwater ecosystems. Recent developments in community ecology have led to the emergence of Joint Species Distribution Models (JSDMs), which simultaneously model multiple species while incorporating both environmental responses and residual species associations. Through latent-variable approaches, JSDMs can identify hidden ecological gradients and unexplained covariance among species, providing a more realistic representation of ecological communities.

Despite their growing international application, JSDMs have not previously been implemented for freshwater fish assemblages in Iran. Consequently, little is known about how environmental filtering and latent ecological processes jointly shape fish communities in the southern Caspian Sea basin. This study addresses this knowledge gap by applying a latent-variable JSDM to investigate fish assemblages across the western and central Caspian ecoregions. Specifically, the study aims to (i) quantify the effects of environmental variables on species distributions, (ii) identify residual species associations that may indicate ecological interactions, and (iii) evaluate the usefulness of latent-variable JSDMs for supporting biodiversity conservation and river ecosystem management. The findings are intended to assist freshwater ecologists, conservation biologists, fisheries managers, and environmental decision-makers seeking community-based approaches to ecosystem conservation.

Method

This research employed an observational ecological design based on species occurrence data collected from natural river systems within the western and central ecoregions of the southern Caspian Sea basin. A total of 175 randomly selected passable river reaches were surveyed during the autumn season using standardized electrofishing procedures recommended by the European Committee for Standardization (CEN). Sampling reaches covered multiple habitat types to ensure representative assessment of local fish assemblages. All captured individuals were identified to species level and released after sampling.

The dataset included 22 freshwater fish species, representing endemic, native, and non-native taxa. Environmental predictors were compiled from the WorldClim database together with GIS-derived topographic, hydrological, and land-use variables. Initially, nineteen bioclimatic variables were extracted; following Pearson correlation analysis and ecological expert evaluation, ten variables were retained to minimize multicollinearity. These included annual mean temperature, minimum temperature of the coldest month, maximum temperature of the warmest month, annual temperature range, annual precipitation, watershed slope, upstream drainage area, river segment length, agricultural land area, and urban land area.

Species occurrence data were analyzed using the JSDM package in R (version 4.4) within a multivariate probit framework. Latent variables were incorporated to account for unexplained covariance among species after controlling for measured environmental predictors. Residual

correlation matrices were subsequently interpreted to identify potential ecological interactions, shared habitat preferences, competitive exclusion, and hidden environmental influences affecting fish community assembly.

Results

The latent-variable Joint Species Distribution Model (JSDM) provided a comprehensive assessment of the environmental and ecological factors structuring freshwater fish assemblages across the western and central ecoregions of the southern Caspian Sea basin.

Among the environmental predictors, climatic variables emerged as the dominant determinants of species occurrence. Temperature-related variables, including annual mean temperature, minimum temperature of the coldest month, maximum temperature of the warmest month, and annual temperature range, exerted the strongest influence on the spatial distribution of most species. These variables were particularly important in distinguishing cold-water species from warm-water assemblages, highlighting the sensitivity of freshwater fish communities to thermal gradients. Annual precipitation also contributed substantially to species occurrence by influencing stream flow, habitat availability, and hydrological connectivity throughout the river network. Together, these climatic variables explained a considerable proportion of the observed variation in species distributions, confirming their fundamental role in shaping riverine fish communities.

Despite the strong explanatory power of the measured environmental variables, the latent-variable JSDM identified substantial residual correlations among species after accounting for abiotic effects. These residual associations indicate that additional ecological processes, including species interactions and unmeasured environmental factors, contribute significantly to community assembly. Positive residual correlations generally reflected shared habitat preferences, similar ecological requirements, or potential facilitative relationships. For example, *Salmo trutta* and *Oncorhynchus mykiss* exhibited one of the strongest positive associations, suggesting a high degree of habitat overlap associated with cold, well-oxygenated mountain streams. Similarly, *Squalius turcicus* and *Squalius berak* showed consistent positive correlations, indicating comparable ecological niches and co-occurrence within similar river habitats. Additional positive associations observed among species such as *Capoeta razi*, *Sabanejewia aurata*, and several benthic taxa further support the existence of habitat-sharing patterns within the study area.

Conversely, the model revealed several pronounced negative residual correlations that likely reflect competitive interactions, ecological segregation, or the influence of invasive species. Strong negative associations involving *Carassius auratus*, *Pseudorasbora parva*, and multiple native species suggest that invasive fishes may compete with indigenous taxa for habitat and food resources or indirectly modify community structure. Negative relationships were also detected between *Rhodeus amarus* and *Pseudorasbora parva*, as well as between *Oncorhynchus mykiss* and *Neogobius melanostomus*, indicating potential ecological incompatibilities or competitive exclusion. These findings are consistent with ecological theory predicting that species occupying similar niches may exhibit negative co-occurrence patterns when resources become limiting.

The residual correlation matrix further demonstrated that not all unexplained associations necessarily represent direct biological interactions. Instead, some residual covariance may reflect unmeasured environmental drivers, such as microhabitat characteristics, substrate composition, localized water quality, riparian vegetation, or other fine-scale ecological processes that were not explicitly incorporated into the model. Consequently, the latent-variable framework captures both hidden environmental heterogeneity and potential biotic interactions,

providing a more realistic representation of community structure than conventional single-species models.

Collectively, these results demonstrate that integrating latent variables into Joint Species Distribution Models substantially improves the interpretation of freshwater fish assemblages by simultaneously quantifying environmental filtering and species co-occurrence patterns. The findings emphasize that accurate prediction of fish distributions requires consideration of both abiotic drivers and hidden ecological processes, thereby providing a stronger scientific foundation for biodiversity conservation, river restoration, invasive species management, and ecosystem-based freshwater planning in the southern Caspian Sea basin.

Conclusions

This study provides the first application of latent-variable Joint Species Distribution Models to freshwater fish communities in Iran and demonstrates their considerable advantages over conventional single-species distribution models. The results indicate that fish assemblages are jointly structured by environmental filtering and hidden ecological interactions, emphasizing that community-level modeling provides a more realistic understanding of biodiversity patterns than independent species analyses.

The findings have important implications for river restoration, freshwater biodiversity conservation, invasive species management, and ecosystem-based environmental planning. By simultaneously accounting for environmental drivers and species associations, latent-variable JSDMs improve ecological prediction and provide valuable guidance for prioritizing conservation actions under climate change and increasing anthropogenic pressure. Future studies should integrate additional environmental variables, long-term monitoring data, and functional or phylogenetic information to further refine predictions of freshwater community dynamics and strengthen evidence-based management strategies for the southern Caspian Sea basin.



بررسی نقش متغیرهای پنهان و تعاملات گونه‌ای در مدل‌سازی پراکنش مشترک گونه‌های ماهی در رودخانه‌های حوضه جنوبی دریای خزر

محمد حاجی‌پور محمدآباد^۱، حسین مصطفوی^{۲*}، خسرو پیری^۳، اصغر عبدلی^۴

^۱گروه تنوع زیستی و مدیریت اکوسیستم‌ها، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

^۲نویسنده مسئول: mohammad.hajipour.ir@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	درک چگونگی تأثیر زیستگاه و شرایط محیطی بر توزیع ماهی‌ها و پیش‌بینی چگونگی واکنش جوامع ماهی به تغییرات محیطی از اهداف اصلی در بوم‌شناسی ماهیان رودخانه‌ای هستند. در رویکردهای کمی که به طور سنتی برای دستیابی به این اهداف مورد استفاده قرار می‌گیرند، عمدتاً تأثیرات تعاملات گونه‌ها (رقابت، شکار، همزیستی و غیره) را بر شکل‌دهی ساختار جامعه نادیده گرفته می‌شوند، که به طور بالقوه منجر به پیش‌بینی‌های با دقت کمتر در مورد توزیع گونه‌ها می‌شود. لذا با توجه به اینکه تا کنون توزیع مشترک گونه‌ها در مورد ماهیان آب‌های داخلی ایران انجام نشده است، تصمیم گرفتیم تا با استفاده از یک مطالعه موردی با حضور ۲۲ گونه در مناطق زیستی مرکزی و غربی حوضه جنوبی دریای خزر، توزیع مشترک گونه‌ها انجام شود. نتایج نشان داد که چگونه مدل‌های توزیع گونه‌های مشترک می‌توانند با کمی کردن هم‌زمان اثرات متغیرهای غیرزیستی و تعاملات گونه‌ها، با استفاده از ماتریس همبستگی باقیمانده مدل متغیرهای پنهان، نتایج قابل قبولی در مورد جفت گونه‌ها ارائه دهد و تعاملات گونه‌ها را در پیش‌بینی پراکنش گونه‌ها دخیل کرده و نسبت به مدل‌هایی که تعاملات گونه‌ها را نادیده می‌گیرند، بهتر پیش‌بینی کنند. همچنین بررسی‌ها نشان دادند که پراکنش ماهیان خزر به شدت تحت تأثیر متغیرهای محیطی (مانند دما و بارش) و رقابت بین گونه‌هاست. این رویکرد می‌تواند شباهت‌ها و تفاوت‌های اکولوژیکی بین گونه‌ها را آشکار کند، که می‌تواند به ما کمک کند از تضاد بین برنامه‌های حفاظت از گونه‌های هدف جلوگیری کنیم. به عنوان مثال همبستگی مثبت بین قزل‌آلای خال قرمز <i>Salmo trutta</i> و قزل‌آلای رنگین کمانی <i>Onchornycus mykiss</i> نشانگر این است که این دو گونه شبیه‌ترین زیستگاه را با هم دارند این تحلیل می‌تواند به مدیران حفاظت منابع آبی در تدوین استراتژی‌های حفاظتی مانند احیای رودخانه‌های منتهی به خزر در حفاظت از گونه‌های بومی و در معرض خطر و کنترل گونه‌های مهاجم کمک کند.

استناد به این مقاله: حاجی پورمحمدآباد، محمد؛ مصطفوی، حسین؛ پیری، خسرو و عبدلی، اصغر. (۱۴۰۴). بررسی نقش متغیرهای پنهان و تعاملات گونه‌ای در مدل‌سازی پراکنش مشترک گونه‌های ماهی در رودخانه‌های حوضه جنوبی دریای خزر. راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم‌های پایدار، ۱(۱)، ۹۷-۷۹.

<https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252595>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252595>

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

درک و پیش‌بینی توزیع گونه‌ها در فضا و زمان یکی از سوالات اصلی در بوم‌شناسی است (Thuiller et al., 2013). به این ترتیب، مدل‌های توزیع گونه‌ها^۱ ابزار ضروری برای بررسی نحوه واکنش گونه‌ها به محیط هستند (Guisan et al., 2017). اصل اساسی در این مورد این است که مشاهدات گونه‌های فردی را به مجموعه‌ای از پیش‌بینی‌کننده‌های محیطی مرتبط کنیم. رابطه تخمین زده شده بین گونه‌ها و محیط اجازه می‌دهد تا جایگاه محیطی گونه را استنتاج کنیم و سپس توزیع آن را برای شرایط محیطی جدید، چه در فضا یا زمان، یا در هر دو پیش‌بینی کنیم (Guisan et al., 2017). در حالی که مدل‌های توزیع گونه‌ها می‌توانند برای مطالعه مجموعه گونه‌ها مورد استفاده قرار گیرند ولی اصولاً آن‌ها برای مدل‌سازی و پیش‌بینی توزیع گونه‌های منفرد به کار می‌روند. برای مدل‌سازی مجموعه‌های گونه‌ها، پیشرفت‌های آماری اخیر به مدل‌های توزیع مشترک گونه‌ها^۲ منجر می‌شود (Pollock et al., 2014). در مدل‌های توزیع گونه‌ها، ضرایب رگرسیون به پاسخ گونه‌ها به متغیر محیطی مربوط می‌شود، در حالی که در مدل‌های توزیع مشترک گونه‌ها همبستگی بین باقیمانده‌ها، وابستگی‌های هر جفت گونه را به صورت مجزا توصیف می‌کند که توسط متغیرهای محیطی استفاده شده، توضیح داده نشده است.

از آنجایی که توزیع مشترک گونه‌ها برای بررسی داده‌های جامعه ایجاد شده‌اند، با پیشرفت‌های روزافزون روش‌های جدید برای ارزیابی جامعه محبوبیت بیشتری پیدا می‌کنند (Karp et al., 2025; Korhonen et al., 2024; Lazagabaster et al., 2024; Stolf & Dunson, 2025; Taberlet et al., 2012). با این حال، کاربرد آنها برای مجموعه داده‌های بزرگ هنوز با محدودیت‌هایی مانند: هزینه‌های محاسباتی و تفسیر ماتریس کوواریانس باقی‌مانده^۳ مواجه است. در واقع، توزیع مشترک گونه‌ها از نظر محاسباتی هزینه‌بر هستند زیرا تعداد پارامترهای تخمین زده شده در ماتریس همبستگی باقیمانده با تعداد گونه‌ها به طور توانی افزایش می‌یابد. چندین رویکرد برای رفع این مشکل وجود دارد. برای توزیع مشترک گونه‌هایی که مبتنی بر مدل پروبیت^۴ چند متغیره هستند، یک راه حل متداول بر کاهش ابعاد از طریق مدل‌های متغیر پنهان^۵ تکیه دارد، که در آن بعد موثر مدل با تقریب رتبه پایین ماتریس کوواریانس باقیمانده کاهش می‌یابد (Warton et al., 2015).

توزیع مشترک گونه‌ها به ویژه برای تجزیه و تحلیل داده‌های جامعه ماهی مفید هستند، زیرا داده‌های حضور ماهی اغلب در فضا و در طول زمان جمع‌آوری می‌شوند و در نتیجه ممکن است همبستگی مکانی و یا زمانی خود را نشان دهند. هنگامی که خودهمبستگی مکانی و یا زمانی وجود داشته باشد و در نظر گرفته نشود، استنباط مدل ممکن است سوگیری داشته باشد اگر وابستگی قوی وجود داشته باشد، گنجانیدن اثرات تصادفی همچنین می‌تواند پیش‌بینی‌ها را در مکان‌های نمونه‌گیری نشده در زمان و مکان بهبود بخشد (Hui & Poisot, 2016).

چندین مطالعه کلیدی، ارزش استفاده از توزیع مشترک گونه‌ها را در تحقیقات ماهیان آب شیرین نشان می‌دهند. Tikhonov و همکارانش (Tikhonov et al., 2020) از یک مدل با داده‌های ماهیان دریاچه‌ای از فنوسکاندیا برای بررسی چگونگی تغییر ارتباطات گونه‌ای توسط دما استفاده کردند و چارچوبی برای ارزیابی تغییرات ناشی از آب و هوا در ترکیب جامعه ارائه دادند. Dasilva و همکارانش (da Silva et al., 2023) توزیع مشترک را روی مجموعه‌های صدف آب شیرین و ماهی میزبان در حوضه رودخانه دورو اعمال کردند و نشان دادند که این مدل‌ها می‌توانند گونه‌های میزبان

¹ Species Distribution Models ; SDM

² joint Species Distribution Models; jSDMs

³ Residual Covariance Matrix

⁴ Probit

⁵ Latent variable Model; LVM

مهم را شناسایی کرده و پاسخ‌های محیطی مشترک را از ارتباطات زیستی بالقوه جدا کنند. در دلتای اوکاوآنگو پایینی، از یک مدل توزیع مشترک برای بررسی تجمع ماهی جامعه در رودخانه‌های متناوب استفاده شد که نشان می‌دهد نشان می‌دهد که شرایط محیطی، از جمله دما و ویژگی‌های زیستگاه، نقش مهمی در توزیع ماهیان دارند؛ در عین حال، برخی همبستگی‌های باقیمانده بین گونه‌ها می‌تواند با تعاملات زیستی، سازگار باشد (Bokhutlo et al., 2023). و McLaughlin و همکارانش (McLaughlin et al., 2024) بیش از ۵۰ گونه ماهی نهر را در سراسر حوزه آبخیز خلیج چسپایک ارزیابی کردند و دریافتند که پیش‌بینی‌های توزیع مشترک، تخمین‌های وقوع را برای بسیاری از گونه‌های عمومی و چندین گونه نادر بهبود می‌بخشد، اگرچه مزایای آن در بین گونه‌ها متفاوت بود و برای گونه‌های مهاجم مورد بررسی محدود بود. روی هم رفته، این مطالعات نشان می‌دهند که توزیع مشترک گونه‌ها نه تنها برای توصیف هم‌زیستی ماهی‌های آب شیرین، بلکه برای بهبود پیش‌بینی‌ها، ارزیابی پاسخ‌های اقلیمی، شناسایی وابستگی‌های ماهی میزبان و درک فرآیندهای تجمع اجتماعی نیز مفید هستند.

گونه‌های ماهی در حوضه جنوبی دریای خزر علاوه بر خطرات ناشی از تغییر اقلیم با تهدیدات متعددی مانند: تغییر زیستگاه ناشی از توسعه‌ی شهری، کشاورزی و سدسازی، آلودگی ناشی از پساب‌های کشاورزی و صنعتی، معرفی گونه‌های غیر بومی، صید بی رویه و خشکسالی نیز روبرو هستند که عمدتاً به دلیل فعالیت‌های انسانی و تغییرات محیطی است (Seifali et al., 2012; Mostafavi et al., 2019; Esmacili et al., 2014)، علاوه بر تهدیدات ذکر شده پیش‌بینی می‌شود که ماهیان حوضه‌ی جنوبی دریای خزر با خطر شدید از دست دادن زیستگاه نیز مواجهند. در این مطالعه سعی کردیم با استفاده از تعیین روابط و تعاملات بین گونه‌ها ارتباط بین زیستگاه‌های گونه‌ها را جهت حفاظت از گونه‌های حساس شناسایی کنیم.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

حوضه‌ی آبریز دریای خزر در شمال ایران قرار دارد که توسط دریای خزر در شمال و کوه‌های البرز در جنوب احاطه شده است. این حوضه با مساحت ۱۸۲،۱۰۰ کیلومتر مربع از سه منطقه زیستی در خاک ایران با نام‌های زهکش‌های کورا و جنوب خزر^۱، ارتفاعات خزر^۲ و دشت‌های تورانی^۳ تشکیل شده است (Mostafavi et al., 2019; Mostafavi et al., 2015). با توجه به امکانات در دسترس به لحاظ بودجه‌ای و زمانی پژوهش مورد نظر در دو منطقه‌ی زیستی غربی (زهکش‌های کورا و جنوب خزر) و مرکزی (ارتفاعات خزری) انجام گردید که در مجموع مساحت منطقه‌ی زیستی‌های مورد مطالعه ۱۳۱،۳۵۲ کیلومتر مربع است.

روش جمع‌آوری داده‌های زیستی

در ابتدا نقشه زیرحوضه‌های دو اکوریجن بر اساس پایگاه داده‌ای اروپا بنام CCM2 و از روی نقشه DEM صد متر مستخرج از ماهواره لندست (Hijmans et al., 2005; Vogt et al., 2007). سپس ۱۷۵ ایستگاه نمونه برداری به طور تصادفی بر رودخانه‌های قابل گذر^۴ انتخاب شدند. نمونه برداری نیز در فصل پاییز به دلیل وجود جریان کم در این فصل

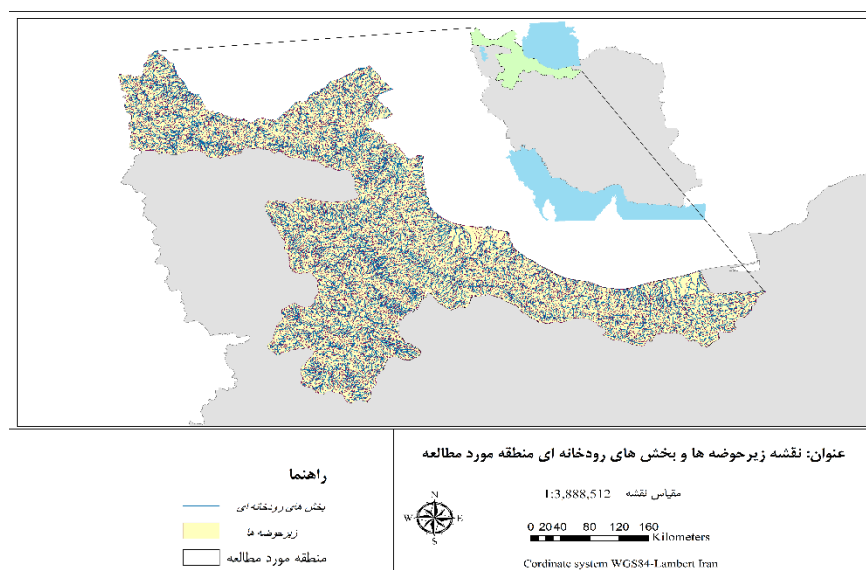
¹ Kura-South Caspian Drainages

² Caspian Highlands

³ Turan Plain

⁴ Wadeable

و امکان وجود اندازه‌های مختلف ماهی بر اساس پروتکل اتحادیه اروپا^۱ مربوط به نموبرداری ماهیان به وسیله الکتروشوک (Cardoso et al., 2005) در سال ۲۰۱۵ انجام گردید (Mostafavi et al., 2015).



شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه

Figure 1. Map of the study area

جهت پوشش تمامی زیستگاه‌های ایستگاه‌های مورد مطالعه، محل‌های نمونه برداری ۱۰ تا ۲۰ برابر عرض رودخانه انتخاب و حداقل ۱۰۰ متر از طول رودخانه نمونه برداری گردید (Langdon, 2001). به علاوه، جهت نمونه‌برداری، یک تور متوقف کننده در مسیر بالادست رودخانه و یک تور در پایین دست رودخانه جهت جمع‌آوری نمونه‌های شوک شده و در رفته از سوی جمع‌آوری کنندگان با آند قرار داده شد. با توجه به عرض رودخانه ایستگاه‌های نمونه برداری، برای هر پنج متر عرض یک شوکر آند استفاده گردید و یک تیم سه نفره بر خلاف جریان آب به سمت بالادست رودخانه حرکت کرده و ماهی‌ها را صید و به کنار رودخانه منتقل می‌نمودند. لازم به ذکر است که ماهیان پس از شناسایی، بدون تلفات مجدداً به داخل رودخانه رهاسازی می‌گردیدند.

روش استخراج متغیرهای محیطی

با توجه به دوره‌های زمانی مطالعه، ۱۹ متغیر زیست اقلیمی^۲ از پایگاه داده worldclim.org استخراج شدند و از هر کدام برای هر زیرحوضه میانگین گرفته شد. میانگین متغیرهای شکل زمین یعنی شیب، جهت و ارتفاع برای هر زیرحوضه نیز محاسبه شدند. از مساحت کاربری کشاورزی و کاربری شهری هر زیرحوضه به عنوان نماینده فعالیت‌های انسانی در این پژوهش استفاده شد. مساحت هر زیر حوضه و طول بخش رودخانه متعلق به آن زیر حوضه نیز به همراه لایه‌های تجمعی بالادست زیرحوضه یعنی مساحت تجمعی بالادست رودخانه، طول تجمعی بالادست رودخانه، مساحت تجمعی کاربری کشاورزی بالادست رودخانه، مساحت تجمعی کاربری انسانی بالادست رودخانه، بارش تجمعی بالادست رودخانه در نرم افزار Arc GIS 10.8 محاسبه شدند و برای جلوگیری از هم خطی، متغیرها مورد آزمون همبستگی پیرسون قرار گرفتند و از بین متغیرهایی که همبستگی بالای ۷۰ درصد داشتند، یکی از آن‌ها بر اساس مطالعات قبلی انجام شده در حوضه جنوبی دریای خزر و با نظر کارشناسان انتخاب شدند (Valavi et al., 2022).

^۱ CEN2003

^۲ Bioclim

گونه‌های مورد مطالعه

نتایج حضور و غیاب ۲۲ گونه ماهی مطابق جدول ۱ وارد فرایند مدل سازی شد. جدول ۱. گونه‌های مورد مطالعه، وضعیت بومی یا غیربومی بودن، وضعیت حفاظتی بر مبنای IUCN و وضعیت اقتصادی آنها

Table 1. Study species, their native or non-native status, conservation status according to IUCN, and their economic status

نام انگلیسی	نام فارسی	نام علمی گونه	وضعیت بومی بودن	وضعیت حفاظتی	وضعیت اقتصادی
Rainbow trout	آلای قزل کمان‌رنگین	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	غیربومی	NE	صید ورزشی
Brown trout	آلای قزل قرمزخال	<i>Salmo trutta</i>	بومی	LC	صید ورزشی
Topmouth gudgeon	آمورچه	<i>Pseudorasbora parva</i>	غیر بومی	LC	آکواریومی
Eastern mosquitofish	گامبوزیا	<i>Gambusia holbrooki</i>	غیربومی	LC	ندارد
Berg Loach	سگ ماهی برگ	<i>Oxynoemacheilus bergianus</i>	بومزاد	LC	اکولوژیکی
Abrishamchian's loach	لوچ ابریشمچیانی	<i>Paracobitis abrishamchiani</i>	بومزاد	NE	اکولوژیکی
Faridpak's spined loach	سگ ماهی فریدپاکی	<i>Cobitis faridpaki</i>	بومزاد	NE	اکولوژیکی
Hither Asia spined loach	سگماهی جویباری طلایی	<i>Sabanejewia aurata</i>	بومی	LC	آکواریومی و اکولوژیکی
Riffle Minnow	خیاطه خزر	<i>Alburnoides eichwaldi</i>	بومی	LC	اکولوژیکی
Filippi's bleak	کولی کورا	<i>Alburnus filippii</i>	بومی	LC	اکولوژیکی
Persian bleak	مروارید ماهی	<i>Alburnus hohenackeri</i>	بومی	LC	اکولوژیکی
Mesopotamian chub	سوفیوس النهرین‌بین	<i>Squalius berak</i>	بومی	LC	صید ورزشی
Turkish chub	سوفیوس ترکی	<i>Squalius turcicus</i>	بومی	LC	صید ورزشی
Bulatmai barbel	زردک	<i>Luciobarbus capito</i>	بومی	VU	صید ورزشی
Mursa	زردک قلمی	<i>Luciobarbus mursa</i>	بومی	LC	صید ورزشی
Kura barbel	سس ماهی	<i>Barbus cyri</i>	بومی	LC	صید ورزشی
Razi scraper	سپاه ماهی رازی	<i>Capoeta razi</i>	بومی	LC	اکولوژیکی
Goldfish	کاراس	<i>Carassius auratus</i>	غیر بومی	LC	ندارد
Sharpbelly	تیزه کولی	<i>Hemiculter leucisculus</i>	غیربومی	LC	ندارد
Caspian goby	گاوماهی شنی	<i>Neogobius pallasii</i>	بومی	LC	اکولوژیکی
Round goby	گاوماهی گرددم	<i>Neogobius melanostomus</i>	بومی	LC	اکولوژیکی
European bitterling	مخرج ای لوله	<i>Rhodeus amarus</i>	بومی	LC	آکواریومی

تحلیل آماری

چندین چارچوب مدل‌سازی آماری برای برازش JSDM وجود دارد (Norberg et al., 2019)، که ما از بسته مدل‌سازی توزیع مشترک گونه‌ها (jSDM) در نسخه R نسخه 4.4 (Clark et al., 2017) استفاده کردیم. به دنبال نشانه گذاری ویلکینسون و همکاران (۲۰۱۹)، اجازه می‌دهیم $y_{ij}=1$ نشان دهنده حضور و $y_{ij}=0$ نشان دهنده عدم وجود گونه j در محل i باشد، جایی که $j = 1 \dots J$ و $i = 1 \dots n$. مدل پایه به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} y_{ij} &= 1(z_{ij} > 0) \\ z_{ij} &= u_{ij} + e_{ij} \\ u_{ij} &= X_i \cdot B_{\cdot j} \\ e_i &\sim MVN(0, R) \end{aligned}$$

حضور و غیاب هر گونه از طریق متغیر نهفته z_{ij} مشخص می‌شود که $z_{ij} > 0$ نشان دهنده حضور و $z_{ij} < 0$ نشان دهنده عدم حضور است. متغیر پنهان برابر است با مجموع خطی پیش‌بینی‌کننده u_{ij} و خطای باقی‌مانده همبسته e_{ij} است (Clark et al., 2017).

به دنبال چارچوب مدل خطی تعمیم یافته، پیش‌بینی خطی حاصل ضرب $k = 1 \dots K$ متغیرهای کمکی محیطی X_i است. و ضرایب رگرسیون $B_{\cdot j}$. همبستگی‌های باقی‌مانده در ماتریس کوواریانس $J \times J$ وجود دارد، که وابستگی‌ها را در میان گونه‌ها پس از محاسبه متغیرهای کمکی در مدل نشان می‌دهد. یعنی R آن گونه‌هایی را شناسایی می‌کند که با توجه به متغیرهای محیطی، بیشتر یا کمتر از سطح پیش‌بینی‌شده اتفاق می‌افتند. وابستگی‌های باقیمانده همچنین امکان پیش‌بینی وقوع هر گونه را مشروط به وقوع گونه‌های دیگر در جامعه فراهم می‌کند (Clark et al., 2017). همچنین قابل ذکر است که متغیر پنهان یک «عامل واقعی ناشناخته» نیست که الزاماً بتوانیم نامی مانند دما یا کیفیت آب روی آن بگذاریم؛ بلکه یک مؤلفه آماری مشاهده نشده است که برای توضیح ساختار باقی‌مانده داده‌ها وارد مدل شده است.

اجرای مدل

در این پژوهش مدل مورد استفاده یک JSDM برای داده‌های حضور/عدم حضور، مدل binomial با لینک تابع logit برای داده‌های ۲۲ گونه ماهی بود که در چارچوب بیزی سلسله‌مراتبی و با استفاده از دو متغیر نهفته^۱ برازش شد. برای نمونه‌گیری MCMC تعداد ۱۰۰۰۰ تکرار، به‌عنوان burn-in تعداد ۵۰۰۰ تکرار و فاصله thinning برابر ۱۰ در نظر گرفته شد. مدل با verbose=1 اجرا شد.

ارزیابی مدل

برای ارزیابی مدل بیزی از دو شاخص انحراف نمودار ردیابی^۲ برای MCMC و انحراف تراکم پسین^۳ برای بررسی اینکه مدل، به یک توزیع پسین پایدار رسیده است یا خیر، استفاده می‌کنیم. انحراف نمودار ردیابی مقدار انحراف در طول تکرارها^۴ را نمایش می‌دهد و نمودار انحراف تراکم پسین، نشان می‌دهد که آیا انحراف توزیع پسین، رفتار غیرعادی یا چندقله‌ای آشکاری دارد یا خیر. برای ارزیابی دقت مدل در پیش‌بینی حضور گونه از شاخص مساحت زیر نمودار AUC^۵ استفاده می‌کنیم. در این قسمت از ۷۰ درصد نقاط برای آموزش مدل و از ۳۰ درصد برای آزمون استفاده می‌کنیم (Tobler et al., 2019).

¹ latent variable

² Trace plot MCMC

³ Posterior Density – Deviance

⁴ Iteration

⁵ Area Under Curve

یافته‌ها و بحث

متغیرهای مورد استفاده در مدلسازی

پس از اعمال آزمون همبستگی و نظر کارشناسی، در نهایت ۱۰ متغیر که عبارتند از: حداقل دمای سردترین ماه سال (دمای کمینه، BIO6)، حداکثر دمای گرمترین ماه سال (دمای بیشینه، BIO5)، اختلاف حداکثر دمای گرمترین ماه سال و حداقل دمای سردترین ماه سال (اختلاف دمای سالانه، BIO7)، میانگین دمای سالانه (دمای میانگین، BIO1)، بارش سالانه (BIO12)، شیب به درصد، مساحت تجمع‌ی بالادست، طول بخش رودخانه، مساحت کاربری کشاورزی و مساحت کاربری انسانی مطابق جدول ۲ برای مدل‌سازی انتخاب شدند.

جدول ۲. جدول متغیرهای محیطی مورد استفاده برای مدلسازی

Table 2. Table of environmental variables used for modeling

واحد اندازه‌گیری	متغیر محیطی
°C	حداقل دمای سردترین ماه سال
°C	حداکثر دمای گرمترین ماه سال
°C	اختلاف حداکثر دمای گرمترین ماه سال و حداقل دمای سردترین ماه سال
°C	میانگین دمای سالانه
mm	بارش سالانه
%	میانگین شیب زیرحوضه
Km ²	مساحت تجمع‌ی بالادست رودخانه
m	طول بخش رودخانه
ha	مساحت کاربری کشاورزی در زیرحوضه
ha	مساحت کاربری انسانی در زیرحوضه

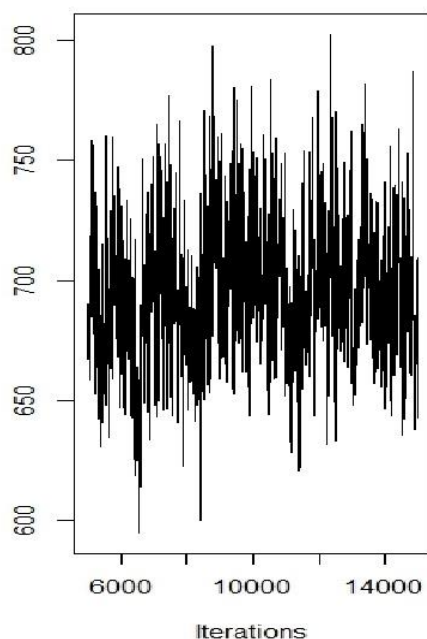
ارزیابی مدل

در شکل ۲ نمودار ردیابی MCMC نشان می‌دهد، زنجیره در طول تکرارها روند صعودی یا نزولی مشخصی ندارد و مقدار انحراف عمدتاً در محدوده حدود ۶۰۰ تا ۸۰۰ نوسان می‌کند، الگوی نوسان نسبتاً متراکم و پیوسته است و نشانه واضحی از گیر کردن زنجیره در یک ناحیه خاص دیده نمی‌شود.

از نظر ارزیابی بصری همگرایی MCMC، این نمودار وضعیت نسبتاً خوبی دارد و شواهدی از عدم همگرایی آشکار دیده نمی‌شود که نشان می‌دهد نوسانات زنجیره حول یک محدوده نسبتاً پایدار انجام شد که بیانگر همگرایی قابل قبول زنجیره MCMC است.

شکل ۳، نمودار انحراف توزیع پسین مربوط به را نشان می‌دهد. توزیع تقریباً تک‌قله‌ای است و شکل نسبتاً پیوسته‌ای دارد. یک تجمع مشخص در حدود ۶۹۰ تا ۷۱۰ مشاهده می‌شود. تک‌قله‌ای و نسبتاً هموار بودن انحراف توزیع پسین نشان می‌دهد که توزیع پسین رفتار غیرعادی یا چندقله‌ای آشکاری ندارد.

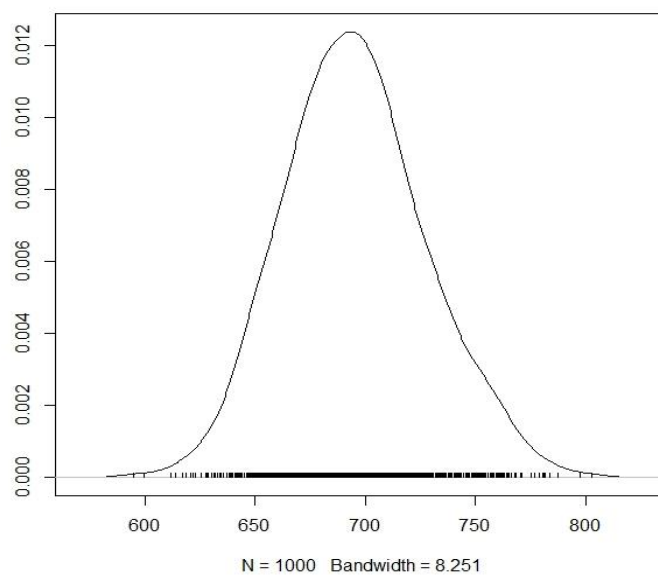
MCMC Trace Plot - Deviance



شکل ۲. نمودار ردیابی MCMC

Figure 2. MCMC trace plot

Posterior Density - Deviance



شکل ۳. نمودار انحراف توزیع پسین

Figure 3. Posterior distribution deviation graph

نتایج AUC گونه‌ها نیز در جدول ۳ نشان داده شد. مشخص میشود که مدلسازی برای ده گونه کیفیت عالی (بالتر از ۹۰)، برای چهار گونه کیفیت خیلی خوب (بین ۸۰ تا ۹۰)، برای چهار گونه کیفیت خوب (۷۰ تا ۸۰) و فقط برای چهار گونه نیز کیفیت متوسط (بین ۶۹ تا ۷۰) دارد. لذا به طور کلی مدل برای پیشبینی حضور گونه‌ها دقت مناسبی دارد.

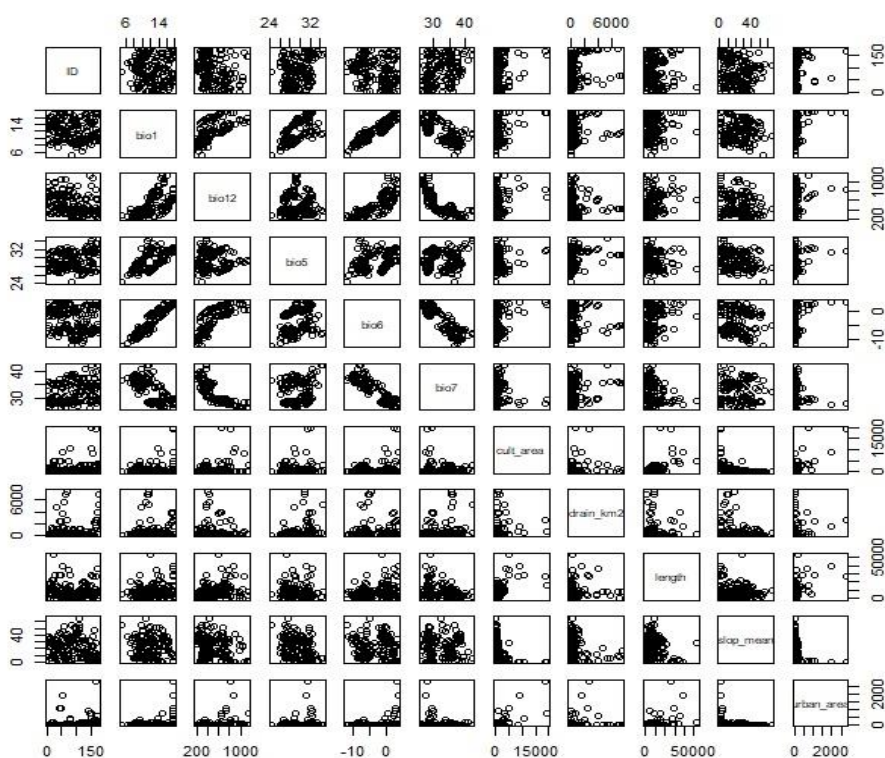
جدول ۳. جدول AUC گونه‌های مورد استفاده برای مدلسازی

Table 3. AUC table of the species used for modeling

گونه	<i>Alburnoides eichwaldi</i>	<i>Alburnus chalcoides</i>	<i>Alburnus hohenackeri</i>	<i>Alburnus filippii</i>	<i>Barbus cyri</i>	<i>Capoeta razi</i>	<i>Carassius auratus</i>
AUC	0.93	0.87	0.92	0.79	0.89	0.9	0.91
گونه	<i>Cobitis faridpaki</i>	<i>Hemiculter leucisculus</i>	<i>Gambusia holbrooki</i>	<i>Luciobarbus capito</i>	<i>Luciobarbus mursa</i>	<i>Neogobius palassi</i>	<i>Neogobius melanostomus</i>
AUC	0.9	0.76	0.98	0.67	0.77	0.92	0.72
گونه	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	<i>Oxynoemacheilus bergianus</i>	<i>Paracobitis abrishamchiani</i>	<i>Pseudorasbora parva</i>	<i>Rhodeus amarus</i>	<i>Sabanejewia aurata</i>	<i>Salmo trutta</i>
AUC	0.98	0.87	0.97	0.94	0.98	0.76	0.89

اثرات محیط غیر زنده

نتایج مدل همانگونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، نشان داد که متغیرهایی مانند دما و بارش از عوامل کلیدی غیر زیستی تعیین‌کننده پراکنش ماهیان هستند. به طور کلی، متغیرهای کمکی محیطی عموماً پیش‌بینی‌کننده‌های خوبی از حضور ماهیان رودخانه بودند و اثرات قابل توجهی در پراکنش داشتند. همبستگی‌های محیطی باقی‌مانده و مشترک همبستگی‌های بین گونه‌ها می‌تواند به دلیل پاسخ مشترک به شرایط محیطی و یا همبستگی‌های باقی‌مانده دوتایی باشد که تعامل زیستی بالقوه را نشان می‌دهد. همبستگی‌های محیطی مشترک نشان می‌دهد که جفت گونه‌ها به دلیل پاسخ آنها به شرایط غیرزیستی یکسان با هم (منفی یا مثبت) متفاوت هستند که می‌توانند نشان‌دهنده روابط اکولوژیکی مهمی از جمله رقابت، هم‌زیستی، یا وابستگی‌های زیستگاهی باشند.

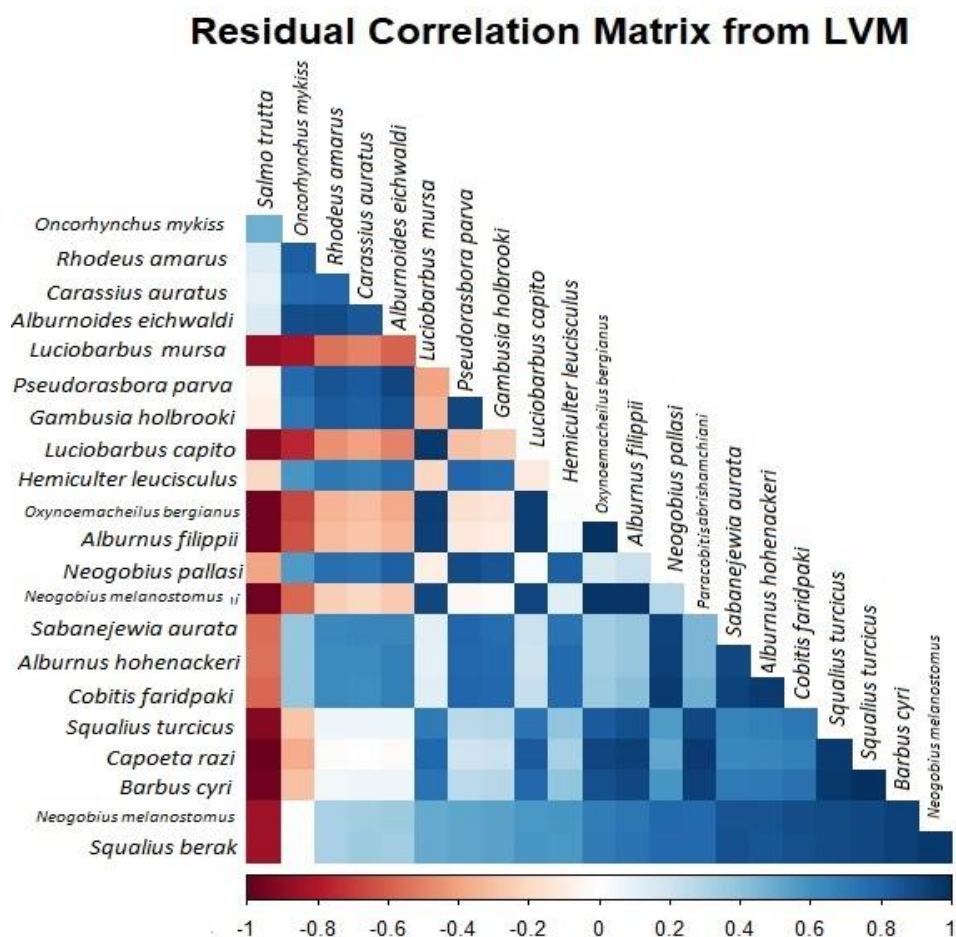


شکل ۴. تاثیر متغیرهای محیطی بر پراکنش ماهیان منطقه مورد مطالعه

Figure 4. The effect of environmental variables on the distribution of fish in the study area

همبستگی‌های محیطی باقیمانده و مشترک

همبستگی بین گونه‌ها می‌تواند به دلیل پاسخ مشترک به شرایط محیطی و/یا همبستگی‌های باقی‌مانده دوتایی باشد که تعامل زیستی بالقوه را نشان می‌دهد. همبستگی‌های زیست‌محیطی مشترک نشان می‌دهد که جفت گونه‌ها منفی یا مثبت هستند (شکل ۵).



شکل ۵. ماتریس همبستگی باقی‌مانده از مدل متغیرهای پنهان، رنگ آبی نشانگر زیستگاه یا نیازهای زیستگاهی مشترک است و رنگ قرمز نشانگر رقابت است و رنگ‌های خنثی نشانگر عدم وجود تعامل یا زیستگاه مشترک

Figure 5. Residual correlation matrix from the latent variable model, blue indicates shared habitat or habitat requirements, red indicates competition, and neutral colors indicate the absence of interaction or shared habitat

ماتریس همبستگی باقیمانده^۱ مدل متغیرهای پنهان^۲ به این معناست که مدل متغیرهای پنهان سعی کرده است که بخشی از الگوهای همبستگی بین گونه‌ها را از طریق متغیرهای نهان (عوامل محیطی یا بیولوژیکی پنهان) تبیین کند. آنچه در این ماتریس مشاهده می‌شود، همبستگی‌هایی است که پس از در نظر گرفتن آن متغیرهای نهان، همچنان بین گونه‌ها باقی مانده است. بنابراین، ضرایب بالا (مثبت یا منفی) در این ماتریس می‌توانند بیانگر موارد زیر باشند:

- تعاملات مستقیم بین گونه‌ها مانند رقابت، طعمه‌خواری یا همزیستی

^۱ Residual Correlation Matrix

^۲ Latent Variable Model

- عوامل محیطی یا انسانی اندازه‌گیری نشده که در مدل اصلی وارد نشده‌اند (برای مثال تغییرات ریزمقیاس در ساختار زیستگاه، آلودگی‌های نقطه‌ای، حضور شکارچیان خاص و غیره).
- اثرات جانبی یا سینرژیک: گاه چندین عامل کوچک دست به دست هم می‌دهند و موجب افزایش/کاهش هم‌زمان یک یا چند گونه می‌شوند.

تحلیل همبستگی گونه‌ها

مقادیر موجود در این ماتریس، اجتماع^۱ یا همبستگی^۲ باقیمانده بین گونه‌ها پس از در نظر گرفتن اثر متغیرهای محیطی مدل را نشان می‌دهند. بنابراین: آبی: اجتماع مثبت، قرمز: اجتماع منفی، سفید: اجتماع نزدیک به صفر، رنگ‌های تیره‌تر: شدت بیشتر اجتماع.

همبستگی‌های منفی که در ماتریس با رنگ قرمز نشان داده شده است، نشان‌دهنده رقابت بالقوه بین گونه‌ها هستند، به ویژه اگر قرمز پررنگ باشند احتمالاً برای گونه‌های مهاجم هستند که ممکن است تأثیرات اکولوژیکی منفی داشته باشند و همبستگی‌های مثبت که با رنگ آبی در تصویر دیده می‌شود، می‌توانند نشانگر استفاده مشترک از زیستگاه‌ها یا نیازهای اکولوژیکی مشابه باشند (Inoue et al., 2017).

گونه‌ها قزل‌آلای خال قرمز، مخرج لوله‌ای، ماهی کاراس و قزل‌آلای رنگین‌کمان دارای همبستگی مثبت و همگی با زردک قلمی همبستگی منفی دارند و با سایر گونه‌ها همبستگی منفی یا خنثی دارند. همچنین در نیمه پایین ماتریس بیشتر گونه‌ها شامل سیاه‌ماهی رازی، سوفیوس ترکی، سوفیوس بین‌النهرین، سگ‌ماهی جویباری طلایی، لوچ ابریشم‌چیان، سگ‌ماهی فریدپاکی و مرواریدماهی همبستگی مثبت دارند و همگی با قزل‌آلای خال قرمز همبستگی منفی دارند. به عنوان مثال سوفیوس ترکی و سوفیوس بین‌النهرین همبستگی مثبتی دارند، که می‌تواند نشان‌دهنده تمایل آن‌ها به حضور در زیستگاه‌های مشابه باشند و همچنین به نظر می‌رسد که ماهی کاراس و خیاطه خزر یک همبستگی منفی قوی دارند که ممکن است ناشی از رقابت غذایی یا زیستگاهی باشد. پس از کنترل اثر متغیرهای محیطی موجود در مدل، هنوز یک الگوی منفی قوی در وقوع همزمان دو گونه باقی مانده است که این الگو می‌تواند ناشی از موارد مختلف زیر باشد: رقابت بین گونه‌ها، تفاوت در زیستگاه‌هایی که در مدل اندازه‌گیری نشده‌اند، تفاوت در منابع غذایی، تفاوت در ویژگی‌های زیستی و بوم‌شناختی، ساختار فضایی یا مکانی، اثر متغیرهای محیطی حذف‌شده از مدل و تفاوت در قابلیت آشکارسازی-نمونه‌برداری است. بنابراین همبستگی باقیمانده^۳ را نباید به‌تنهایی به‌عنوان تعامل زیستی قطعی تفسیر کرد.

یکی از برجسته‌ترین نتایج شکل، الگوی بسیار منفی قزل‌آلای خال قرمز با تعدادی از گونه‌های دیگر است. در ستون مربوط به این گونه تعداد زیادی خانه قرمز تیره از جمله زردک، زردک قلمی، تیزه‌کولی، سگ‌ماهی فریدپاکی، سگ‌ماهی برگ، مروارید ماهی، سیاه‌ماهی رازی، سس ماهی، سوفیوس ترکی و چند گونه دیگر دیده می‌شوند. این نتیجه بسیار جالب است و نشان می‌دهد حضور قزل‌آلای خال قرمز در یک سایت، پس از کنترل متغیرهای محیطی مدل، با حضور برخی از این گونه‌ها الگوی باقیمانده بسیار متفاوتی دارد اما این نتیجه را نباید فوراً «رقابت» دانست.

مثلاً اگر بین الگوی وقوع این دو گونه یک اجتماع باقیمانده بسیار منفی وجود دارد که توسط متغیرهای محیطی واردشده به مدل توضیح داده نشده است، این موضوع می‌تواند نشانه‌ای برای بررسی رقابت، تفاوت در ریززیستگاه یا متغیر محیطی حذف‌شده باشد.

¹ association

² correlation

³ Residual correlation

در بخش قابل توجهی از ماتریس، بین گونه‌هایی مثل مخرج لوله‌ای، قزل‌آلای رنگین‌کمانی، آمورچه، ماهی کاراس و خیاطه خزر و تعدادی از گونه‌های دیگر، همبستگی‌های مثبت قوی با رنگ آبی متوسط تا تیره دیده می‌شود. این گونه‌ها در سایت‌هایی که یکی از آن‌ها احتمال وقوع بالاتری دارد، پس از کنترل متغیرهای محیطی مدل، تمایل بیشتری به وقوع گونه دیگر نیز نشان می‌دهند. این می‌تواند ناشی از نیازهای زیستگاهی مشابه، منابع غذایی مشابه، شرایط هیدرولوژیکی مشابه، تحمل مشابه نسبت به شرایط محیطی، یا یک متغیر محیطی مهم که در مدل وارد نشده، باشد بنابراین این بخش از ماتریس می‌تواند یک گروه بوم‌شناختی^۱ احتمالی را نشان دهد.

چند رابطه بسیار قوی مثبت دیگر نیز که در شکل دیده می‌شود که عبارتند از: مرواریدماهی، سس ماهی، سوفیوس بین‌النهرین، سوفیوس ترکی، سگ‌ماهی فریدپاکی و سگ‌ماهی جویباری طلایی. که این رابطه می‌تواند نشان دهنده‌ی این باشد که جفت گونه‌ها در سایت‌های مورد مطالعه الگوی وقوع مشابهی دارند که کاملاً توسط متغیرهای محیطی مدل توضیح داده نشده است. این می‌تواند نشان‌دهنده نیازهای زیستگاهی مشابه این دو ماهی باشد، ولی باز هم همبستگی به معنی رابطه مستقیم^۲ نیست. از نظر اکولوژیک چنین رابطه‌ای می‌تواند ناشی از نیازهای زیستگاهی مشابه باشد، اگرچه برای نتیجه‌گیری درباره علت باید اطلاعات زیستگاه و پراکنش مکانی آنها بررسی شود.

بحث

گونه‌های با همبستگی مثبت قوی مثل کولی کورا و سگ‌ماهی برگ دارای همبستگی مثبت‌اند، که احتمالاً به دلیل زیستگاه‌های مشابه یا رفتارهای هم‌زیستانه است سیاه‌ماهی رازی و سوفیوس بین‌النهرین. همبستگی مثبت دارند که ممکن است نشان‌دهنده هم‌زیستی در نواحی با جریان‌های آبی مشابه باشد. همچنین بین قزل‌آلای خال قرمز قزل‌آلای رنگین‌کمانی نیز همبستگی زیستگاهی وجود دارد که با مطالعات عبدلی همخوانی دارد (Abdoli, 2016). همبستگی مثبت میان برخی از گونه‌ها، مانند سوفیوس ترکی و سوفیوس بین‌النهرین می‌تواند نشان‌دهنده اشتراک زیستگاهی یا استراتژی‌های تغذیه‌ای مشابه باشد. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که گونه‌هایی با نیازهای اکولوژیکی مشابه معمولاً هم‌زیستی قوی‌تری دارند و می‌توانند منابع را به‌صورت مشترک بهره‌برداری کنند (Ovaskainen et al., 2017). این همبستگی‌های مثبت می‌توانند همچنین نشان‌دهنده وابستگی‌های متقابل، مانند تأثیرات تسهیل‌کننده در زیستگاه‌های مشابه، باشد (Barberán et al., 2012).

همبستگی منفی بین مخرج لوله‌ای و آمورچه وجود دارد که این همبستگی منفی ممکن است ناشی از رقابت برای منابع یا تأثیرات منفی آمورچه به‌عنوان گونه‌ای مهاجم بر مخرج لوله‌ای باشد. بر اساس مطالعات مرتبط آمورچه به‌عنوان گونه‌ای مهاجم شناخته شده است که می‌تواند بر تنوع زیستی بومی تأثیر منفی بگذارد (Tabasinezhad et al., 2023). همچنین همبستگی منفی بین قزل‌آلای رنگین‌کمانی گاوماهی دم‌گرد که می‌تواند نشان‌دهنده رقابت بر سر منابع یا زیستگاه‌های مشابه باشد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که گاوماهی دم‌گرد به‌عنوان گونه‌ای مهاجم می‌تواند بر جوامع بومی تأثیر منفی بگذارد. گونه‌هایی مانند ماهی کاراس و خیاطه خزر همبستگی منفی قوی نشان می‌دهند که می‌تواند ناشی از رقابت بر سر منابع محدود باشد. رقابت زیستی یکی از عوامل کلیدی در تعیین پراکنش گونه‌هاست و معمولاً زمانی رخ می‌دهد که دو گونه منابع مشابهی را مورد استفاده قرار دهند (Tilman, 1982). این نتایج با فرضیه رقابت انحصاری^۳ همخوانی دارد، که بیان می‌کند گونه‌هایی که دارای آشیان‌های اکولوژیکی مشابه هستند، نمی‌توانند در یک زیستگاه برای مدت طولانی هم‌زیستی داشته باشند (Gause, 1971). قزل‌آلای خال قرمز و ماهی کاراس گونه با

¹ assemblage

² facilitation

³ Competitive Exclusion Principle

همبستگی مثبت ضعیف هستند. ماهی کاراس به دلیل تحمل بالای شرایط محیطی، از جمله دماهای متغیر و کمبود اکسیژن، می‌تواند در زیستگاه‌های متنوعی زندگی کند. این ویژگی‌ها به آن امکان می‌دهد تا در رقابت با سایر گونه‌ها، به‌ویژه در محیط‌های با شرایط سخت، موفق باشد ولی قزل‌آلای خال‌قرمز در آب‌های سرد و زلال زندگی می‌کند و به‌عنوان گونه‌ای حساس به تغییرات محیطی شناخته می‌شود. حضور گونه‌های مهاجم یا تغییرات در زیستگاه می‌تواند بر جمعیت این ماهی تأثیر منفی بگذارد. ماهی کاراس به دلیل تحمل بالای شرایط محیطی، می‌تواند در زیستگاه‌های متنوعی زندگی کند، در حالی که قزل‌آلای خال‌قرمز به آب‌های سرد و زلال نیاز دارد. بنابراین، احتمال رقابت مستقیم بین این دو گونه در زیستگاه‌های طبیعی کمتر است. تغییرات در کیفیت آب، مانند افزایش دما یا کاهش اکسیژن، می‌تواند به نفع ماهی کاراس و به ضرر قزل‌آلای خال‌قرمز باشد. در چنین شرایطی، ممکن است جمعیت ماهی کاراس افزایش یافته و به‌طور غیرمستقیم بر منابع غذایی و زیستگاه‌های قزل‌آلای خال‌قرمز تأثیر بگذارد. همچنین با توجه به رژیم غذایی قزل‌آلای خال‌قرمز که شامل حشرات آبزی و ماهی‌های کوچکتر است، حضور بیش از حد ماهی کاراس می‌تواند با تغییر در ساختار زنجیره غذایی، بر دسترسی به منابع غذایی قزل‌آلای خال‌قرمز تأثیرگذار باشد.

نتیجه‌گیری

همبستگی‌های مثبت و منفی مشاهده‌شده بین گونه‌های مختلف می‌تواند نشان‌دهنده روابط پیچیده اکولوژیکی مانند رقابت، هم‌زیستی یا تأثیرات گونه‌های مهاجم باشد. با توجه به اینکه ترکیب جوامع به شدت با عوامل غیرزیستی و همبستگی‌های باقیمانده مرتبط بود، نتایج پیامدهای قابل توجهی برای حفظ و احیای جوامع آبی دارد. این مطالعه ضرورت در نظر گرفتن همزمان عوامل محیطی و حضور گونه‌ها را در مدل‌سازی توزیع گونه‌ها و مجموعه‌های جوامع رودخانه‌ای برجسته می‌کند. داده‌ها نشان می‌دهند که پراکنش ماهیان خزر به شدت تحت تأثیر متغیرهای محیطی (مانند دما و بارش) و رقابت بین گونه‌هاست. چنین رویکرد حفاظت از جامعه می‌تواند شباهت‌ها و تفاوت‌های اکولوژیکی بین گونه‌ها را آشکار کند، که می‌تواند به ما کمک کند از تضاد بین برنامه‌های حفاظت از گونه‌های هدف جلوگیری کنیم. همچنین، این تحلیل می‌تواند به مدیران حفاظت منابع آبی در تدوین استراتژی‌های حفاظتی مانند احیای رودخانه‌های منتهی به خزر در حفاظت از گونه‌های بومی و کنترل گونه‌های مهاجم کمک کند.

References

- Abdoli, A. (2016). *The inland water fishes of Iran*. Iranshenasi. (In Persian)
- Barberán, A., Bates, S. T., Casamayor, E. O., & Fierer, N. (2012). Using network analysis to explore co-occurrence patterns in soil microbial communities. *The ISME journal*, 6(2), 343-351.
- Bokhutlo, T., Cunha, E. R., & Winemiller, K. O. (2023). Inference of Fish Community Assembly in Intermittent Rivers Using Joint Species Distribution Models and Trophic Guilds. *Open Journal of Ecology*, 13(7). DOI: 10.4236/oje.2023.137030
- Cardoso, A. C., Solimini, A. G., Premazzi, G., Birk, S., Hale, P., Rafael, T., & Luisa, M. (2005). Report on Harmonisation of freshwater biological methods. *European Commission, Joint Research Centre, Ispra, Italy*. DOI: 10.1371/journal.pwat.0000502
- Clark, J. S., Nemergut, D., Seyednasrollah, B., Turner, P. J., & Zhang, S. (2017). Generalized joint attribute modeling for biodiversity analysis: Median-zero, multivariate, multifarious data. *Ecological Monographs*, 87(1), 34-56. <https://doi.org/10.1002/ecm.1241>
- da Silva, J. P., Goncalves, D. V., Garcia-Raventós, A., Lopes-Lima, M., Varandas, S., Froufe, E., Teixeira, A., Hui, F. K., Filipe, A. F., & Sousa, R. (2023). Joint species distribution models unveil co-occurrences between freshwater mussels and their fish hosts. *Journal of Biogeography*, 50(4), 730-742. DOI: 10.1111/jbi.14565

- Esmaeli, H. R., Brian, W. C., Mehraban, H. R., Masoudi, M., Khaefi, R., Abbasi, K., Mostafavi, H., & Vatandoust, S. (2014). An updated checklist of fishes of the Caspian Sea basin of Iran with a note on their zoogeography. *Iranian journal of Ichthyology*, 1(3), 152-184. <https://doi.org/10.22034/iji.v1i3.18>
- Gause, G. (1971). The struggle for existence, Williams and Wilkins, Baltimore, 1934. Online: <http://www.gause.com/Contgau.htm>
- Guisan, A., Thuiller, W., & Zimmermann, N. E. (2017). *Habitat suitability and distribution models: with applications in R*. Cambridge University Press.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 25(15), 1965-1978.
- Hui, F., & Poisot, T. (2016). Boral-Bayesian ordination and regression analysis of multivariate abundance data in R. *Methods Ecol Evol* 7: 744–750.
- Inoue, K., Stoeckl, K., & Geist, J. (2017). Joint species models reveal the effects of environment on community assemblage of freshwater mussels and fishes in European rivers. *Diversity and Distributions*, 23(3), 284-296.
- Karp, M. A., Cimino, M., Craig, J. K., Crear, D. P., Haak, C., Hazen, E. L., Kaplan, I., Kobayashi, D. R., Moustahfid, H., & Muhling, B. (2025). Applications of species distribution modeling and future needs to support marine resource management. *ICES Journal of Marine Science*, 82(3), fsaf024. DOI: 10.1093/icesjms/fsaf024
- Korhonen, P., Hui, F. K., Niku, J., Taskinen, S., & van Der Veen, B. (2024). A comparison of joint species distribution models for percent cover data. *Methods in Ecology and Evolution*, 15(12), 2359-2372. DOI: 10.1111/2041-210X.14437
- Langdon, R. W. (2001). A preliminary index of biological integrity for fish assemblages of small coldwater streams in Vermont. *Northeastern Naturalist*, 8(2), 219-232. DOI:10.1577/1548-8675(1996)016<0241:DAVOAI>2.3.CO;2
- Lazagabaster, I. A., Thomas, C. D., Spedding, J. V., Ikram, S., Solano-Regadera, I., Snape, S., & Brø-Jørgensen, J. (2024). Evaluating species distribution model predictions through time against paleozoological records. *Ecology and evolution*, 14(10), e70288. DOI: 10.1002/ece3.70288
- McLaughlin, P., Krause, K., Maloney, K., Woods, T., & Wagner, T. (2024). Evaluating the effectiveness of joint species distribution modeling for freshwater fish communities within large watersheds. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 81(9), 1248-1263. DOI: 10.1139/cjfas-2023-0385
- Mostafavi, H., Schinegger, R., Melcher, A., Moder, K., Mielach, C., & Schmutz, S. (2015). A new fish-based multi-metric assessment index for cyprinid streams in the Iranian Caspian Sea Basin. *Limnologia*, 51, 37-52. DOI: 10.1016/j.limno.2014.10.006
- Mostafavi, H., Teimori, A., Schinegger, R., & Schmutz, S. (2019). A new fish based multi-metric assessment index for cold-water streams of the southern Caspian Sea Basin in Iran. *Environmental Biology of Fishes*, 102, 645-662. DOI: 10.1016/j.limno.2014.10.006
- Norberg, A., Abrego, N., Blanchet, F. G., Adler, F. R., Anderson, B. J., Anttila, J., Araújo, M. B., Dallas, T., Dunson, D., & Elith, J. (2019). A comprehensive evaluation of predictive performance of 33 species distribution models at species and community levels. *Ecological Monographs*, 89(3), e01370. <https://doi.org/10.1002/ecm.1370>
- Ovaskainen, O., Tikhonov, G., Norberg, A., Guillaume Blanchet, F., Duan, L., Dunson, D., Roslin, T., & Abrego, N. (2017). How to make more out of community data? A conceptual framework and its implementation as models and software. *Ecology letters*, 20(5), 561-576. DOI: 10.1111/ele.12757
- Pollock, L. J., Tingley, R., Morris, W. K., Golding, N., O'Hara, R. B., Parris, K. M., Vesk, P. A., & McCarthy, M. A. (2014). Understanding co-occurrence by modelling species simultaneously with a Joint Species Distribution Model (JSDM). *Methods in Ecology and Evolution*, 5(5), 397-406. DOI: 10.1111/2041-210X.12180

- Seifali, M., Arshad, A., Moghaddam, F. Y., Esmaeili, H. R., Kiabi, B. H., Daud, S. K., & Aliabadian, M. (2012). Mitochondrial genetic differentiation of Spiralin (Actinopterygii Cyprinidae) in the south Caspian Sea basin of Iran. *Evolutionary Bioinformatics*, 8, EBO. S9207. DOI: 10.4137/EBO.S9207
- Stolf, F., & Dunson, D. B. (2025). Infinite joint species distribution models. *Biometrika*, 112(4), asaf055. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.13384>
- Tabasinezhad, N., Mosavi-Sabet, H., & Mostafavi, H. (2023). Predicting the impact of climate change on the distribution of non-native Stone moroko fish (*Pseudorasbora parva*) in the rivers of the southern basin of the Caspian Sea [Research]. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 12(2), 1-10. <https://doi.org/10.47176/ijae.12.2.14701>
- Taberlet, P., Coissac, E., Hajibabaei, M., & Rieseberg, L. H. (2012). Environmental DNA. *Molecular ecology*, 21(8).
- Thuiller, W., Münkemüller, T., Lavergne, S., Mouillot, D., Mouquet, N., Schiffrers, K., & Gravel, D. (2013). A road map for integrating eco-evolutionary processes into biodiversity models. *Ecology letters*, 16, 94-105. <https://doi.org/10.1111/ele.12104>.
- Tikhonov, G., Opedal, Ø. H., Abrego, N., Lehikoinen, A., De Jonge, M. M., Oksanen, J., & Ovaskainen, O. (2020). Joint species distribution modelling with the R-package Hmsc. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(3), 442-447. DOI: 10.1111/2041-210x.13345
- Tilman, D. (1982). *Resource competition and community structure*. Princeton university press.
- Tobler, M. W., Kéry, M., Hui, F. K., Guillera-Arroita, G., Knaus, P., & Sattler, T. (2019). Joint species distribution models with species correlations and imperfect detection. *Ecology*, 100(8), e02754. DOI: 10.1002/ecy.2754
- Valavi, R., Guillera-Arroita, G., Lahoz-Monfort, J. J., & Elith, J. (2022). Predictive performance of presence-only species distribution models: a benchmark study with reproducible code. *Ecological monographs*, 92(1), e01486. DOI: 10.1002/ecm.1486
- Vogt, J., Soille, P., de Jaeger, A., Rimaviciute, E., Mehl, W., Foisneau, S., Bódis, K., Dusart, J., Paracchini, M., & Haastrup, P. (2007). A pan-European river and catchment database. EC-JRC (report EUR 22920 EN) Luxembourg.
- Warton, D. I., Blanchet, F. G., O'Hara, R. B., Ovaskainen, O., Taskinen, S., Walker, S. C., & Hui, F. K. (2015). So many variables: joint modeling in community ecology. *Trends in ecology & evolution*, 30(12), 766-779. DOI: 10.1016/j.tree.2015.09.007



Comparative Assessment of Tehran Wastewater Treatment Plants against International Standards

Saeid Karimi^{a*}, Nastaran Alibakhshi^a

^aDepartment of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: karimis@ut.ac.ir, <https://orcid.org/0000-0003-0796-6855>

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 2026/01/27
Received in revised form:
2026/02/19
Accepted 2026/02/27
Available online: 2026/03/06

Keywords:
Effluent standards,
International comparison,
Resource recovery,
Sewage treatment plants,
Water reuse Wastewater.

ABSTRACT

This study provides a comprehensive analytical assessment of Tehran's municipal wastewater treatment infrastructure, evaluating its operational performance and technological alignment with contemporary international benchmarks. Given the escalating pressures of water scarcity and rapid urbanization, assessing these facilities—specifically the South Tehran, West Tehran, and Firoozbahrām plants—against global standards is vital for sustainable urban resource management. The methodology employed a systematic descriptive-analytical approach, synthesizing technical data, regulatory frameworks, and literature to compare local operations with the US EPA, WHO, EN 12255, and the updated European Union Urban Waste Water Treatment Directive (UWWTD 2024/2025). The evaluation focused on four core pillars: treatment capacity, process configuration, water reuse practices, and energy recovery potential, with particular attention to the anaerobic digestion and biogas generation systems utilized at the South Tehran facility. Results indicate that while Tehran's WWTPs have achieved significant milestones—such as expanding infrastructure capacity, increasing industrial water reuse, and integrating basic renewable energy technologies—the sector faces critical systemic challenges. Specifically, the current infrastructure exhibits incomplete nutrient removal and the emergence of micro-pollutants, underutilization of design capacities, and partial compliance with the stringent energy-neutrality targets mandated by updated global frameworks. Although Tehran's wastewater treatment plants have made substantial progress, achieving full alignment with global standards requires a strategic transition. This study identifies the need for immediate technological upgrades, including implementing Advanced Process Control (APC) systems, integrating quaternary (fourth-stage) treatment technologies to address micro-pollutants, and committing to energy-neutral operational pathways. Enhanced regulatory oversight, rigorous monitoring programs, and the expansion of sludge-to-energy configurations are recommended to optimize treatment efficiency and ensure long-term environmental sustainability amid climate-induced water challenges.

Cite this article: Karimi, S., & AliBakhshi, N. (2026). A Comparative Assessment of Tehran's Wastewater Treatment Plants from the Perspective of International Standards. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 1(1), 98-118. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252596>



Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252596>

Introduction

The urban water metabolism of Tehran, as a burgeoning metropolis, is currently confronting profound and multifaceted challenges. These challenges stem from a confluence of factors, including rapid population growth—which has placed unprecedented demand on finite water resources—climate-induced hydrological variability characterized by prolonged droughts and erratic precipitation patterns, and the pressing imperative of environmental preservation amid mounting pollution pressures. In the broader context of the Middle East, a region where water scarcity represents an existential threat to socioeconomic stability and public health, the role of municipal wastewater treatment plants (WWTPs) has undergone a significant transformation. No longer viewed merely as basic sanitation facilities, these plants are now recognized as fundamental pillars of water security and as critical enablers of the circular economy, offering opportunities for water reuse, nutrient recovery, and energy generation. Annually, Tehran generates a massive volume of municipal wastewater, estimated at over 1.2 million cubic meters per day. A significant portion of this volume remains either untreated or only partially treated, posing potential risks to the quality of regional aquifers—which serve as strategic reserves for the city—and threatening the agricultural integrity of the Varamin plains, a vital food-supply zone for the capital. Although domestic regulations have been established to govern effluent quality, these standards often lag behind evolving international benchmarks. The escalating global shift toward more stringent and comprehensive frameworks, such as the European Union's recast Urban Waste Water Treatment Directive (Directive (EU) 2024/3019), demands a thorough re-evaluation of Tehran's existing infrastructure. This new directive places greater emphasis on nutrient removal—particularly nitrogen and phosphorus—to combat eutrophication, promotes energy neutrality or even positive energy balance in treatment processes, and addresses the growing concern over emerging micropollutants, including pharmaceuticals and microplastics, which conventional treatment systems are ill-equipped to handle. The central research problem addressed in this study is to determine the extent to which Tehran's major treatment facilities—specifically South Tehran and West Tehran (Firoozbahram)—are aligned with contemporary global best practices. This investigation is not merely an academic exercise; it constitutes a strategic requirement for enhancing the resilience of Tehran's water resources, informing evidence-based policy decisions, and guiding future investments in infrastructure upgrades that are both economically viable and environmentally sustainable.

Method

This research adopted a descriptive-analytical approach, utilizing a systematic review of international technical standards and a comparative synthesis of national operational data. The methodology was structured into three analytical stages. First, a comprehensive literature review was conducted to extract the core requirements of global benchmarks, including the US EPA's NPDES program, the World Health Organization (WHO) guidelines for safe wastewater reuse, and the EN 12255 European standards for WWTP performance. Second, quantitative and qualitative data regarding the technological configuration of Tehran's primary plants—specifically their biological reactor designs, sludge handling units, and energy management systems—were collected from official government disclosures and existing life cycle assessment (LCA) studies. Finally, a gap analysis was performed to compare local operational outputs with international benchmarks, identifying specific bottlenecks in nutrient attenuation and energy recovery. This methodology ensures that the findings are grounded in empirical operational realities while remaining sensitive to global environmental trends.

Results

The findings reveal a nuanced landscape of infrastructure maturity in Tehran. The South Tehran WWTP, which acts as the city's primary facility, serves over four million population

equivalents and utilizes a combination of conventional activated sludge and anaerobic digestion. The performance data indicates that the facility effectively mitigates conventional pollutants such as BOD₅, COD, and TSS, consistently meeting national discharge requirements. Furthermore, the integration of a Combined Heat and Power (CHP) unit at this site demonstrates a localized effort to recover energy from sewage sludge, contributing to the site's energy demand. In contrast, the West Tehran and Firoozbahrām facilities utilize advanced A₂O (Anaerobic-Anoxic-Oxic) biological nutrient removal configurations. These plants represent a technological leap, demonstrating higher efficiency in biological phosphorus and nitrogen removal compared to older conventional units. However, when scrutinized against the updated international frameworks, several systematic weaknesses become apparent. The most critical gap is the lack of a quaternary treatment stage. While current systems remove organic matter and suspended solids, they are largely ineffective against micropollutants, such as endocrine-disrupting chemicals, synthetic pharmaceutical residues, and microplastics. Furthermore, while the South Tehran plant attempts energy recovery, true "energy neutrality"—where the facility generates as much renewable energy as it consumes—remains largely unattainable with current configurations. The carbon footprint associated with intensive aeration processes remains a significant environmental burden, as identified through recent LCA studies. The discrepancies between Tehran's current performance and the emerging global standards highlight the need for a shift in operational paradigm. The current reliance on secondary treatment is no longer sufficient to ensure long-term environmental sustainability in sensitive catchments. The transition to a circular economy in the water sector requires moving beyond "treatment and discharge" toward "resource recovery and reuse." From a policy perspective, the transition to energy-neutral operations should be prioritized. This requires not only technological upgrades, such as the adoption of solar energy arrays on site or advanced anaerobic digestion optimization, but also the implementation of real-time monitoring through Advanced Process Control (APC) loops. By utilizing digital twin technologies or smart sensors to optimize aeration rates, energy consumption can be reduced by 15-20% without compromising water quality. Moreover, the integration of "extended producer responsibility" (EPR) mechanisms—where the chemical and pharmaceutical industries contribute to the funding of quaternary treatment—represents a viable pathway for financing the necessary facility upgrades.

Conclusions

Tehran's wastewater infrastructure has made significant progress in recent decades; however, it stands at a critical technological crossroads. Achieving alignment with global benchmarks such as the recast EU directive is not only a regulatory necessity but an environmental imperative to protect public health and ensure water security. To bridge the current gaps, this study recommends a three-phased roadmap. Gradual deployment of quaternary treatment technologies, such as ozonation and granular activated carbon filtration, to address micropollutants. Expansion of the anaerobic digestion and biogas infrastructure to all major facilities, coupled with the adoption of smart grid technologies to balance on-site energy demand. Implementing more rigorous, independent monitoring programs to ensure consistent compliance with international microbiological and chemical parameters. By adopting these strategic transitions, Tehran can leverage its existing infrastructure to create a climate-resilient, circular water management system that serves as a model for other rapidly growing cities in the region.



ارزیابی تطبیقی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهر تهران با استانداردهای بین‌المللی

سعید کریمی^{a*}، نسترن علی بخشی^a

^a گروه برنامه‌ریزی، مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: karimis@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	این پژوهش به تحلیل جامع و ارزیابی تطبیقی زیرساخت‌های تصفیه فاضلاب کلان‌شهر تهران با تکیه بر استانداردهای پیشرو بین‌المللی می‌پردازد. با توجه به تشدید بحران کم‌آبی، رشد شتابان جمعیت و فشارهای ناشی از تغییرات اقلیمی، بازنگری در عملکرد تصفیه‌خانه‌های پایتخت (شامل تصفیه‌خانه‌های جنوب، غرب و فیروزبهرام) در انطباق با معیارهای جهانی به یک ضرورت حیاتی تبدیل شده است. در این مطالعه، از روش توصیفی-تحلیلی با رویکرد مرور نظام‌مند اسناد فنی استفاده شده است تا وضعیت کنونی زیرساخت‌ها با چارچوب‌های معتبر جهانی از جمله دستورالعمل اتحادیه اروپا برای تصفیه فاضلاب شهری (UWWTD ۲۰۲۴/۲۰۲۵)، استانداردهای EN ۱۲۲۵۵ و راهنماهای فنی EPA و WHO مورد سنجش قرار گیرد. ارزیابی انجام‌شده بر چهار محور کلیدی شامل ظرفیت عملیاتی، پیکربندی فناوری‌های تصفیه، الگوهای بازچرخانی پساب و پتانسیل بازیابی انرژی متمرکز بوده و به‌ویژه فرایندهای هضم بی‌هوازی و تولید بیوگاز در تصفیه‌خانه جنوب تهران را به دقت تحلیل کرده است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که اگرچه تصفیه‌خانه‌های تهران در سال‌های اخیر گام‌های موثری در مسیر توسعه ظرفیت‌های فیزیکی، گسترش بازچرخانی پساب برای مصارف صنعتی و استفاده از فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر برداشته‌اند، اما همچنان با چالش‌های ساختاری جدی مواجه هستند. حذف ناقص مواد مغذی (نیترژن و فسفر)، عدم پیاده‌سازی زیرساخت‌های لازم برای پایش و حذف میکروآلاینده‌های نوظهور و دارویی، و همچنین عدم تحقق کامل اهداف انرژی‌خشی، از جمله خلأهای اصلی در هم‌ترازی با استانداردهای سخت‌گیرانه جهانی است. در نهایت، این مقاله ضمن تبیین فاصله میان وضعیت موجود و استانداردهای پیشرفته بین‌المللی، نقشه راهی راهبردی ارائه می‌دهد. این راهکارها شامل ارتقای تکنولوژیک از طریق سیستم‌های کنترل هوشمند فرایند، استقرار واحدهای تصفیه تکمیلی (مرحله چهارم) برای حذف آلاینده‌های نوظهور و تدوین سیاست‌های اجرایی جهت گذار به سمت تصفیه‌خانه‌های انرژی‌خشی است. اجرای این پیشنهادات، افزون بر بهبود کیفیت پساب خروجی، نقشی کلیدی در حفظ پایداری منابع آب و ارتقای بهداشت عمومی در مواجهه با چالش‌های اقلیمی ایفا خواهد نمود.

استناد به این مقاله: کریمی، سعید و علی بخشی، نسترن. (۱۴۰۴). ارزیابی تطبیقی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهر تهران با استانداردهای بین‌المللی. راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم‌های پایدار، ۱(۱)، ۹۸-۱۱۵. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252596>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252596>

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

تهران، پایتخت ایران و یکی از پرجمعیت‌ترین کلان‌شهرهای خاورمیانه، با بحران‌های قابل توجهی در حوزه مدیریت منابع آب و فاضلاب مواجه است. رشد سریع جمعیت، گسترش شهرنشینی، فشارهای اقلیمی و کاهش بارش‌ها همگی باعث شده که توجه ویژه‌ای به تصفیه و بازچرخانی فاضلاب شهری معطوف شود (Akbarzadeh et al., 2023). طبق گزارش‌های اخیر، ایران سالانه حدود ۴/۶۱ میلیارد متر مکعب فاضلاب شهری تولید می‌کند، اما تنها ۴۲ درصد از آن تصفیه می‌شود. بیش از ۶۰ درصد از این تصفیه‌ها از طریق روش‌های معمولی مانند لجن‌هوازی انجام می‌شوند، و حدود ۵۵ درصد از فاضلاب تصفیه‌شده در کشور مجدداً استفاده می‌شود، به‌ویژه در کشاورزی (Akbarzadeh et al., 2023). برای تهران، تصفیه‌خانه جنوب با ظرفیت متوسط روزانه ۴۵۰,۰۰۰ متر مکعب و خدمات‌دهی به حدود ۲/۱ میلیون نفر، یکی از پیشروترین تأسیسات است. این تصفیه‌خانه دارای ساختارهایی مانند هضم بی‌هوازی، بازیافت بیوگاز، و استفاده از پساب برای آبیاری است. ارزیابی زیست‌محیطی این تأسیسات با استفاده از Life Cycle Assessment^۱ نشان داده که استفاده از پساب برای آبیاری کشاورزی به‌مراتب در مقایسه با تخلیه در محیط طبیعی، پایداری محیطی بالاتری دارد؛ البته خطرات ناشی از فلزات سنگین و اثرات سرطان‌زا نیز نباید نادیده گرفته شود (Samsami et al., 2025).

در سطح بین‌المللی، استانداردهایی مانند دستورالعمل جدید تصفیه فاضلاب شهری اتحادیه اروپا^۲ بازنگری شده (نسخه ۲۰۲۴/۲۰۲۵)، شامل اهداف سخت‌گیرانه‌ای است: کاهش مجدد نیتروژن و فسفر تا سطح سخت‌تر، حذف میکروآلودگی‌ها (با نصب فناوری چهارم-quaternary treatment) و الزام به انرژی‌خنثی^۳ برای تصفیه‌خانه‌های با ظرفیت بیش از ۱۰۰۰۰ نفر در سال‌های بین ۲۰۳۹ تا ۲۰۴۵. این استانداردها همچنین ساز و کار «آلاینده‌ها پول می‌پردازند»^۴ را برای صنایع دارویی و آرایشی در تأمین بخشی از هزینه‌های تصفیه معرفی کرده‌اند (Gaspar & Telles, 2025).

در ایران، با وجود این پیشرفت‌ها، همچنان فاصله باری با این معیارها مشاهده می‌شود:

- پوشش تصفیه در کشور هنوز تکمیل نیست و برخی تصفیه‌خانه‌ها به‌طور ناکامل عمل می‌کنند.
- حذف مواد مغذی و میکروآلودگی‌ها در اغلب موارد اتفاق نمی‌افتد.
- هدف انرژی‌خنثی هنوز در بسیاری از پروژه‌ها عملیاتی نشده (Akbarzadeh et al., 2023).

در زمینه ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و چرخه حیات زیرساخت‌های تصفیه در تهران، تابش و همکاران (Tabesh et al., 2019) در مطالعه خود نشان دادند که تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کلان‌شهر تهران نقش بسزایی در کاهش بار آلودگی‌های محیطی دارند، اما از نظر مصرف انرژی و انتشار غیرمستقیم گازهای گلخانه‌ای نیازمند بهینه‌سازی هستند. در ادامه‌ی این مطالعات، صمصامی و همکاران (Samsami et al., 2025) با تمرکز بر تصفیه‌خانه جنوب تهران و با استفاده از متدولوژی LCA، سناریوهای مختلف بازچرخانی پساب را مدل‌سازی کردند. یافته‌های آن‌ها تایید کرد که بازچرخانی پساب برای مصارف کشاورزی پایداری محیط‌زیستی به‌مراتب بالاتری نسبت به تخلیه آن به آب‌های سطحی دارد؛ هرچند آن‌ها بر ضرورت پایش دقیق فلزات سنگین و ریسک‌های سرطان‌زایی بالقوه تأکید نمودند. همچنین شاه‌منصوری و اسلامی (Shahmansouri & Eslami., 2020) در مطالعه دیگری به مقایسه تطبیقی

^۱ LCA

^۲ Urban Waste Water Treatment Directive - UWWTD

^۳ energy neutrality

^۴ polluter pays principle

استانداردهای بازچرخانی آب در ایران با کشورهای توسعه‌یافته پرداخته و خلاءهای قانونی موجود در ساختار مقرراتی کشور را برجسته کردند.

در بخش مدیریت لجن و پتانسیل‌های بازیابی انرژی که یکی از محورهای اصلی اقتصاد چرخشی است، رحمتی و همکاران (Rahmati et al., 2024) تأثیرات زیست‌محیطی سیستم‌های تصفیه فاضلاب را بر پایه هضم بی‌هوازی لجن در تصفیه‌خانه جنوب تهران ارزیابی کردند. پژوهش آن‌ها نشان داد که سیستم‌های هضم بی‌هوازی و بازیابی بیوگاز تا چه حد می‌توانند بار کربنی تصفیه‌خانه‌ها را کاهش داده و آن‌ها را به سمت خودکفایی انرژی هدایت کنند. علاوه بر این، بروزویی و همکاران (Borzooei et al., 2019) ترکیبات میکروبی و میزان فلزات سنگین لجن تصفیه‌شده در این مرکز را سنجیدند تا پتانسیل و ایمنی استفاده از آن را به عنوان کود زیستی در بخش کشاورزی ارزیابی کنند.

از منظر ارتقای تکنولوژیک، مدل‌سازی فرایندها و هوشمندسازی، ژانگ و همکاران (Sadri Moghaddam & Mesghali, 2023) با توسعه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده هوش مصنوعی (مانند شبکه‌های عصبی و ANFIS) توانستند کیفیت پساب خروجی (شامل شاخص‌های BOD، COD و TSS) را در سیستم‌های لجن فعال تصفیه‌خانه جنوب تهران با دقت بالایی شبیه‌سازی کنند. در حوزه حذف مواد مغذی (نیتروژن و فسفر) که از چالش‌های اصلی تصفیه‌خانه‌های داخلی است، زنگ و همکاران (Zeng et al., 2018) عملکرد فرایندهای پیشرفته نظیر روش A_2O را مدل‌سازی کرده و راهکارهای ارتقای راندمان بیولوژیکی این سیستم‌ها را تبیین نمودند.

با وجود این تلاش‌های ارزشمند، ما متوجه شدیم که بیشتر پژوهش‌های گذشته یا به صورت تک‌مورد روی یک تصفیه‌خانه خاص تمرکز داشته‌اند و یا ابعاد عملیاتی را به صورت مجزا (صرفاً انرژی یا صرفاً کیفیت پساب) بررسی کرده‌اند. در واقع، تاکنون یک ارزیابی جامع، همزمان و تطبیقی که سه تصفیه‌خانه استراتژیک کلان‌شهر تهران (جنوب، غرب و فیروزبهرام) را در کنار یکدیگر و در مواجهه با آخرین بازنگری‌های استانداردهای بین‌المللی (به‌ویژه دستورالعمل سخت‌گیرانه ۲۰۲۵/۲۰۲۴ اتحادیه اروپا) قرار دهد، انجام نشده است؛ خلأ بزرگی که ما در این پژوهش به دنبال پوشش دادن آن هستیم.

آیا تصفیه‌خانه‌های تهران، به‌ویژه شعب مانند جنوب تهران، از نظر کیفیت پساب، کارایی حذف آلاینده‌ها، مدیریت لجن، انرژی خنثی بودن و بازچرخانی با بل‌ترین استانداردهای روز دنیا تطابق دارند یا خیر؟

نقاط قوت و خلأهای موجود نسبت به معیارهای به‌روز اروپا چیست؟

چه راهکارهایی (فنی، مدیریتی، و سیاستی) برای عبور از وضعیت فعلی و دستیابی به استانداردهای جهانی ظرفیت‌سازی لازم دارد؟

پاسخ این پرسش‌ها می‌تواند در بهبود سیاست‌گذاری، ارتقاء تکنولوژی‌ها و تصمیم‌سازی در حوزه آب و فاضلاب ایران نقش مؤثری ایفا کند به‌ویژه در شرایطی که پایداری منابع آبی و بهداشت عمومی اهمیت بیشتری یافته‌است.

روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش از رویکردی توصیفی-تحلیلی و بهره‌گیری از مرور نظام‌مند اسناد فنی بین‌المللی و سنتز تطبیقی داده‌های عملیاتی ملی، برای ارزیابی تصفیه‌خانه‌های تهران پرداخته شده است. ساختار روش‌شناسی این مطالعه را در سه مرحله تحلیلی زیر تدوین کردیم:

گام نخست (مرور منابع و استخراج استانداردهای جهانی): در این مرحله، پیشینه تحقیق را به‌طور جامع بررسی کردیم تا الزامات اساسی و معیارهای جهانی را استخراج کنیم. این معیارها شامل برنامه NPDES آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده (NPDES, 2021)، دستورالعمل‌های سازمان بهداشت جهانی برای استفاده مجدد ایمن از

فاضلاب (WHO, 2019)، استانداردهای اروپایی EN ۱۲۲۵۵ برای عملکرد تصفیه‌خانه‌ها و نسخه بازنگری‌شده دستورالعمل تصفیه فاضلاب شهری اتحادیه اروپا (European Union, 2024) می‌شوند.

گام دوم (گردآوری داده‌های محلی): ما داده‌های کمی و کیفی مرتبط با پیکربندی تکنولوژیک تصفیه‌خانه‌های اصلی تهران (به‌ویژه طراحی راکتورهای بیولوژیکی، واحدهای مدیریت لجن و سیستم‌های مدیریت انرژی در تصفیه‌خانه‌های جنوب، غرب و فیروزبهرام) را گردآوری کردیم. این داده‌ها را از طریق گزارش‌های رسمی دولتی و مطالعات ارزیابی چرخه حیات^۱ موجود استخراج نمودیم (Rahmati et al., 2024; Samsami et al., 2025; Tabesh et al., 2019).

گام سوم (تحلیل شکاف): در نهایت، یک تحلیل شکاف برای مقایسه خروجی‌های عملیاتی محلی با معیارهای بین‌المللی انجام دادیم تا گلوگاه‌های خاص را در زمینه کاهش مواد مغذی و بازیابی انرژی به دقت شناسایی کنیم (Akbarzadeh et al., 2023).

یافته‌ها و بحث

استانداردهای جهانی تصفیه فاضلاب شهری

استانداردهای جهانی تصفیه فاضلاب شهری طی دو دهه اخیر تغییرات چشمگیری داشته‌اند، زیرا نگرانی‌های زیست‌محیطی و بهداشتی دیگر محدود به آلودگی‌های سنتی مانند مواد آلی یا معلق نیست، بلکه شامل میکروآلودگی‌ها، تغییرات اقلیمی، و بهره‌وری انرژی نیز می‌شود.

اتحادیه اروپا (UE) نسخه بازنگری شده ۲۰۲۴-۲۰۲۵

اتحادیه اروپا در سال ۱۹۹۱ با تصویب Urban Waste Water Treatment Directive – UWWTD اولین چارچوب جامع قانونی برای جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب را ایجاد کرد. این مقررات بیش از ۳۰ سال بدون تغییر اساسی باقی ماندند تا اینکه در دسامبر ۲۰۲۴، با هدف انطباق با اهداف سبز اتحادیه اروپا^۲ و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی، بازنگری گسترده‌ای صورت گرفت (European Union, 2024).

اصلاحات کلیدی این بازنگری عبارتند از:

گسترش پوشش تصفیه

در نسخه قدیمی، تنها شهرهای بالای ۲'۰۰۰ نفر موظف به داشتن سیستم جمع‌آوری و تصفیه بودند. اکنون این حد به ۱'۰۰۰ نفر معادل جمعیت کاهش یافته است.

تمام شهرهای بالای ۱۰۰'۰۰۰ نفر باید مجهز به سیستم‌های پایش پیوسته کیفیت پساب باشند (European Union, 2024).

مرحله چهارم تصفیه^۳

الزام حذف حداقل ۸۰ درصد از میکروآلودگی‌ها به‌ویژه داروها و محصولات آرایشی. فناوری‌های مرسوم برای این مرحله شامل اکسیداسیون پیشرفته^۴، غشاهای نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس، و جذب بر پایه کربن فعال است.

^۱ LCA

^۲ EU Green Deal

^۳ Quaternary Treatment

^۴ AOPs

مسئولیت مالی صنایع

صنایع دارویی و آرایشی باید دست‌کم ۸۰٪ هزینه حذف میکروآلودگی‌ها را پرداخت کنند. این مدل باعث کاهش فشار مالی بر شهرداری‌ها و مصرف‌کنندگان می‌شود (European Union, 2024).

انرژی خنثی^۱:

تصفیه‌خانه‌هایی با ظرفیت بیش از ۱۰'۰۰۰ p.e. باید تا سال ۲۰۴۵ به سطح انرژی خنثی برسند. این هدف با استفاده از بیوگاز تولیدی در هاضم‌های بی‌هوازی، نصب پنل‌های خورشیدی، و بهینه‌سازی فرایندها قابل دستیابی است (European Union, 2024).

پایش سلامت عمومی

پایش روتین پساب برای ویروس‌ها مانند SARS-CoV-2 و سایر عوامل بیماری‌زا، به‌عنوان ابزار هشدار زودهنگام بیماری‌های اپیدمیک (European Union, 2024).

ایالات متحده (US EPA) مقررات و استانداردها

در ایالات متحده، Environmental Protection Agency – EPA مسئول تدوین و اجرای مقررات تصفیه فاضلاب شهری است. این مقررات عمدتاً بر اساس Clean Water Act بنا شده‌اند و شامل استانداردهای سخت‌گیرانه‌ای برای BOD، TSS، نیتروژن، فسفر و فلزات سنگین هستند (EPA, 2021).

کیفیت پساب نوع^۲ $BOD_5 \leq 30 \text{ mg/L}$ $TSS \leq 30 \text{ mg/L}$:

پساب پیشرفته^۳ $BOD_5 \leq 10 \text{ mg/L}$ ، حذف نیتروژن کل $(TN \leq 10 \text{ mg/L})$ ، فسفر کل $(TP \leq 1 \text{ mg/L})$. استانداردهای بازچرخانی (Title 22 – California): استفاده مجدد شهری و کشاورزی تنها در صورتی مجاز است که پساب از فیلتراسیون و ضدعفونی پیشرفته عبور کرده‌باشد (Board, California State Water, 2019).

سازمان بهداشت جهانی (WHO)

سازمان بهداشت جهانی در دستورالعمل استفاده مجدد از فاضلاب در کشاورزی (۲۰۱۹) بر دو اصل کلیدی تأکید دارد.

۱- مدیریت خطر^۴: بر اساس چارچوب Water Safety Plans.

۲- محدودیت میکروبی: $E. coli \leq 1,000 \text{ CFU/100 mL}$ برای آبیاری محصولات خوراکی خام (WHO, 2019).

نمونه‌های موفق جهانی

سنگاپور-پروژه NEWater: با استفاده از فیلتراسیون غشایی سه‌مرحله‌ای و ضدعفونی UV، ۴۰ درصد نیاز آب کشور را از بازچرخانی فاضلاب تأمین می‌کند (PUB Singapore, 2020).

آلمان-برلین: استفاده از مرحله چهارم تصفیه (Ozonation + GAC) برای حذف داروها و هورمون‌ها از سال ۲۰۱۹ (Jekel et al, 2019).

کالیفرنیا-پروژه Pure Water San Diego: هدف تأمین ۵۰ درصد آب آشامیدنی شهر از طریق بازچرخانی تا ۲۰۳۵ (City of San Diego, 2021).

¹ Energy Neutrality

² Secondary Treatment

³ Advanced Treatment

⁴ Risk Management

جدول ۱. مقایسه استانداردهای جهانی (EPA, 2021; DOE Iran, 2018; European Union, 2024)

Table 1. Comparison of global standards (EPA, 2021; DOE Iran, 2018; European Union, 2024)

WHO (2019)	آمریکا (EPA (2020+)	اتحادیه اروپا (۲۰۲۴)	استاندارد	شاخص
-	≤ 30	≤ 25	BOD5 (mg/L)	خروجی
-	≤ 30	≤ 35	TSS (mg/L)	خروجی
-	≤ 10	$\leq 10-15$	(mg/L)	نیتروژن کل
-	≤ 1	$\leq 1-2$	(mg/L)	فسفر کل
مدیریت خطر	-	حذف درصد 80		میکروآلودگی‌ها
-	-	تا ۲۰۴۵		هدف انرژی خنثی
توصیه شده	غیراجباری	اجباری		پایش سلامت عمومی

استانداردهای ملی ایران در تصفیه فاضلاب شهری

در ایران، استانداردهای مربوط به کیفیت پساب تصفیه شده تحت نظارت سازمان حفاظت محیط زیست و سازمان ملی استاندارد ایران^۱ قرار دارند. استاندارد ملی شماره ۱۰۵۳، با عنوان «ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب آشامیدنی»، به طور غیرمستقیم به کیفیت پساب تصفیه شده نیز اشاره دارد. این استاندارد به ویژه در زمینه پارامترهای میکروبی و شیمیایی آب‌های سطحی و زیرزمینی کاربرد دارد (DOE Iran, 2018).

استانداردهای کیفیت پساب در ایران

استانداردهای کیفیت پساب در ایران به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱- استانداردهای مربوط به تخلیه پساب به محیط زیست: این استانداردها برای جلوگیری از آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی تدوین شده‌اند و شامل پارامترهایی مانند BOD5، COD، TSS، نیتروژن کل، فسفر کل، فلزات سنگین و پارامترهای میکروبی هستند (DOE Iran, 2018).

۲- استانداردهای مربوط به استفاده مجدد از پساب: این استانداردها برای اطمینان از ایمنی استفاده مجدد از پساب در بخش‌های کشاورزی، صنعتی و شهری تدوین شده‌اند. این استانداردها معمولاً شامل پارامترهای مشابه استانداردهای تخلیه پساب به محیط زیست هستند، اما با حداقل مقادیر سخت گیرانه تری برای اطمینان از سلامت انسان و محیط زیست (Shahmansouri & Eslami, 2020).

جدول ۲. استانداردهای ایران (DOE Iran, 2018; Shahmansouri & Eslami, 2020)

Table 1. Standards of Iran

پارامتر	حد مجاز (برای تخلیه به منابع آب)
BOD5 (mg/L)	≤ 30
COD (mg/L)	≤ 60
TSS (mg/L)	≤ 40
pH	6-8.5
دما (درجه)	≤ 40
نیتروژن کل (mg/L)	≤ 30
فسفر کل (mg/L)	≤ 6
روغن و چربی (mg/L)	≤ 10
کلیفرم مدفوعی (CFU/100ml)	≤ 400

^۱ ISIRI

مقایسه با استانداردهای جهانی

مقایسه‌ای بین استانداردهای ملی ایران و استانداردهای جهانی (اتحادیه اروپا، ایالات متحده و سازمان بهداشت جهانی) نشان می‌دهد که در برخی موارد، استانداردهای ایران مشابه یا حتی سخت‌گیرانه‌تر از استانداردهای جهانی هستند. با این حال، در زمینه‌هایی مانند استفاده مجدد از پساب در کشاورزی و صنعت، استانداردهای ایران نیاز به بازنگری و به‌روزرسانی دارند تا با استانداردهای بین‌المللی هماهنگ شوند.

جدول ۳. مقایسه استانداردهای ایران با جهان (DOE Iran, 2018; EPA, 2021; European Union, 2024)

Table 3. Comparison of Iranian standards with the world (DOE Iran, 2018; EPA, 2021; European Union, 2024)

ایالات متحده	اتحادیه اروپا	استاندارد ایران	پارامتر
≤ 30	≤ 25	≤ 30	BOD5 (mg/L)
≤ 125	≤ 125	≤ 125	COD (mg/L)
≤ 30	≤ 35	≤ 30	TSS (mg/L)
≤ 10	≤ 10	≤ 10	نیترژن کل (mg/L)
≤ 1	≤ 1	≤ 1	فسفر کل (mg/L)
مطابق استانداردهای جهانی	مطابق استانداردهای جهانی	مطابق استانداردهای ملی	پارامترهای میکروبی
محدودیت‌های مشخص	محدودیت‌های مشخص	محدودیت‌های مشخص	فلزات سنگین

پارامترهای میکروبی در استانداردهای ایران

در ایران، استانداردهای میکروبی پساب، توسط سازمان حفاظت از محیط زیست و سازمان ملی استاندارد ایران تعیین شده است تا از سلامت انسان و محیط زیست حفاظت کنند. مهم‌ترین پارامترها عبارت است از:

جدول ۴. مقایسه پارامترهای میکروبی در ایران و جهان (European Union, 2024; WHO, 2019 DOE Iran, 2018)

Table 4. Comparison of microbial parameters in Iran and the world (DOE Iran, 2018 WHO, 2019; European Union, 2024)

استاندارد بین‌المللی	حد مجاز پساب در استفاده مجدد کشاورزی	حد مجاز در پساب قابل تخلیه	پارامتر میکروبی
WHO: ≤ 1000 EU: ≤ 100	≤ 1000	≤ 100	E. coli (CFU/100mL)
مشابه WHO و EU	≤ 5000	≤ 500	کل باکتری‌های کولونی (Total Coliforms) (CFU/100mL)
مشابه EU	≤ 400	≤ 100	Enterococci (CFU/100mL)
غیر قابل شناسایی	غیر قابل شناسایی	غیر قابل شناسایی	Salmonella spp.

این مقادیر تضمین می‌کنند که پساب تصفیه شده، چه برای تخلیه در محیط و چه برای استفاده مجدد در کشاورزی، خطر بیماری‌های میکروبی را کاهش می‌دهد.

فلزات سنگین در استانداردهای ایران

در مورد فلزات سنگین، منظور از "محدودیت مشخص" این است که برای هر فلز مثل سرب (Pb)، کادمیوم (Cd)، جیوه (Hg) و نیکل (Ni)، حد مجازی مشخص شده که پساب نباید از آن عبود کند. این مقادیر برای حفظ سلامت انسان، آبزیان و محیط زیست تعیین شده‌اند (DOE Iran, 2018).

جدول ۵. مقایسه استانداردهای فلزات سنگین در ایران و جهان (DOE Iran, 2018; WHO, 2019; European Union, 2024)

Table 5. Comparison of heavy metal standards in Iran and the world (DOE Iran, 2018; WHO, 2019; European Union, 2024)

فلز سنگین	حد مجاز در پساب تخلیه (mg/L)	حد مجاز در پساب کشاورزی (mg/L)	مقایسه با استانداردهای جهانی
سرب (Pb)	≤ 0.1	≤ 0.05	EU: ≤ 0.1 WHO: ≤ 0.01
کادمیوم (Cd)	≤ 0.01	≤ 0.005	EU: ≤ 0.01 WHO: ≤ 0.003
کروم (Cr)	≤ 0.5	≤ 0.1	EU: ≤ 0.5
جیوه (Hg)	≤ 0.001	≤ 0.0001	UE: ≤ 0.001
نیکل (Ni)	≤ 0.2	≤ 0.1	UE: ≤ 0.2

تحلیل مقایسه‌ای استانداردهای ایران با استانداردهای جهانی

پارامترهای فیزیکی و شیمیایی

پارامترهای فیزیکی و شیمیایی پساب شامل مواد آلی، ذرات معلق و ترکیبات مغذی است که کیفیت آنها تعیین‌کننده تأثیر تصفیه‌خانه‌ها بر محیط زیست و منابع آب می‌باشد.

استانداردهای ایران در این بخش تقریباً با استانداردهای بین‌المللی مطابقت دارند و در برخی شاخص‌ها حتی سخت‌گیرانه‌تر از برخی کشورها هستند. این استانداردها تضمین می‌کنند که پساب تصفیه‌شده توانایی حذف مواد آلی و ذرات معلق را دارد و از آلودگی منابع آب جلوگیری می‌کند (Akbarzadeh et al., 2023).

در مقایسه با استانداردهای اتحادیه اروپا و ایالات متحده، ایران در مجموع وضعیت مطلوبی دارد و نشان می‌دهد که مقررات ملی برای حفاظت از محیط زیست و منابع آب کافی و هم‌سطح با استانداردهای جهانی است (Akbarzadeh et al., 2023; Faraji et al., 2023). با این حال، همواره امکان بهبود و به‌روزرسانی این استانداردها با توجه به فناوری‌های نوین تصفیه و تغییرات اقلیمی وجود دارد تا سطح کیفیت پساب ارتقا یابد و با نمونه‌های پیشرفته جهانی هماهنگ شود.

پارامترهای میکروبی

استانداردهای میکروبی پساب شامل باکتری‌های شاخص، کلنی‌های باکتریایی و باکتری‌های بیماری‌زا است و هدف از آنها حفظ سلامت انسان و محیط زیست است.

ایران برای تخلیه پساب به محیط زیست استانداردهای سخت‌گیرانه‌ای تعیین کرده که با استانداردهای اتحادیه اروپا هم‌خوانی دارد و در بخش میکروبی، وضعیت مطلوبی دارد. در استفاده مجدد از پساب برای کشاورزی و صنعت، ایران استانداردهای مشخصی دارد که هنوز با توصیه‌های سازمان بهداشت جهانی کاملاً هماهنگ نشده‌اند و نیاز به بازنگری دارد (WHO, 2019).

به طور کلی، ایران در کنترل پارامترهای میکروبی پساب برای حفظ سلامت محیط زیست و کاهش ریسک بیماری‌ها عملکرد مناسبی دارد، اما در برخی شاخص‌ها می‌توان سطح محدودیت‌ها را افزایش داد تا با استانداردهای بین‌المللی استفاده مجدد از آب هماهنگ‌تر شود.

فلزات سنگین

فلزات سنگین مانند سرب، کادمیوم، کروم، جیوه و نیکل، از جمله مهم‌ترین آلاینده‌های پساب هستند که می‌توانند سلامت انسان و اکوسیستم را تهدید کنند.

استانداردهای ایران برای این فلزات مشخص است و در بیشتر موارد مشابه استانداردهای اتحادیه اروپا است. این محدودیت‌ها تضمین می‌کنند که پساب تصفیه‌شده باعث آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی نشود و مصرف آن برای کشاورزی و صنعت تا حد امکان ایمن باشد (Akbarzadeh et al., 2023; Faraji et al., 2023). در برخی فلزات خاص، استانداردهای ایران برای استفاده مجدد در کشاورزی نیازمند بهبود و سخت‌گیری بیشتر است تا کاملاً با توصیه‌های سازمان بهداشت جهانی هماهنگ شود (WHO, 2019). به طور کلی، ایران در زمینه کنترل فلزات سنگین وضعیت قابل قبولی دارد و مقررات موجود نشان‌دهنده توجه جدی به حفاظت از محیط زیست و سلامت انسان است، اما با توجه به توسعه فناوری‌های نوین، به‌روزرسانی این محدودیت‌ها می‌تواند همگام با استانداردهای پیشرفته جهانی باشد.

معرفی‌های تصفیه‌خانه‌های تهران و بررسی عملکرد آنان

تصفیه‌خانه جنوب تهران

ظرفیت و عملکرد

این تصفیه‌خانه در منطقه جنوب تهران (شهرری) قرار دارد و طبق آخرین منابع، روزانه چیزی حدود ۴۵۰,۰۰۰ متر مکعب فاضلاب را برای جمعیتی حدود ۲/۱ میلیون نفر تصفیه می‌کند. فازهای هفتم و هشتم در حال توسعه هستند و ظرفیت رو تا پوشش حدود ۳/۳ تا ۴/۲ میلیون نفر افزایش می‌دهند.

فرایند تصفیه

سیستم فعال لجن^۱ به‌عنوان فناوری اصلی پایه استفاده شده، همراه با فیلتر قطره‌ای یا trickling filter برای نیتریفیکاسیون.

مراحل شامل مراحل مقدماتی^۲، ته‌نشینی اولیه، هوادهی بیولوژیکی، ته‌نشینی ثانویه، کلرزن برای گندزدایی و سپس استفاده‌ی مجدد برای آبیاری کشاورزی است.

مدیریت لجن و انرژی‌زایی

لجن اولیه و اضافی از بیوراکتور به‌وسیله هضم بی‌هوازی پردازش می‌شوند؛ گاز بیوگاز تولیدشده برای تولید انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد و برق تولید می‌کند. این سیستم با ترکیب هضم بی‌هوازی و فیلترهای قطره‌ای، بهره‌وری انرژی قابل‌توجهی دارد و تا حدودی انرژی‌خنی^۳ محسوب می‌شود.

مصارف خروجی

پساب تصفیه‌شده در اراضی کشاورزی دشت ورامین مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ لجن خشک‌شده هم اغلب به‌عنوان کود استفاده می‌شود.

تصفیه‌خانه غرب تهران

ظرفیت و عملکرد

این تصفیه‌خانه با فناوری پیشرفته‌ای بنا شده و ظرفیت تصفیه روزانه آن حدود ۵۲۰,۰۰۰ مترمکعب است. توان خدمات‌دهی آن معادل پوشش جمعیتی بالغ بر ۲/۱ میلیون نفر تعیین شده است. طرح این پروژه توسط بانک توسعه اسلامی^۴ تأمین مالی شده و در قالب ۶ مازول ساختاری طراحی شده‌است.

¹ activated sludge

² screening, grit, grease removal

³ energy-neutral

⁴ IDB

فرایند تصفیه (A2O)

فرایند A2O شامل مراحل بی‌هوازی، بی‌هوازی محدود و هوا دهی است. این طراحی اجازه حذف هم‌زمان نیتروژن و فسفر را فراهم می‌کند و می‌تواند با راندمان بالایی این مواد مغذی را از پساب حذف نماید.

کیفیت لجن و مصارف پساب

لجن تولیدی طبق استاندارد کلاس B از EPA آمریکا کنترل می‌شود (Class B). پساب تصفیه‌شده قابلیت استفاده در آبیاری مزارع یا تخلیه به منابع آب سطحی را دارد. فازهای هفتم و هشتم در حال توسعه هستند و ظرفیت را تا پوشش حدود ۳/۳ تا ۴/۲ میلیون نفر افزایش می‌دهند.

تصفیه‌خانه فیروزبهرام (اسلام‌شهر)

ظرفیت و موقعیت

این تأسیسات در جنوب غرب تهران (اسلام‌شهر) قرار دارد. ظرفیت روزانه آن حدود ۵۲۰,۰۰۰ مترمکعب و طراحی آن برای پوشش جمعیت بیش از ۲/۱ میلیون نفر است.

اجرای آن توسط بخش خصوصی و با مشارکت بین‌المللی انجام شده و هدف استفاده مجدد از پساب در بخش‌های صنعتی و کشاورزی است.

فرایند تصفیه و لجن

فرایند فعال لجن^۱ با تمرکز بر حذف نیتروژن و فسفر طراحی شده است. همچنین سیستم مدیریت لجن در آن پیشرفته بوده و شامل تجهیزات خاص برای بازیابی و تثبیت لجن است.

مصارف خروجی و تأثیرات

با راه‌اندازی این تصفیه‌خانه، سالانه بیش از ۱۹۲ میلیون مترمکعب آب بازیابی‌شده به ظرفیت آب تصفیه‌شده تهران افزوده می‌شود. این رقم حدود ۷۶٪ افزایش در ظرفیت بازچرخانی را نمایان می‌سازد.

مقایسه با تصفیه‌خانه جنوب تهران فرایندها

تصفیه‌خانه‌های جنوب تهران از سیستم Activated Sludge همراه با Trickling Filter و هضم بی‌هوازی بهره می‌برد؛ در حالی که غرب و فیروزبهرام روی تکنولوژی A2O تمرکز دارند (نیتروژن/ فسفر حذف‌شده) که پیشرفته‌تر محسوب می‌شود.

مصرف انرژی و بازچرخانی

تصفیه‌خانه جنوب با استفاده از بیوگاز توانسته به سطح انرژی خنثی نزدیک شود و انرژی قابل توجهی تولید نماید. در غرب و اسلام‌شهر، فرایند حذف مغذی‌ها و استفاده مجدد پیشرفته‌تر است اما اطلاعات خاصی درباره تولید انرژی یا سیستم‌های انرژی‌خنثی آن‌ها در دست نیست.

بطور خلاصه می‌توانیم بگوییم که تصفیه‌خانه غرب تهران، تمرکز بر حذف کامل نیتروژن و فسفر با راندمان بالاتر برای استفاده مجدد در کشاورزی یا تخلیه محیطی تهران دارد. تصفیه‌خانه فیروز بهرام مشابه با غرب تهران، اما با جهت‌گیری کاربردی گسترده‌تر صنعتی و کشاورزی و افزایش چشمگیر ظرفیت تصفیه است. و در نهایت تصفیه‌خانه جنوب تهران با ترکیب تکنولوژی کلاسیک و انرژی‌خیز^۲، با قابلیت تولید انرژی و مصرف آن در داخل سیستم؛ ارائه مدل کامل از بهره‌وری چند منظوره است.

¹ Activated Sludge

² biogas

عملکرد واقعی تصفیه‌خانه‌های تهران

کیفیت پساب

تصفیه‌خانه جنوب تهران

مطالعات عملی بر روی مرحله‌های ۵ و ۶ تصفیه‌خانه جنوب تهران نشان می‌دهند که با بهینه‌سازی نسبت بازگشت لجن فعال (RAS) تا حدود ۹۰ درصد از دبی ورودی و نسبت بازچرخانی داخلی (IR) تا ۲۰۰ درصد، راندمان حذف BOD, COD, TSS و نیتروژن کل تا ۷۵ درصد افزایش یافته‌است (Nazif et al., 2018).

این بهینه‌سازی باعث شده کیفیت پساب خروجی قابل قبول و مطابقت کافی با استانداردهای محیط‌زیست ایران داشته‌باشد. همچنین با استفاده از مدل‌های هوشمند مانند شبکه عصبی و ANFIS میشه پیش‌بینی روزانه کیفیت پساب (BOD, COD, TSS) انجام داد و اطمینان حاصل کرد که پساب برای آبیاری کشاورزی مناسب است (Sadri Moghaddam & Mesghali, 2023). نکته‌ای دیگر اینکه بررسی کیفی لجن، ترکیبات میکروبی و فلزات سنگین در تصفیه‌خانه جنوبی نشان می‌دهد که لجن به‌عنوان کود قابل استفاده است و از نظر ایمنی در وضع مطلوبی است (Borzooei et al., 2019).

سایر تصفیه‌خانه‌های تهران (غرب و فیروزبهرام)

با اینکه اطلاعات دقیق کیفی برای غرب و فیروزبهرام کمتر منتشر شده است، اما مشخص است که: غرب تهران از فناوری پیشرفته A2O استفاده می‌کند که حذف نیتروژن و فسفر را هم‌زمان انجام می‌دهد و مطابق با استانداردهای بالای جهانی برای استفاده مجدد طراحی شده‌است (Zeng et al., 2018). فیروزبهرام نیز با همین فناوری طراحی شده است و بخشی از ظرفیت اضافی تصفیه‌خانه جنوب محسوب می‌شود. این پروژه افزایش چشمگیری در حجم آب بازچرخانی شده ایجاد کرده‌است (Fahameh Industrial Engineering Company, 2021).

با توجه به این اطلاعات، می‌توانیم الگوهای عملکردی این تصفیه‌خانه‌ها را مقایسه کنیم تا مشخص شود که در کدام موارد نقاط قوت ما است و کدام موارد نیاز به بهبود دارند:

جدول ۶. مقایسه تصفیه‌خانه‌های تهران

Table 6. Comparison of Tehran wastewater treatment plants

تصفیه‌خانه	فناوری اصلی	پتانسیل حذف الاینده‌ها	کاربرد پساب	هوشمندسازی کنترل کیفیت
جنوب	Activated sludge + Optimization (RAS/IR)	بالا (با بهینه‌سازی: TSS, TN, BOD, COD)	عمدتاً کشاورزی و بازچرخانی	پیشرفته (ANN/ANFIS)
غرب	A02O - حذف مغذی‌ها	مؤثر برای نیتروژن و فسفر	کشاورزی و تخلیه محیطی	ممکن است توسعه یابد
فیروزبهرام	A2O - حذف مغذی‌ها	بالا برای کاهش نیتروژن و فسفر	کشاورزی و صنعتی	اطلاعات محدود

(Zeng et al., 2018; Sadri Moghaddam & Mesghali, 2023; Borzooei, et al., 2019; Nazif et al., 2018)

جنوب تهران: با بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی، کیفیت پساب به طور قابل توجهی بهبود یافته و مناسب استفاده مجدد در کشاورزی است. همچنین بهره‌مندی از مدل‌های هوشمند موجب کنترل دقیق‌تری روی خروجی شده است (Nazif et al., 2018).

غرب تهران: فناوری A2O گزینه‌ای قدرتمند برای حذف مغذی‌ها است؛ اگرچه داده دقیقی از کیفیت پساب منتشر نشده، اما طراحی جهت‌دار به استانداردهای استفاده مجدد در راستای کشاورزی دارد (Zeng et al., 2018).

فیروزبهرام: با ظرفیت مشابه غرب، توانسته حجم کل بازچرخانی را به شدت افزایش دهد؛ احتمالاً خروجی آن هم برای مصارف کشاورزی/ صنعتی مناسب است، هرچند داده‌های مستند کمتری موجود است (Fahameh Industrial Engineering Company, 2021).

انرژی، بازیافت منابع و LCA تصفیه‌خانه‌های تهران

جنوب تهران: تصویر دقیق از چرخه عمر

مطالعه‌ی تازه‌ی LCA روی جنوب تهران (داده‌های عملیاتی سال ۲۰۲۲، تحلیل با SimaPro و روش ReCiPe) نشان می‌دهد بیشترین سهم اثرات محیط‌زیستی عموماً از سه گلوگاه می‌آید: برق فرایندی (به‌ویژه هوادهی)، مواد شیمیایی گندزدا/انعقاددهنده، و مدیریت لجن. در سناریوهای مقایسه‌ای، بهینه‌سازی مصرف انرژی و ارتقای مدیریت لجن بیشترین کاهش اثر را ایجاد می‌کند. از سوی دیگر، راه‌اندازی نیروگاه بیوگاز در واحدهای ۵ و ۶ جنوب تهران تولید هم‌زمان برق و حرارت را ممکن کرده و انتشار متان دفع‌شده از لجن را به برق جایگزین تبدیل می‌کند؛ گزارش‌ها اثر کاهنده‌ی قابل توجهی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای نشان می‌دهند (۲ تا ۳ منبع خبری هم‌سو (Samsami, et al., 2025; Rahmati et al., 2024)). تازه‌ترین کار پژوهشی داده‌محور هم دقیقاً روی پیش‌بینی بازده بیوگاز از هضم بی‌هوازی لجن جنوب تهران تمرکز کرده و نشان می‌دهد تنظیم خودکار^۱ مدل‌های یادگیری ماشین می‌تواند بهره‌برداری را بهینه و تولید انرژی را پایدارتر کند (Rahmati et al., 2024; Samsami, et al., 2025).

کاهش بار برق هوادهی با کنترل پیشرفته DO، هوادهی ناپیوسته و نیتریفیکاسیون-دنیتریفیکاسیون هدفمند → کاهش ردپای کربن چرخه‌عمر (Rahmati et al., 2024).

افزایش بازیافت انرژی از بیوگاز CHP، بازیافت حرارت برای گرم‌کردن هاضم/ساختمان‌ها + نگه‌داشت بهینه هاضم‌ها → خنثی‌تر شدن انرژی (Rahmati et al., 2024).

مدیریت لجن: پایدارسازی/آبگیری بهتر و مسیرهای استفاده‌ی نهایی با ریسک پایین (کمپوست کنترل‌شده، کاربرد کشاورزی تحت پایش فلزات) → کاهش اثرات اکوسیستمی (Rahmati et al., 2024).

غرب تهران طراحی مغذی‌زدا و پتانسیل انرژی

غرب تهران با فرایند A2/O (بی‌هوازی-بی‌اکسیژن-هوازی) برای حذف هم‌زمان نیتروژن و فسفر طراحی شده است؛ ظرفیت طراحی روزانه حدود ۵۲۰ هزار مترمکعب، پوشش بیش از ۲/۱ میلیون نفر، و استاندارد خروجی قابل استفاده برای کشاورزی/تخلیه گزارش شده است. هرچند LCA اختصاصی منتشرشده برای غرب در دسترس نیست، اما بر اساس تجربه‌ی جهانی و داده‌های طراحی، پروفایل اثر چنین سامانه‌هایی معمولاً تحت تأثیر هوادهی واحد اکسیک، برگشت لجن، کربن بیرونی (اگر مصرف شود) و مدیریت لجن است. با توجه به ماهیت مغذی‌زدا، کاهش دوز شیمیایی حذف فسفر با بهینه‌سازی بیولوژیک و کنترل بلادرنگ NOx/DO می‌تواند هم انرژی را کم کند هم کیفیت را پایدار نگه دارد (Tabesh et al., 2019).

کنترل پیشرفته فرایند: حسگرهای آن‌لاین $4^3\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-/\text{PO}$ برای setpoint بهینه‌ی هوادهی و برگشت داخلی → کاهش مصرف برق و مواد (همسو با بهترین رویه‌های EU) (Tabesh et al., 2019).

بازیافت انرژی از لجن: افزودن/تقویت هضم بی‌هوازی و CHP همانند جنوب → نزدیک‌شدن به اهداف انرژی خنثی (Tabesh et al., 2019).

¹ auto-tuning

مسیرهای بازچرخانی: با توجه به طراحی برای استفاده کشاورزی/تخلیه، پایش روتین میکروآلودگی‌ها مطابق روند اروپا (مرحله‌ی چهارم) برای آینده‌ی نزدیک توصیه می‌شود (Tabesh et al., 2019).

فیروزبهرام (اسلام‌شهر) افزایش ظرفیت بازچرخانی و اثر شبکه

تأسیسات فیروزبهرام با مقیاسی مشابه غرب تهران، شکاف ظرفیت تصفیه/بازچرخانی را در جنوب غرب پر می‌کند و در مقیاس شهری اثر شبکه‌ای دارد: کاهش رهاسازی به آب‌های پذیرنده، افزایش آب قابل استفاده کشاورزی/صنعتی و کاهش برداشت از منابع متعارف. گزارش‌ها از افزایش چشمگیر حجم آب بازیافتی سالانه پس از بهره‌برداری حمایت می‌کنند (افزایش سهم بازچرخانی تهران/ ملی در راستای اهداف گردشی آب). در نبود LCA اختصاصی منتشرشده، می‌توان با تکیه بر مطالعات LCA فرایندهای پیشرفته‌ی ثالث/چهارم (برای پساب جنوب تهران) نقطه‌های حساس مشابه را فرض کرد: مصرف انرژی، مواد شیمیایی واحدهای پیشرفته و لجن (Rahmati et al., 2024). تنظیم بهینه‌ی نسبت‌های برگشت (RAS/IR و DO) برای تعادل کیفیت/انرژی (Tabesh et al., 2019).

- نقشه راه انرژی: ارزیابی امکان‌سنجی هضم لجن و CHP و خورشیدی روی بام/محوطه، با هدف نزدیک‌شدن به الگوی انرژی‌خنی (Tabesh et al., 2019).

- هم‌راستاسازی با بازچرخانی ملی: کمک به ارتقای سهم بازاستفاده از فاضلاب تصفیه‌شده (شاخص ملی بازیافت/بازاستفاده هنوز جای رشد دارد) (Tabesh et al., 2019).

سنجش با خط‌کش جهانی (EU 2024 Recast) و مسیر ارتقا

بازنگری ۲۰۲۴ دستورالعمل فاضلاب شهری اتحادیه‌ی اروپا هدف انرژی‌خنی برای تأسیسات بزرگ، پایش سلامت عمومی و حذف میکروآلودگی‌ها (مرحله‌ی چهارم) را پررنگ کرده است (European Union, 2024).
با تطبیق این خط‌کش روی تهران:

انرژی‌خنی: جنوب تهران با بیوگاز یک گام جلوست؛ توسعه CHP و بهینه‌سازی هوادهی می‌تواند شکاف را کمتر کند. غرب و فیروزبهرام با افزودن/تقویت AD+CHP و بهینه‌سازی APC می‌توانند به هدف نزدیک شوند (Environmental Research Center of Iran, 2016).

میکروآلودگی‌ها: حرکت به سمت خطوط ازن + کربن فعال دانه‌ای (GAC) یا دیگر AOPها در مدول‌های منتخب (براساس ریسک‌سنجی محل دریافت/کاربری پساب) می‌تواند گام هم‌راستایی با EU باشد (European Environment Agency, 2023).

LCAهای منتشرشده برای گزینه‌های ثالث/چهارم جنوب نشان می‌دهد انتخاب تکنولوژی با کمینه‌سازی اثر چرخه‌عمر ممکن و ضروری است (Iran Water and Wastewater Research Institute, 2018).

بازچرخانی: با وجود رشد ظرفیت در تهران، سهم بازاستفاده ملی هنوز پایین‌تر از سقف‌های بالقوه‌ی اقلیمی-شهری است؛ سیاست‌های تشویقی و اتصال پایدار به مصرف‌کنندگان نهایی (کشاورزی/صنعت) توصیه می‌شود (DOE, Iran, 2019).

نقشه راه پیشنهادی

هوادهی هوشمند در هر سه تأسیسات: کنترل DO مبتنی بر بار لحظه‌ای، سنسورهای N/P، و الگوریتم‌های APC → کاهش محسوس kWh/m^3 (Environmental Research Center of Iran, 2016)

گسترش هضم بی‌هوازی + CHP: تعمیم الگوی جنوب به غرب/فیروزبهرام؛ نگهداشت دمایی/اختلاط برای بیشینه‌سازی متان (European Parliament, 2023).

انتخاب‌گری مرحله‌ی چهارم: شروع در مدول‌های پریسک با LCA فناوری‌های ازن، GAC یا AOP تا کم‌اثرترین گزینه انتخاب شود (Iran Water and Wastewater Research Institute, 2018).

پایش چرخه‌عمر سالانه: یک LCA کوتاه‌دوره‌ی تکرارشونده برای هر سه سایت، تا اثر اقدامات صرفه‌جویی/ارتقای سنجش‌پذیر شود (European Environment Agency, 2023).

سنجش هر تصفیه‌خانه بطور مجزا

تصفیه‌خانه جنوب تهران

انطباق با استانداردهای ایران

با توجه به فرایند لجن فعال + واحدهای کلاسیک (ته‌نشینی اولیه/ثانویه و گندزدایی) و تجربه عملیاتی، خروجی این تصفیه‌خانه برای BOD، COD، TSS و همچنین حذف بخشی از نیتروژن/فسفر به‌طور معمول در محدوده‌های مورد انتظار استانداردهای ملی برای تخلیه/استفاده کشاورزی قرار می‌گیرد؛ به‌ویژه که بهینه‌سازی بهره‌برداری (تنظیم RAS/IR و DO) در سال‌های اخیر گزارش شده است (DOE Iran, 2019).

لجن با هضم بی‌هوازی پایدار می‌شود و با مدیریت مناسب، ریسک‌های میکروبی/فلزی در کاربرد نهایی کاهش می‌یابد.

انطباق با استانداردهای جهانی (Environmental Research Center of Iran, 2016).

از منظر الزامات کلاسیک EU و US (کیفیت ثانویه/پیشرفته)، جنوب تهران در چارچوب قابل قبولی عمل می‌کند؛ اما با بازنگری ۲۰۲۴ اتحادیه اروپا، دو فاصله‌ی اصلی دیده می‌شود:

هدف «انرژی‌خنی» برای تأسیسات بزرگ؛ جنوب شروع خوبی با بیوگاز CHP + دارد، ولی برای رسیدن به انرژی‌خنی نیاز به بسته‌ی کامل بهینه‌سازی انرژی دارد (European Union, 2024).

حذف میکروآلودگی‌ها (مرحله چهارم) مانند داروها/مواد آرایشی که در EU جدید به‌صورت سیستماتیک برای تأسیسات بزرگ مطرح است و در جنوب تهران هنوز فراگیر نیست (European Environment Agency, 2023).

پیشنهادهای ارتقا

→ هوادهی هوشمند و APC: کنترل $\text{DO}/\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ برخط، setpoint گذاری پویا، و هوادهی تناوبی (۹۸) کاهش 3 kWh/m^3 و پایدارسازی کیفیت (Environmental Research Center of Iran, 2016).

→ گسترش CHP و بازیافت حرارت از بیوگاز (به‌ویژه برای گرمایش هاضم‌ها) + بهینه‌سازی اختلاط/دمای هاضم نزدیک‌شدن به انرژی‌خنی (European Parliament, 2023).

مرحله‌ی چهارم انتخابی: ماژول‌های ازن + GAC یا AOP در خطوط با ریسک بالاتر (مصرف‌کنندگان حساس/آب‌پذیرنده) با ارزیابی LCA برای انتخاب کم‌اثرترین گزینه (Iran Water and Wastewater Research Institute, 2018).

پایش میکروآلودگی/ویروسی مطابق روند EU برای هشدار بهداشت عمومی و شفافیت داده‌ها.

تصفیه‌خانه غرب تهران

انطباق با استانداردهای ایران

طراحی با فرایند A2/O برای حذف هم‌زمان نیتروژن و فسفر، امکان دستیابی پایدار به حدود ملی برای TN/TP و شاخص‌های آلی/معلق را فراهم می‌کند. طراحی کاربرد پساب برای کشاورزی/تخلیه نیز با چارچوب ملی هم‌خوان است (Environmental Research Center of Iran, 2016).

لجن مطابق الزامات سلامت محیطی مدیریت می‌شود و امکان دستیابی به کلاس قابل قبول برای کاربردهای مجاز وجود دارد (DOE Iran, 2019).

انطباق با استانداردهای جهانی

از منظر EU/US، داشتن خط EBPR + دنیتریفیکاسیون نقطه‌قوت است و با استانداردهای مغذی‌زدا هم‌راستاست (European Union, 2024).

فاصله‌ها: (الف) همانند جنوب، مرحله‌ی چهارم برای میکروآلودگی‌ها هنوز پیش‌فرض طراحی نیست؛ (ب) انرژی خنثی در EU جدید هدف‌گذاری شده اما اطلاعات عمومی از CHP/بیوگاز در غرب کم‌تر است (European Union, 2024).

پیشنهادهای ارتقا

APC و حسگرهای آنالاین $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-/\text{PO}_4^{3-}$ برای تنظیم هم‌زمان برگشت داخلی/هوادهی/نرخ کربن خارجی → کیفیت پایدارتر با انرژی و مواد شیمیایی کمتر (Environmental Research Center of Iran, 2016).

افزودن هضم بی‌هوازی + CHP برای لجن (الگوی جنوب) + بررسی PV روی بام/محوطه → حرکت به سمت انرژی خنثی (European Parliament, 2023).

آغاز مرحله چهارم در مدول‌های منتخب (ازن یا GAC) بر اساس ریسک‌سنجی کاربری پساب/آب‌پذیرنده و LCA گزینه‌ها (Iran Water and Wastewater Research Institute, 2018).

کاهش I/I شبکه (نفوذ آب باران/زیرسطحی) برای تثبیت بار هیدرولیکی و کاهش انرژی (European Environment Agency, 2023).

تصفیه‌خانه فیروزبهرام (اسلام‌شهر)

انطباق با استانداردهای ایران

با ظرفیت مقیاس‌بالا و فناوری هم‌تراز غرب (A2/O)، این سایت شکاف ظرفیت و بازچرخانی را در غرب/جنوب‌غرب تهران پوشش می‌دهد و برای خروجی کشاورزی/صنعتی طراحی شده است؛ انطباق با حدود ملی آلی/معلق/مغذی هدف‌گذاری فرایندی پروژه بوده است (DOE Iran, 2019).

توسعه ظرفیت بازچرخانی، همسو با سیاست‌های ملی استفاده مجدد از پساب است (Environmental Research Center of Iran, 2016).

انطباق با استانداردهای جهانی

از دید EU/US، معماری فرایندی برای TN/TP مناسب است. مانند دو سایت دیگر، برای انطباق با EU ۲۰۲۴ دو محور اصلی باقی می‌ماند: کارایی انرژی تا سطح خنثی و کنترل میکروآلودگی‌ها (European Union, 2024).

پیشنهادهای ارتقا

نقشه‌ی راه انرژی: امکان‌سنجی AD + CHP برای لجن + بهینه‌سازی هوادهی/RAS/IR → کاهش محسوس انرژی ویژه (kWh/m³) (European Parliament, 2023).

پایش پیشرفته کیفیت و راه‌اندازی مرحله‌ی چهارم تدریجی در مدول‌های پریسک با ارزیابی LCA (European Environment Agency, 2023).

یکپارچگی با مصرف‌کنندگان نهایی (کشاورزی/صنعت): قراردادهای تضمین خرید، پایش مشترک کیفیت، و مدیریت هوشمند توزیع برای پایداری اقتصادی/محیط‌زیستی (European Environment Agency, 2023).

ایران: در شاخص‌های کلاسیک (BOD/COD/TSS و TN/TP)، هر سه سایت با طراحی/بهره‌برداری فعلی می‌توانند الزامات ملی را تأمین کنند.

جهانی: برای هم‌راستایی کامل با ۲۰۲۴ EU باید به‌صورت مرحله‌ای به سمت انرژی‌خنی و حذف میکروآلودگی‌ها (مرحله چهارم) رفت.

نسخه ارتقا: APC + AD/CHP + آغاز مرحله چهارم براساس LCA.

نتیجه‌گیری

بررسی انجام‌شده نشان می‌دهد که تصفیه‌خانه‌های اصلی تهران، شامل جنوب، غرب و فیروزبهرام، از نظر شاخص‌های کیفی متداول نظیر BOD، COD، TSS و همچنین کنترل نسبی مغذی‌ها (نیترژن و فسفر)، به‌طور کلی با استانداردهای ملی ایران همخوانی دارند. در مقایسه با استانداردهای جهانی، به‌ویژه الزامات جدید اتحادیه اروپا (۲۰۲۴) و ایالات متحده، این تأسیسات در بخش‌های کلاسیک تصفیه عملکرد قابل قبولی داشته، اما در دو حوزه کلیدی هنوز فاصله وجود دارد:

دستیابی به انرژی‌خنی و بهینه‌سازی کامل مصرف انرژی در فرایندها.

پایاده‌سازی مرحله چهارم تصفیه جهت حذف میکروآلودگی‌ها شامل داروها، هورمون‌ها و سایر ترکیبات نوظهور. در عین حال، وجود زیرساخت‌های نسبتاً مدرن در تصفیه‌خانه‌های غرب و فیروزبهرام، و تجربه عملیاتی طولانی‌مدت در جنوب تهران، فرصت ارزشمندی برای ارتقا فراهم کرده است. اجرای راهکارهایی چون کنترل پیشرفته فرایند (APC)، استفاده گسترده‌تر از هضم بی‌هوازی و تولید انرژی از لجن (CHP)، و استقرار فناوری‌های نوین حذف آلاینده‌های نوظهور، می‌تواند همسطح انطباق با استانداردهای بین‌المللی را ارتقا دهد و هم پایداری محیط‌زیستی و اقتصادی را تضمین کند.

در نهایت، مسیر آینده تصفیه‌خانه‌های تهران باید بر سه محور اصلی استوار باشد: بهبود کارایی انرژی، ارتقای کیفیت خروجی به سطح استانداردهای جهانی، و توسعه استفاده مجدد ایمن و پایدار از پساب. این رویکرد، علاوه بر حفاظت از منابع آبی و محیط زیست، می‌تواند الگویی برای سایر شهرهای ایران و منطقه در مدیریت جامع فاضلاب شهری ارائه دهد.

References

- Akbarzadeh, A., Valipour, A., Hadi Meshkati, S. M., & Hamnabard, N. (2023). Municipal wastewater treatment in Iran: Current situation, barriers and future policies. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 11(1), 60–71. <https://doi.org/10.34172/jaehr.2023.0>
- Borzooei, S., Campo, G., Cerutti, A., Meucci, L., Panepinto, D., Ravina, M., & Scibilia, G. (2019). Optimization of the wastewater treatment plant: From energy saving to environmental impact mitigation. *Science of the Total Environment*, 691, 1182–1189. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.210>
- California State Water Resources Control Board. (2019). Title 22, California Code of Regulations: Recycled water criteria. California State Water Resources Control Board.
- City of San Diego. (2021). Pure Water San Diego program. Public Utilities Department.
- Department of Environment of Iran. (2018). Wastewater effluent standards for discharge and reuse. Islamic Republic of Iran. [In Persian]
- Department of Environment of Iran. (2019). Wastewater quality standards in Iran. Department of Environment of Iran. [In Persian]
- Environmental Protection Agency. (2021). Effluent Guidelines Program Plan 14. EPA.
- Environmental Research Center of Iran. (2016). Assessment of the quality of effluents discharged from Tehran municipal wastewater treatment plants. Research Institute of Biotechnology and Environmental Sciences. [In Persian]

- European Environment Agency. (2023). Urban wastewater treatment: A guide for EU utilities. European Environment Agency.
- European Parliament. (2023). Urban wastewater treatment: Recast. European Parliament.
- European Union. (2024). Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council concerning urban wastewater treatment (recast). Official Journal of the European Union.
- Faraji, F., Ghaffari, H. R., & Miri, M. (2023). Systematic review investigation of heavy metals contamination in the soil of landfill sites in Iran. *Journal of Environmental Health Science*. <https://doi.org/10.1007/s40201-023-00854-4>
- Fahameh Industrial Engineering Company. (2021). Firoozbahram-Samshahr wastewater treatment project (West of Tehran). <https://fahameh.com> [In Persian]
- Gaspar, D., & Telles, L. R. (2025). The impact of wastewater directive on pharmaceuticals and cosmetics. Cuatrecasas. <https://www.cuatrecasas.com/en/portugal/public-law/art/the-impact-of-wastewater-directive-on-pharmaceuticals-and-cosmetics>
- Iran Water and Wastewater Research Institute. (2018). Life cycle assessment (LCA) in municipal wastewater treatment plants. Iran Water and Wastewater Research Institute. [In Persian]
- Jekel, M., et al. (2019). Removal of micropollutants in wastewater treatment in Berlin. *Water Science and Technology*, 79(4), 798–806. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.098>
- Nazif, S., Forouzanmehr, F., & Khatibi, Y. (2018). Tehran South UWTP, case study Iran. In *Proceedings of the 12th International Conference on Wastewater Treatment and Reuse* (pp. 123–130). [In Persian]
- PUB Singapore. (2020). NEWater: A Singapore success story. Singapore's National Water Agency.
- Rahmati, M., Rasouli, M., Haji Agha Alizadeh, H., & Ataeiyan, B. (2024). Impact evaluation of wastewater treatment based on the anaerobic digestion of sewage sludge using the life cycle assessment method: A case study of South Tehran. *International Journal of Chemical Engineering*, 2024, 5991815. <https://doi.org/10.1155/2024/5991815>
- Sadri Moghaddam, S., & Mesghali, H. (2023). A new hybrid ensemble approach for the prediction of effluent total nitrogen from a full-scale wastewater treatment plant using a combined trickling filter-activated sludge system. *Environmental science and pollution research international*, 30(1), 1622–1639. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22340-0>
- Samsami, Z., Jafari, A. J., Delnavaz, M., Naderi, A., Barati Rashvanlou, R., Movassagh Inchehboroun, B., & Dehghanifard, E. (2025). Environmental impact assessment of southern Tehran wastewater treatment plant using life cycle assessment (LCA). *Scientific Reports*, 15, 294. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84674-7>
- Shahmansouri, A., & Eslami, H. (2020). Wastewater reuse standards and guidelines in Iran compared with developed countries. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 7(3), 155–163. <https://doi.org/10.34172/EHEM.2020.19>
- Tabesh, M., Feizee Masooleh, M., Roghani, B., & Motevallian, S. S. (2019). Life-cycle assessment (LCA) of wastewater treatment plants: A case study of Tehran, Iran. *International Journal of Civil Engineering*, 17(7), 1155–1169. <https://doi.org/10.1007/s40999-018-0374-2>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2021). National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES) permit program: Secondary treatment regulation. U.S. Environmental Protection Agency.
- World Health Organization. (2019). Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater: Wastewater Use in Agriculture. WHO.
- Zeng, W., Li, W., Wang, G., & Zhang, L. (2018). A modeling understanding on the phosphorous removal performances of A2/O wastewater treatment processes. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(30), 30339–30347. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3013-x>



Investigating the Interactions among Visual Comfort Components in Buildings and Their Impact on Sustainable Performance

Mahtab Majidi^a, Neda Sadat Sahragard Monfared^{a*}, Mohammadali Khanmohammadi^a

^aDepartment of Architecture, Faculty of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: neda_monfared@iust.ac.ir, <https://orcid.org/0009-0002-9438-4238>

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 2026/01/29
Received in revised form:
2026/02/19
Accepted 2026/02/30
Available online: 2026/03/06

Keywords:
Visual Comfort,
Occupant Well-being,
Energy Efficiency,
View Quality,
Daylight.

ABSTRACT

Visual comfort, as a fundamental aspect of indoor environmental quality, significantly influences occupant satisfaction, health, and productivity. Recent studies indicate that daylight, glare, and view quality directly impact spatial experience and quality of life. However, most research has focused on only one of these components, with less attention given to their dynamic interactions. Furthermore, building design approaches developed to reduce energy consumption have neglected health-related dimensions and user experience of visual comfort. This paper reviews the existing literature to analyze current trends and identify limitations. The findings indicate that energy-oriented approaches have considered daylight solely as a means to reduce energy load and ignored human aspects and user experience. Unidimensional approaches have focused on one or two components of visual comfort and neglected outdoor view quality. In contrast, holistic approaches have demonstrated that the simultaneous combination of energy, daylight, and visual quality analysis can lead to both energy savings and improved user well-being. However, even in comprehensive approaches, most studies have focused on office and educational uses, while residential use has been severely neglected. Furthermore, few studies have addressed the dynamic interaction of all three components within an integrated framework. From a theoretical perspective, this paper proposes a new conceptual model emphasizing dynamic interaction and balance among the three components. From a practical standpoint, architects should consider openings, shading, and view quality simultaneously in the design process. The most significant gap identified is the lack of research in residential environments, highlighting the need for user-centered future studies in this context. These gaps provide an opportunity to develop integrated frameworks that simultaneously address energy performance, occupant well-being, and environmental sustainability. Addressing these research gaps is essential for achieving truly human-centered and sustainable architectural design. Future studies should prioritize multi-criteria optimization approaches that balance energy efficiency objectives with visual comfort and occupant health outcomes.

Cite this article: Majidi, M., Sahragard Monfared, N., & Khanmohammadi, M. A. (2026). Investigating the Interactions among Visual Comfort Components in Buildings and Their Impact on Sustainable Performance. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 1(1), 119-133. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252597>



© The Author(s).

Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252597>

Introduction

Visual comfort is one of the main pillars of the quality of the indoor environment of buildings, which has a direct impact on the physical and mental health, productivity, concentration and satisfaction of users. Two fundamental factors in the formation of this comfort are daylight and access to external views. In addition to its environmental function and reducing dependence on artificial lighting, natural light increases vitality and reduces symptoms of depression. On the other hand, views to the outside reduce stress and improve the quality of life by creating a visual connection with nature. Despite this evidence, building design faces the fundamental challenge of balancing energy savings and visual comfort for users. Energy-oriented solutions such as downsizing windows or using radiation control shades, although reducing energy loads, severely limit the quality of natural light and access to external views. Also, building optimization algorithms often prioritize energy indicators and ignore the visual preferences of users. On the other hand, most of the existing research has been conducted in a unidimensional manner (daylight only, glare only, or vision only) and has not addressed the simultaneous interaction of these three components. This article aims to systematically review related research, identify existing trends, analyze theoretical and practical gaps, and explain the need to develop integrated frameworks that simultaneously address energy performance, user well-being, and environmental sustainability. The importance of this research is that it provides a comprehensive picture of visual comfort as a multidimensional phenomenon and reveals the need for user-centered design in built environments, especially residential use, which has received less attention. This article is an analytical-synthetic review of the literature, which aims to provide a basis for the development of multi-criteria assessment tools in sustainable architectural design.

Method

This research is a systematic review with an analytical-synthetic approach. The study population included all scientific articles published in the field of visual comfort, daylight, glare, and view quality between 2015 and 2025. A systematic search was conducted in reputable databases including ScienceDirect, Scopus, Web of Science, and Google Scholar using the combined keywords “Visual Comfort,” “Daylight,” “Glare,” “View Quality,” “Energy Efficiency,” and “Occupant Well-being.” Inclusion criteria included: (1) publication in reputable scientific journals with a high impact factor, (2) direct relevance to at least two components of visual comfort, energy, or occupant health, and (3) presentation of quantitative or analytical findings that could be used in research synthesis. Articles that addressed only one component (e.g., only energy or only glare) and articles unrelated to indoor building environments were excluded from the review period. Finally, from the initial 78 articles, 30 articles were selected for the final analysis based on thematic relevance, comprehensiveness, and methodological quality. The data extraction process was carried out qualitatively using the Directed Content Analysis method, and the information was classified into three main categories: (1) energy-oriented approaches, (2) unidimensional approaches to visual comfort, and (3) holistic and integrated approaches. To increase the validity of the findings, two researchers reviewed the articles and reached a final agreement. The main limitation of this review was the inability to perform quantitative meta-analysis due to the heterogeneity of the methodology and measurement indicators in different studies.

Results

A systematic review of the literature revealed that research in the field of visual comfort can be classified into three general categories:

The first category, energy-oriented approaches, which were mainly dominant in the early years of the study period (2015–2020). These studies considered daylighting solely to reduce

energy load and ignored human aspects and user experience. The findings showed that the optimization algorithms in these approaches prioritized energy indicators and excluded indicators such as glare and visual quality, which resulted in reduced user satisfaction

The second category, unidimensional approaches, focuses on one or two components of visual comfort. Some of these studies confirmed the positive impact of daylight on health and productivity but did not consider glare and external vision. Others only analyzed glare, and a group focused only on the quantity of daylight and ignored the role of vision quality and scenery. The important finding of this group was that despite identifying minor factors, they presented an incomplete and disjointed picture of visual comfort.

The third group, holistic and integrated approaches, which have grown significantly mainly since 2021. These studies have shown that the simultaneous combination of energy, daylight and visual quality analysis can lead to both energy savings and improved user well-being. Smart shading systems, machine learning-based design frameworks, and visual quality quantification based on adaptive user behavior are among the achievements of this approach. However, a key finding of the present review was that even in comprehensive approaches, most studies focused on office use (more than 60% of articles) followed by education, and residential use was severely neglected (only 2% of articles). Also, few studies have addressed the dynamic interaction of all three components (light, glare, and vision) in an integrated framework, and most of them have considered one of the components as a marginal variable.

Conclusions

A systematic review of the literature showed that visual comfort is a multidimensional phenomenon and depends on the simultaneous interaction of daylight, glare control, and external vision quality. Purely energy-oriented or one-dimensional approaches, although effective in solving part of the problem, have in practice led to reduced satisfaction, decreased mental health, and increased dissatisfaction of users due to ignoring the human dimension. In contrast, holistic approaches have shown that it is possible to design integrated frameworks that can simultaneously improve energy performance, enhance visual quality, and ensure user health. From a theoretical perspective, this paper proposes a new conceptual model for visual comfort, emphasizing the dynamic interaction of the three components, in which “balance” plays a key role instead of “single-criteria optimization”. From a practical perspective, the findings indicate that architects and designers should design openings, shading, and landscape quality simultaneously in the design process, rather than giving absolute priority to energy or just light. The most important gap identified is the lack of research in residential environments, which doubles the need for future studies with a user-centered approach in this context. It is suggested that future research should focus on developing multi-criteria assessment tools based on combined indicators (such as the integrated visual comfort-energy index) and conducting field studies in residential buildings with direct user participation, in order to reduce energy consumption and provide a desirable and health-oriented spatial experience for residents. Also, applying machine learning methods and dynamic simulations to predict the combined behavior of these components is one of the promising research directions to fill the existing gap.



بررسی تعامل مؤلفه‌های آسایش بصری در ساختمان‌ها و تأثیر آن بر عملکرد پایدار

مهتاب مجیدی^۱، ندا سادات صحراگرد منفرد^{۲*}، محمدعلی خان محمدی^۳

^۱گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: ندا سادات صحراگرد منفرد neda_monfared@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	آسایش بصری به عنوان یکی از ارکان اصلی کیفیت محیط داخلی، نقش مهمی در رضایت، سلامت و بهره‌وری کاربران دارد. مطالعات اخیر نشان می‌دهند عوامل کلیدی نور روز، خیرگی و کیفیت دید به بیرون تأثیر مستقیمی بر تجربه فضایی و کیفیت زندگی دارند. با این حال، اکثر پژوهش‌ها تنها بر یکی از این مؤلفه‌ها متمرکز بوده و تعامل متقابل آن‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، رویکردهای طراحی ساختمان که برای کاهش مصرف انرژی توسعه یافته‌اند، ابعاد سلامت‌محور و تجربه کاربری آسایش بصری را نادیده گرفته‌اند. این مقاله با مرور پیشینه پژوهش‌های مرتبط، روندهای موجود و محدودیت‌های پیش رو را تحلیل می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهند که رویکردهای انرژی‌محور، نور روز را صرفاً به عنوان ابزاری برای کاهش بار انرژی در نظر گرفته و جنبه‌های انسانی و تجربه کاربری را نادیده گرفته‌اند. رویکردهای تک بعدی نیز بر یک یا دو مؤلفه از آسایش بصری تمرکز داشته و کیفیت دید بیرونی را نادیده گرفته‌اند. در مقابل، رویکردهای جامع‌نگر نشان داده‌اند که ترکیب هم‌زمان تحلیل انرژی، نور روز و کیفیت دید می‌تواند هم به صرفه‌جویی انرژی و هم به بهبود رفاه کاربران منجر شود. با این حال، حتی در رویکردهای جامع، بیشتر مطالعات بر کاربری اداری و آموزشی متمرکز بوده‌اند و کاربری مسکونی به شدت مورد غفلت قرار گرفته است. همچنین، تعداد کمی از مطالعات به تعامل پویای هر سه مؤلفه در چارچوبی یکپارچه پرداخته‌اند. این شکاف‌ها فرصتی برای طراحی چارچوب‌های یکپارچه فراهم می‌کنند که به‌طور هم‌زمان عملکرد انرژی، رفاه کاربران و پایداری زیست‌محیطی را بهبود بخشند. از منظر نظری، این مقاله مدل مفهومی جدیدی مبتنی بر تعامل پویا و تعادل میان سه مؤلفه ارائه می‌دهد و از منظر عملی، بر ضرورت طراحی هم‌زمان بازشوها، سایه‌اندازها و کیفیت دید تأکید می‌کند. رفع این شکاف‌ها برای دستیابی به طراحی معماری انسان‌محور و پایدار ضروری بوده و پژوهش‌های آتی باید رویکردهای بهینه‌سازی چندمعیاره را در اولویت قرار دهند.

استناد به این مقاله: مجیدی، مهتاب؛ صحراگرد منفرد، ندا و خان محمدی، محمدعلی. (۱۴۰۴). بررسی تعامل مؤلفه‌های آسایش بصری در ساختمان‌ها و تأثیر آن بر عملکرد پایدار. *راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم‌های پایدار*، ۱(۱)، ۱۲۹-۱۱۹. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252597>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252597>

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

نور روز و دسترسی به دید بیرونی دو عنصر اساسی در شکل‌گیری کیفیت محیط داخلی ساختمان‌ها محسوب می‌شوند. نور طبیعی نه تنها به عنوان یک استراتژی برای کاهش وابستگی به روشنایی مصنوعی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی عمل می‌کند، بلکه تأثیرات مثبتی نیز بر سلامت جسمی و روانی ساکنان دارد. مطالعات نشان داده‌اند که قرار گرفتن در معرض نور روز می‌تواند به افزایش تمرکز و بهره‌وری، نشاط و کاهش علائم افسردگی و اضطراب کمک کند (Alrubaih et al., 2013; Krüger et al., 2018). از سوی دیگر، وجود دید بیرونی با ایجاد ارتباط بصری با طبیعت و محیط اطراف، نقش مهمی در ارتقای رضایت کاربران، کاهش تنش و بهبود کیفیت زندگی دارد (Farivar & Teimourtash, 2023; Rezaei et al., 2024).

با وجود این شواهد روشن، طراحی ساختمان‌ها همچنان با چالش‌های متعددی در برقراری تعادل بین صرفه‌جویی انرژی و آسایش بصری کاربران مواجه است. راهکارهای انرژی‌محوری مانند کوچک‌کردن پنجره‌ها یا استفاده از سیستم‌های کنترل تابش، هرچند در کاهش بار انرژی مؤثرند، می‌توانند به طور جدی کیفیت نور طبیعی و دسترسی به دید بیرونی را محدود کنند (Pilechiha et al., 2020). به‌طور مشابه، الگوریتم‌های بهینه‌سازی ساختمان اغلب شاخص‌های انرژی را در اولویت قرار می‌دهند و تمایلات کاربران نسبت به شرایط نوری و بصری را کمتر در نظر می‌گیرند (Ma & Pan, 2021). این تضاد آشکار بین کارایی انرژی و تجربه کاربری، گویای آن است که آسایش بصری یک پدیده چندبعدی است و نمی‌توان آن را تنها با یک شاخص واحد ارزیابی کرد.

همچنین، اگرچه تعداد قابل توجهی از پژوهش‌ها در حوزه نور روز انجام شده‌اند، بیشتر آن‌ها بر یک بعد خاص متمرکز بوده‌اند. برای مثال، برخی مطالعات تأثیر نور طبیعی بر سلامت یا بهره‌وری کاربران را بررسی کرده‌اند بدون آنکه به مسئله خیرگی یا کیفیت دید بیرونی بپردازند. در مقابل، برخی دیگر صرفاً بر تحلیل خیرگی تمرکز کرده‌اند (Farivar & Teimourtash, 2023). این رویکردهای تک‌بعدی اگرچه در شناسایی جنبه‌های خاص ارزشمندند، اما تصویری جامع و یکپارچه از آسایش بصری ارائه نمی‌دهند.

در سال‌های اخیر، تلاش‌هایی برای یکپارچه‌سازی ابعاد مختلف آسایش بصری صورت گرفته است. مطالعاتی تحلیل انرژی را با ارزیابی نور روز و کیفیت دید ترکیب کرده‌اند و نشان داده‌اند که چنین هم‌زمانی می‌تواند هم رفاه کاربران و هم کارایی انرژی ساختمان‌ها را بهبود بخشد (De Luca et al., 2022; Le et al., 2022; Mahdavinejad et al., 2024). همچنین رویکردهایی یکپارچه برای بررسی نور روز به همراه دید و منظر نیز ارائه شده است که آسایش بصری را در هر دو رویکرد مورد بررسی قرار می‌دهد و بیان می‌کنند که بی‌توجهی به تعادل بین نورروز و کیفیت دید می‌تواند موجب نارضایتی کاربران شود (Dabaj et al., 2022; Nourkojouri et al., 2021).

پژوهش‌ها در حوزه‌ی نور روز، خیرگی و کیفیت دید را می‌توان در سه دسته‌ی اصلی جای داد؛ دسته اول رویکرد انرژی محور، دسته دوم مطالعات تک‌بعدی بر آسایش بصری بدون توجه به دید و منظر و دسته سوم تلاش‌های جامع‌نگر برای تلفیق عوامل مختلف.

رویکردهای انرژی محور

بخش عمده‌ای از تحقیقات اولیه در حوزه ساختمان، بر کاهش بار انرژی متمرکز بوده‌اند و در این مطالعات، نور روز به عنوان ابزاری برای صرفه‌جویی انرژی در نظر گرفته شده است. در این رویکردها، اغلب جنبه‌های انسانی و تجربه کاربر کمتر مورد توجه قرار گرفته است. (Pilechiha et al., 2020) نشان دادند که بسیاری از راهکارهای طراحی پنجره که با هدف بهینه‌سازی انرژی ارائه می‌شوند، ممکن است کیفیت نور طبیعی و دسترسی به دید بیرونی را کاهش دهند و در نتیجه تجربه کاربران در فضاهای داخلی تحت تأثیر قرار گیرد. در پژوهشی دیگر نیز تأکید کردند که الگوریتم‌های

بهینه‌سازی ساختمان اغلب شاخص‌های انرژی را در اولویت قرار می‌دهند و تمایلات کاربران نسبت به شرایط نوری و بصری را کمتر در نظر می‌گیرند (Ma & Pan, 2021). این یافته‌ها نشان می‌دهند که دستیابی به بهره‌وری انرژی بدون در نظر گرفتن آسایش بصری، ممکن است تناقضی جدی در مفهوم طراحی پایدار ایجاد کند.

نوادا و همکاران^۱ (۲۰۱۶)، با استفاده از رویکردهای نوین، کاهش مصرف انرژی را با بهبود پارامترهای نوری پیوند زدند و نشان دادند که طراحی هوشمندانه‌ی نور روز می‌تواند به صرفه‌جویی انرژی کمک کند. با این حال، این رویکردها عمدتاً ابزارمحور هستند و کمتر به کیفیت تجربه انسانی و رفاه کاربران پرداخته‌اند.

رویکردهای تک‌بعدی بر آسایش بصری (بدون در نظر گرفتن دید)

دسته دوم پژوهش‌ها بیشتر بر یک یا دو مؤلفه از آسایش بصری تمرکز داشته‌اند و کیفیت دید بیرونی را نادیده گرفته‌اند. برخی مطالعات نشان می‌دهند که نور طبیعی دارای تأثیر دوگانه است: از یک سو، سلامت جسمی و روانی، بهره‌وری و تمرکز کاربران را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌تواند باعث خیرگی و آزار بصری شود. این مطالعات بر اهمیت مدیریت دقیق نور روز در فضاهای داخلی تأکید دارند (Alrubaih et al., 2018; Krüger et al., 2013).

تحقیقاتی دیگر به طور خاص به تحلیل خیرگی پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که کنترل نادرست خیرگی می‌تواند آسایش بصری کاربران را به شدت کاهش دهد. اگرچه این مطالعات در شناسایی مشکلات جزئی مفید هستند، اما به دلیل نادیده گرفتن کیفیت دید، تصویری جامع از آسایش بصری ارائه نمی‌کنند (Farivar & Teimourtash, 2023; Rezaei et al., 2024).

برخی تحقیقات نیز تمرکز خود را بر نور روز قرار داده‌اند. حسینی و همکاران^۲ (۲۰۱۹)، با بررسی نماهای متحرک، تلاش کردند تا با افزایش نفوذ نور طبیعی، آسایش بصری کاربران را بهبود بخشند. لی و همکاران^۳ (۲۰۱۹) نیز طراحی آتریوم را به عنوان راهکاری برای ایجاد تعادل بین مصرف انرژی و آسایش بصری مطرح کردند و نشان دادند که بهبود پارامترهای نوری می‌تواند هم به کاهش مصرف انرژی و هم ارتقای رفاه کاربران منجر شود. همچنین، مودنی و قیاباکلو^۴ (۲۰۱۶) نشان دادند که استفاده از روش‌های کنترل نور روز، مانند طاقچه‌های نوری، می‌تواند کیفیت نور داخلی را بهبود بخشد و مصرف انرژی را کاهش دهد.

فاسی و بوداوی^۵ (۲۰۱۵) به اهمیت طراحی پنجره در عملکرد انرژی و آسایش بصری تأکید کردند و بیان کردند که صرفه‌جویی انرژی بدون ملاحظات بصری می‌تواند اثرات منفی بر تجربه کاربران داشته باشد. عبدلحمید و همکاران^۶ (۲۰۲۳) نیز نشان دادند که پوسته و نمای ساختمان، با تحلیل پارامتریک بازشوها، نقش کلیدی در ارتقای کیفیت نور و آسایش بصری دارند.

مطالعاتی دیگری با بررسی نقش عوامل محیطی مانند نوع آسمان، هندسه شهری و بازتابندگی مصالح، و همچنین با بررسی فضاهای مطالعاتی در کاربری آموزشی، نشان داده‌اند که بهبود استفاده از نور روز می‌تواند هم آسایش بصری را ارتقا دهد و هم مصرف انرژی را کاهش دهد (Nasrollahi & Shokri, 2016). همچنین نیز بهینه‌سازی سایه‌اندازها را به عنوان راهکاری برای کاهش انرژی و افزایش عملکرد نور روز معرفی کرده‌اند (Bazazzadeh et al., 2021).

¹ Navada et al

² Hosseini et al

³ Li et al

⁴ Moazzeni & Ghiabaklou

⁵ Fasi & Budaiwi

⁶ Abdelhamid et al

به طور خلاصه، این دسته از مطالعات نشان می‌دهد که نور روز تأثیرات مثبتی بر آسایش بصری و بالاتر بردن کیفیت زندگی کاربران می‌گذارد، اما عدم توجه به کیفیت دید باعث شده است که تصویر نهایی از آسایش بصری ناقص و تک‌بعدی باقی بماند.

رویکردهای جامع‌نگر

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی منتشر شده‌اند که به دنبال تلفیق معیارهای مختلف آسایش بصری و انرژی هستند. این تحقیقات نشان دادند که ترکیب تحلیل انرژی با ارزیابی نور روز و کیفیت دید می‌تواند هم صرفه‌جویی انرژی و هم بهبود رفاه کاربران را به همراه داشته باشد (De Luca et al., 2022; Mahdavinnejad et al., 2024).

فلامنت و همکاران^۱ (۲۰۲۲)، استفاده از ابزارهای سایه‌انداز پارچه‌ای را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که این سیستم‌ها می‌توانند ضمن کاهش مصرف انرژی، دید مطلوب کاربران را نیز حفظ کنند. نورکجوی و همکاران^۲ (۲۰۲۱) چارچوبی برای طراحی دفاتر اداری ارائه دادند که نور روز، خیرگی و دید بیرونی را به صورت هم‌پیوسته در نظر می‌گیرد. دباچ و همکاران^۳ (۲۰۲۲) نیز بیان می‌کند که نادیده گرفتن تعادل بین نور و دید می‌تواند باعث نارضایتی گسترده کاربران شود، یافته‌ای که با نتایج ولیتبار و همکاران^۴ (۲۰۲۱) در زمینه بهینه‌سازی سیستم‌های سایه بان تطبیق پذیر همسو است.

در پژوهشی دیگر در فضاهای آموزشی نشان دادند که ارتقای آسایش بصری نه تنها کیفیت محیط داخلی را بهبود می‌بخشد، بلکه می‌تواند راندمان یادگیری را نیز افزایش دهد (Bian et al., 2023). ایوانو و ساتو^۵ (۲۰۲۵) با تمرکز بر دیدگاه کاربران، نشان دادند که کیفیت دید بیرونی علاوه بر تأثیر بر عملکرد نور، اثرات فیزیولوژیکی و روانی قابل توجهی بر رفاه کاربران دارد. همچنین با تأکید بر این موضوع، با استفاده از رفتارهای تطبیقی کاربران، کیفیت دید را کمی‌سازی کرده و نشان دادند که این شاخص در کنار پارامترهای نوری می‌تواند به طراحی بهینه نما و حفظ آسایش بصری کمک کند (Rizi et al., 2024).

با وجود پیشرفت‌های انجام‌شده، هنوز تعداد کمی از مطالعات به صورت جامع به آسایش بصری پرداخته‌اند. بیشتر پژوهش‌ها فقط یکی از عوامل را بررسی می‌کنند و تعامل بین نور روز، خیرگی و دید بیرونی را در ارتباط با یکدیگر و به طور یکپارچه بررسی نمی‌کنند. بنابراین، توسعه چارچوب‌هایی که همزمان به انرژی و تجربه انسانی توجه داشته باشند و بعد فیزیکی را در کنار ابعاد فیزیولوژیکی و سلامت کاربران در نظر گیرد، همچنان یک ضرورت است.

مرور ادبیات نشان می‌دهد که آسایش بصری در ساختمان‌ها یک پدیده چندبعدی است که تنها با در نظر گرفتن هم‌زمان نور روز، کنترل خیرگی و کیفیت دید بیرونی می‌توان آن را به‌طور کامل ارزیابی کرد. پژوهش‌های انرژی‌محور بر کاهش مصرف انرژی تمرکز دارند، اما غالباً به کیفیت دید و تجربه کاربران توجه کمی داشته‌اند و همانطور که گفته شد نگاهی تک بعدی از نظر انرژی خطر کاهش رضایت افراد در بعد آسایش بصری را به همراه دارد. مطالعات تک‌بعدی بر آسایش بصری نشان می‌دهند که نور طبیعی سلامت، بهره‌وری و تمرکز کاربران را ارتقا می‌دهد، ولی بدون توجه به کیفیت دید، تصویر کامل آسایش بصری ارائه نمی‌شود. در مقابل، پژوهش‌های جامع‌نگر با ترکیب معیارهای انرژی، نور روز و کیفیت دید، هم بهره‌وری انرژی و هم رفاه کاربران را بهبود می‌بخشند. این رویکرد می‌تواند نگاهی یکپارچه از آسایش بصری ارائه دهد و در نهایت منجر به راه حل‌های طراحی کاربر محور همراه با کاهش مصرف انرژی ارائه دهد.

¹ Flamant et al

² Nourkojouri et al

³ Dabaj et al

⁴ Valitabar et al

⁵ Ivanov & Sato

جدول ۱ نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات آسایش بصری را در کاربری اداری و سپس آموزشی بررسی کرده‌اند و به فضاهای مسکونی توجه کمتری شده است، که این موضوع ضرورت تمرکز پژوهش‌های آتی بر محیط‌های مسکونی و طراحی کاربرمحور را مشخص می‌کند:

جدول ۱. خلاصه‌ای از مقالات مورد بررسی واقع شده، کاربری آن‌ها و هدف پژوهش
Table 1. Summary of the articles reviewed, their use, and research objective

کاربری	هدف	منبع
اداری	انرژی و آسایش بصری	(Fasi & Budaiwi, 2015)
آموزشی	آسایش بصری	(Bian et al., 2023)
اداری	انرژی و آسایش بصری	(Bazazzadeh et al., 2021)
اداری	آسایش بصری	(Nourkojouri et al., 2021)
اداری	آسایش بصری و آسایش حرارتی	(Rezaei et al., 2024)
آموزشی	آسایش بصری	(Dabaj et al., 2022)
اداری	انرژی و آسایش بصری	(Valitabar et al., 2021)
اداری	آسایش بصری	(Farivar & Teimourtash, 2023)
مسکونی	آسایش بصری	(Acosta et al., 2016)

با توجه به مرور مطالعات پیشین، اگرچه در سال‌های اخیر توجه به آسایش بصری و رویکردهای یکپارچه افزایش یافته است، بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها همچنان به صورت انرژی‌محور یا تک‌بعدی انجام شده‌اند و در بسیاری از مطالعات، کیفیت دید بیرونی در کنار نور روز و خیرگی مورد توجه کافی قرار نگرفته است؛ همچنین در مطالعاتی که عملکرد انرژی و آسایش بصری را هم‌زمان بررسی کرده‌اند، اولویت‌دهی به معیارهای انرژی در مواردی موجب کم‌رنگ شدن جنبه‌های انسانی و تجربه بصری کاربران شده است. افزون بر این، بخش عمده مطالعات موجود بر کاربری‌های اداری و آموزشی متمرکز بوده و محیط‌های مسکونی سهم بسیار محدودی از پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. از این رو، پژوهش حاضر با هدف مرور نظام‌مند و تحلیل محتوای مطالعات حوزه آسایش بصری، شناسایی روندهای غالب و تبیین شکاف‌های موجود در توجه هم‌زمان به نور روز، خیرگی، کیفیت دید بیرونی و عملکرد انرژی انجام شده است. در این راستا، مطالعات پیشین در سه رویکرد انرژی‌محور، تک‌بعدی و جامع طبقه‌بندی شده و میزان توجه آن‌ها به تعامل میان مؤلفه‌های آسایش بصری و همچنین کاربری مورد مطالعه بررسی می‌شود. دستاورد اصلی پژوهش، ارائه تصویری یکپارچه از تحول رویکردهای پژوهشی در حوزه آسایش بصری، آشکارسازی کمبود مطالعات جامع و به‌ویژه مسکونی، و تبیین ضرورت حرکت از بهینه‌سازی تک‌معیاره به سوی رویکردهای چندمعیاره و کاربرمحور است که می‌تواند مبنایی برای توسعه پژوهش‌های آینده در زمینه ایجاد تعادل میان عملکرد انرژی، کیفیت نور روز و کیفیت دید بیرونی در ساختمان‌های مسکونی باشد.

روش‌شناسی پژوهش

جامعه مورد مطالعه شامل پژوهش‌های علمی منتشرشده در زمینه آسایش بصری، نور روز، خیرگی، کیفیت دید و ارتباط آن‌ها با انرژی و رفاه کاربران در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ بود. انتخاب این بازه زمانی با هدف بررسی مطالعات یک دهه اخیر و شناسایی تحول رویکردهای پژوهشی از مطالعات عمدتاً تک‌بعدی و انرژی‌محور به سمت رویکردهای جامع‌تر و چندمعیاره انجام شد. این بازه زمانی همچنین امکان بررسی مطالعات جدیدتری را فراهم می‌کند که در آن‌ها مفاهیمی مانند کیفیت دید، رفاه کاربران و تجربه بصری در کنار معیارهای متداول نور روز و انرژی مورد توجه قرار گرفته‌اند.

جستجوی نظام‌مند مطالعات با استفاده از مجموعه‌ای از کلیدواژه‌های مرتبط با موضوع پژوهش و با بهره‌گیری از عملگرهای منطقی مناسب انجام شد تا پژوهش‌های مرتبط با آسایش بصری، نور روز، خیرگی، کیفیت دید، عملکرد انرژی و رفاه کاربران شناسایی شوند. جستجو در پایگاه‌های معتبر علمی بین‌المللی انجام گرفت و به‌منظور افزایش جامعیت نتایج، علاوه بر جستجوی الکترونیکی، فهرست منابع مطالعات کلیدی نیز به‌صورت دستی بررسی شد. این فرآیند با هدف شناسایی حداکثری مطالعات مرتبط و کاهش احتمال حذف پژوهش‌های مرتبط به دلیل تفاوت در واژگان یا محدودیت‌های جستجوی پایگاه‌ها انجام گرفت.

علاوه بر جستجوی پایگاه‌های علمی، برای افزایش جامعیت مرور، بررسی دستی فهرست منابع مقالات کلیدی نیز انجام شد. به این ترتیب، مقالات مرتبطی که ممکن بود به دلیل تفاوت در واژگان مورد استفاده یا محدودیت‌های جستجوی پایگاه‌ها در مرحله اولیه شناسایی نشده باشند، نیز مورد بررسی قرار گرفتند.

در مرحله نخست، مجموعاً ۷۸ مقاله از طریق جستجوی پایگاه‌های علمی و بررسی منابع مقالات کلیدی شناسایی شد. پس از حذف موارد نامرتبط و بررسی اولیه عنوان و چکیده، مقالاتی که ارتباط کافی با اهداف پژوهش نداشتند کنار گذاشته شدند. در مرحله دوم، متن کامل مقالات باقی‌مانده مورد مطالعه قرار گرفت و انطباق آن‌ها با معیارهای ورود و خروج بررسی شد. در نهایت، پس از ارزیابی ارتباط موضوعی، جامعیت محتوایی و کیفیت روش‌شناختی، ۳۰ مقاله برای تحلیل نهایی انتخاب شدند.

برای تحلیل یافته‌های مطالعات منتخب از تحلیل محتوای جهت‌دار استفاده شد. در این روش، کدگذاری داده‌ها بر اساس چارچوب مفهومی اولیه پژوهش انجام می‌شود و یافته‌های مطالعات پیشین در دسته‌های مفهومی مشخص سازمان‌دهی می‌شوند. در پژوهش حاضر، چارچوب اولیه بر اساس سه رویکرد اصلی شکل گرفت.

رویکرد انرژی‌محور: مطالعاتی که در آن‌ها کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد انرژی هدف اصلی بوده و مؤلفه‌های آسایش بصری یا تجربه کاربران در جایگاه ثانویه قرار داشته‌اند.

رویکرد تک‌بعدی آسایش بصری: مطالعاتی که بر یک یا چند مؤلفه محدود از آسایش بصری، مانند نور روز، خیرگی یا کیفیت دید تمرکز داشته‌اند، اما تعامل میان مؤلفه‌های مختلف را به‌صورت جامع بررسی نکرده‌اند.

رویکرد جامع و یکپارچه: مطالعاتی که دو یا چند مؤلفه آسایش بصری را در ارتباط با یکدیگر و یا در کنار عملکرد انرژی و رفاه کاربران مورد بررسی قرار داده‌اند.

این طبقه‌بندی صرفاً بر اساس عنوان مقاله انجام نشد، بلکه هدف اصلی مطالعه، مؤلفه‌های مورد ارزیابی، شاخص‌های مورد استفاده و میزان توجه به تعامل میان عوامل مختلف در نظر گرفته شد. علاوه بر طبقه‌بندی اصلی، مطالعات از نظر نوع کاربری ساختمان نیز دسته‌بندی شدند تا مشخص شود کدام گروه‌های کاربری در ادبیات موجود بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این بخش، کاربری‌های اداری، آموزشی، مسکونی و سایر کاربری‌های مرتبط از یکدیگر تفکیک شدند.

پس از کدگذاری، یافته‌های مطالعات در چارچوبی تطبیقی مورد بررسی قرار گرفتند. در این مرحله، تمرکز اصلی بر شناسایی الگوهای مشترک، تفاوت‌های رویکردی و خلأهای موجود در ادبیات بود. به‌طور خاص، چهار محور اصلی مورد توجه قرار گرفت: نحوه توجه به نور روز، میزان توجه به خیرگی، میزان و شیوه ارزیابی کیفیت دید بیرونی و نحوه ارتباط این مؤلفه‌ها با عملکرد انرژی و رفاه کاربران.

همچنین، توزیع مطالعات بر اساس کاربری ساختمان مورد بررسی قرار گرفت تا مشخص شود آیا رویکردهای جامع و کاربرمحور به‌طور یکسان در انواع ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند یا خیر. نتایج این تحلیل امکان مقایسه

میان رویکردهای مختلف و شناسایی حوزه‌هایی را فراهم کرد که در آن‌ها پژوهش‌های موجود از پوشش کافی برخوردار نیستند.

برای افزایش اعتبار فرآیند انتخاب و تحلیل مطالعات، مراحل غربالگری و کدگذاری توسط دو پژوهشگر بررسی شد و موارد اختلاف از طریق بررسی مجدد مقالات و بحث و توافق نهایی تعیین تکلیف گردید. استفاده از چند پایگاه علمی معتبر و همچنین بررسی دستی منابع مقالات کلیدی نیز با هدف کاهش احتمال حذف مطالعات مرتبط انجام گرفت. علاوه بر این، استفاده از چارچوب کدگذاری مشخص، امکان مقایسه منظم مطالعات و کاهش تأثیر قضاوت‌های فردی در فرآیند تحلیل را فراهم کرد.

با وجود تلاش برای انجام یک مرور نظام‌مند و جامع، این پژوهش با برخی محدودیت‌ها مواجه است. نخست، به دلیل ناهمگونی قابل توجه مطالعات از نظر روش‌های تحقیق، شاخص‌های ارزیابی، شرایط شبیه‌سازی و معیارهای گزارش نتایج، امکان انجام فراتحلیل کمی و ترکیب آماری مستقیم یافته‌ها وجود نداشت. از این رو، سنتز یافته‌ها به‌صورت کیفی و بر اساس تحلیل محتوای جهت‌دار انجام شد. دوم، احتمال وجود مطالعات مرتبطی که در پایگاه‌های مورد استفاده نمایه نشده‌اند، به‌طور کامل قابل حذف نیست؛ هرچند بررسی دستی منابع مقالات کلیدی برای کاهش این محدودیت انجام گرفت. سوم، محدود کردن جستجو به مطالعات منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ ممکن است موجب حذف برخی مطالعات بنیادین پیش از این دوره شده باشد. در نهایت، تمرکز عمده بر منابع انگلیسی‌زبان ممکن است باعث شود بخشی از پژوهش‌های مرتبط منتشرشده به زبان‌های دیگر در مرور حاضر منعکس نشده باشند (Heidari et al., 2025; Hsieh & Shannon, 2005; Lee et al., 2025; Petticrew & Roberts, 2008; Shafavi et al., 2020).

یافته‌ها و بحث

مرور نظام‌مند مطالعات منتخب نشان داد که پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه آسایش بصری، بر اساس هدف، مؤلفه‌های مورد بررسی و میزان توجه به ارتباط میان عوامل مختلف، در سه رویکرد اصلی انرژی‌محور، تک‌بعدی و جامع و یکپارچه قابل طبقه‌بندی هستند. بررسی روند زمانی مطالعات نشان می‌دهد که رویکردهای مختلف در طول دوره مورد بررسی از نظر میزان توجه به ابعاد مختلف آسایش بصری تحول یافته‌اند. در مطالعات اولیه‌تر، تمرکز بیشتری بر عملکرد انرژی و شاخص‌های فیزیکی وجود داشته، در حالی که در سال‌های اخیر توجه به ابعاد مختلف تجربه بصری کاربران و ارتباط میان مؤلفه‌های آسایش بصری افزایش یافته است.

رویکردهای انرژی‌محور: نخستین دسته شامل مطالعاتی است که هدف اصلی آن‌ها بهبود عملکرد انرژی ساختمان و کاهش مصرف انرژی بوده است. این رویکرد عمدتاً در سال‌های ابتدایی دوره مورد بررسی، یعنی حدود سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰، سهم بیشتری از مطالعات را به خود اختصاص داده است. در این مطالعات، نور روز عمدتاً به‌عنوان ابزاری برای کاهش نیاز به روشنایی مصنوعی و در نتیجه کاهش مصرف انرژی مورد توجه قرار گرفته و سایر ابعاد تجربه بصری کاربران در اولویت پایین‌تری قرار داشته‌اند. بررسی این مطالعات نشان داد که در بسیاری از فرآیندهای بهینه‌سازی، شاخص‌های مرتبط با عملکرد انرژی به‌عنوان اهداف اصلی تعریف شده‌اند، در حالی که مؤلفه‌هایی مانند خیرگی، کیفیت دید و رضایت بصری کاربران کمتر در فرآیند تصمیم‌گیری وارد شده‌اند. در نتیجه، اگرچه این رویکردها در شناسایی راهکارهای مؤثر برای کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد ساختمان نقش مهمی داشته‌اند، محدود بودن معیارهای ارزیابی موجب شده است که پیامدهای طراحی بر تجربه بصری کاربران کمتر مورد توجه قرار گیرد. از این

منظر، یافته‌های این گروه نشان می‌دهد که تمرکز صرف بر شاخص‌های انرژی نمی‌تواند به‌تنهایی تضمین‌کننده کیفیت مطلوب محیط داخلی باشد و ممکن است میان عملکرد انرژی و نیازهای بصری کاربران تعارض ایجاد شود.

رویکردهای تک‌بعدی آسایش بصری: دسته دوم شامل مطالعاتی است که بر یک یا دو مؤلفه از آسایش بصری تمرکز داشته‌اند و تعامل میان مؤلفه‌های مختلف را به‌صورت جامع بررسی نکرده‌اند. بخشی از این مطالعات بر آثار مثبت نور روز بر سلامت، بهره‌وری و عملکرد کاربران تمرکز داشته و نقش نور طبیعی را در ارتقای کیفیت محیط داخلی بررسی کرده‌اند، اما در ارزیابی خود به پیامدهای احتمالی آن مانند خیرگی یا محدودیت کیفیت دید بیرونی توجه کافی نداشته‌اند. گروه دیگری از مطالعات به‌طور مشخص بر مسئله خیرگی تمرکز کرده‌اند و تلاش داشته‌اند میزان ناراحتی بصری ناشی از تابش مستقیم یا نامناسب را ارزیابی و کنترل کنند، در حالی که کیفیت دید بیرونی در آن‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، برخی پژوهش‌ها عمدتاً بر کمیت و توزیع نور روز تمرکز داشته‌اند و معیارهایی برای سنجش کیفیت منظره و دسترسی بصری کاربران به محیط بیرون در نظر نگرفته‌اند.

در مجموع، یافته‌های این دسته نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات تک‌بعدی در شناخت و تحلیل عوامل مشخص مؤثر بر آسایش بصری ارزشمند بوده‌اند، تمرکز محدود آن‌ها بر یک یا دو مؤلفه باعث شده است ارتباط میان ابعاد مختلف آسایش بصری کمتر آشکار شود. به بیان دیگر، افزایش کیفیت یک مؤلفه لزوماً به معنای بهبود کلی تجربه بصری نیست؛ زیرا ممکن است یک راهکار که موجب بهبود نور روز می‌شود، هم‌زمان احتمال خیرگی را افزایش دهد یا بر کیفیت دید بیرونی اثر منفی بگذارد. بنابراین، این دسته از مطالعات تصویری نسبتاً گسسته از آسایش بصری ارائه کرده‌اند و ضرورت توجه هم‌زمان به مؤلفه‌های مختلف را برجسته می‌سازند.

رویکردهای جامع و یکپارچه: دسته سوم شامل مطالعاتی است که در آن‌ها تلاش شده است چندین مؤلفه مرتبط با آسایش بصری و در برخی موارد عملکرد انرژی، به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرند. بررسی روند زمانی مطالعات نشان داد که این رویکرد، به‌ویژه از حدود سال ۲۰۲۱ به بعد، رشد قابل توجهی داشته است. در این مطالعات، نور روز، کیفیت دید، خیرگی و عملکرد انرژی بیش از گذشته به‌عنوان مؤلفه‌های مرتبط با یک مسئله واحد در نظر گرفته شده‌اند. یافته‌های این گروه نشان می‌دهد که ترکیب هم‌زمان معیارهای انرژی و آسایش بصری می‌تواند امکان دستیابی به راهکارهایی را فراهم کند که علاوه بر کاهش مصرف انرژی، شرایط بصری مطلوب‌تری را نیز برای کاربران ایجاد کنند.

تحلیل توزیع مطالعات نشان داد که رویکرد جامع و یکپارچه هنوز از پوشش کافی در همه زمینه‌های ساختمانی برخوردار نیست. بیش از ۶۰ درصد مطالعات بررسی‌شده به کاربری اداری اختصاص داشته‌اند و پس از آن، کاربری آموزشی بیشترین سهم را به خود اختصاص داده است؛ در مقابل، کاربری مسکونی تنها حدود ۲ درصد از مطالعات را شامل شده است. این توزیع نشان می‌دهد که اگرچه رویکردهای جامع در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند، کاربرد آن‌ها در محیط‌های مسکونی همچنان بسیار محدود است. این مسئله از آن جهت اهمیت دارد که شرایط بصری در محیط مسکونی به‌طور مستقیم با تجربه روزمره و کیفیت زندگی ساکنان ارتباط دارد و نیازهای بصری کاربران در این محیط می‌تواند با محیط‌های اداری و آموزشی متفاوت باشد.

جدول ۱. طبقه‌بندی مطالعات بررسی‌شده بر اساس رویکرد پژوهشی و ویژگی‌های اصلی

Table 2. Classification of reviewed studies based on research approach and main characteristics

رویکرد پژوهشی	دوره غالب	ویژگی اصلی مطالعات	مؤلفه‌های مورد توجه	محدودیت اصلی
انرژی‌محور	۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰	تمرکز بر کاهش مصرف انرژی و استفاده از نور روز برای کاهش نیاز به روشنایی مصنوعی	عمدتاً انرژی و نور روز	توجه محدود به خیرگی، کیفیت دید و تجربه کاربران
تک‌بعدی آسایش بصری	عمدتاً در طول دوره مرور	تمرکز بر یک یا دو مؤلفه از آسایش بصری	نور روز، خیرگی یا کیفیت دید به‌صورت جداگانه	ارائه تصویری گسسته و ناقص از آسایش بصری و عدم توجه کافی به تعامل مؤلفه‌ها
جامع و یکپارچه	عمدتاً از ۲۰۲۱ به بعد	بررسی هم‌زمان چند مؤلفه آسایش بصری و در برخی موارد عملکرد انرژی	نور روز، خیرگی، کیفیت دید، انرژی و رفاه کاربران	تعداد محدود مطالعات با بررسی هم‌زمان و متوازن هر سه مؤلفه

در مجموع، یافته‌های مرور نشان می‌دهد که ادبیات موجود از یک روند کلی حرکت از رویکردهای عمدتاً انرژی‌محور و تک‌بعدی به سمت رویکردهای جامع‌تر و یکپارچه‌تر پیروی کرده است. با این حال، این تحول هنوز به‌طور کامل به همه مؤلفه‌های آسایش بصری و همه انواع کاربری‌های ساختمانی تسری نیافته است. به‌ویژه، کیفیت دید بیرونی همچنان در مقایسه با نور روز و انرژی کمتر در چارچوب‌های یکپارچه مورد توجه قرار گرفته و محیط‌های مسکونی نیز سهم بسیار محدودی از مطالعات را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین، محدود بودن تعداد مطالعاتی که نور روز، خیرگی و کیفیت دید را به‌صورت هم‌زمان و در تعامل با یکدیگر بررسی کرده‌اند، نشان‌دهنده تداوم شکاف موجود در توسعه رویکردهای جامع و کاربرمحور برای ارزیابی آسایش بصری است.

نتیجه‌گیری

مرور نظام‌مند ادبیات نشان داد که آسایش بصری یک پدیده چندبعدی است و به تعامل هم‌زمان نور روز، کنترل خیرگی و کیفیت دید بیرونی وابسته است. رویکردهای صرفاً انرژی‌محور یا تک‌بعدی، اگرچه در حل بخشی از مشکل مؤثر بوده‌اند، در عمل به دلیل نادیده گرفتن بعد انسانی، منجر به کاهش رضایت، کاهش سلامت روان و افزایش نارضایتی کاربران شده‌اند. در مقابل، رویکردهای جامع نشان داده‌اند که امکان طراحی چارچوب‌های یکپارچه‌ای وجود دارد که به‌طور هم‌زمان عملکرد انرژی را بهبود بخشند، کیفیت بصری را ارتقا دهند و سلامت کاربران را تضمین کنند. از منظر نظری، این مقاله یک مدل مفهومی جدید برای آسایش بصری پیشنهاد می‌کند که بر تعامل پویای سه مؤلفه تأکید دارد و در آن «تعادل» به جای «بهینه‌سازی تک‌معیاره» نقش کلیدی ایفا می‌کند. از منظر عملی، یافته‌ها نشان می‌دهند که معماران و طراحان باید بازشوها، سایه‌اندازها و کیفیت منظر را به‌طور هم‌زمان در فرآیند طراحی مد نظر قرار دهند، نه اینکه اولویت مطلق را به انرژی یا صرفاً نور بدهند. مهم‌ترین شکاف شناسایی‌شده، کمبود پژوهش در محیط‌های مسکونی است که ضرورت انجام مطالعات آتی با رویکرد کاربرمحور در این بستر را دوچندان می‌کند. همچنین، فقدان ابزارهای ارزیابی یکپارچه که بتوانند هم‌زمان هر سه مؤلفه آسایش بصری را در کنار عملکرد انرژی مورد سنجش قرار دهند، یکی دیگر از شکاف‌های اساسی محسوب می‌شود.

پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده بر توسعه ابزارهای ارزیابی چندمعیاره مبتنی بر شاخص‌های ترکیبی و انجام مطالعات میدانی در ساختمان‌های مسکونی با مشارکت مستقیم کاربران متمرکز شوند تا بتوان هم به کاهش مصرف انرژی و هم به ارائه تجربه فضایی مطلوب و سلامت‌محور برای ساکنان دست یافت. همچنین، به‌کارگیری روش‌های

یادگیری ماشین و شبیه‌سازی‌های پویا برای پیش‌بینی رفتار ترکیبی این مؤلفه‌ها، یکی از مسیرهای پژوهشی امیدوارکننده برای پر کردن شکاف موجود محسوب می‌شود.

References

- Abdelhamid, Y. M. S., Wahba, S. M., & ElHusseiny, M. (2023). The effect of parametric patterned façade variations on daylight quality, visual comfort, and daylight performance in architecture studio-based tutoring. *Journal of Daylighting*, 10(2), 173-191. DOI: 10.15627/jd.2023.15
- Acosta, I., Campano, M. Á., & Molina, J. F. (2016). Window design in architecture: Analysis of energy savings for lighting and visual comfort in residential spaces. *Applied energy*, 168, 493-506. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.005
- Alrubaih, M., Zain, M., Alghoul, M., Ibrahim, N., Shameri, M., & Elayeb, O. (2013). Research and development on aspects of daylighting fundamentals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 494-505. DOI: 10.1016/j.rser.2012.12.057
- Bazazzadeh, H., Świt-Jankowska, B., Fazeli, N., Nadolny, A., Safar Ali Najar, B., Hashemi Safaei, S. S., & Mahdavinejad, M. (2021). Efficient shading device as an important part of daylightophil architecture; a designerly framework of high-performance architecture for an office building in Tehran. *Energies*, 14(24), 8272. DOI: 10.3390/en14248272
- Bian, Y., Chen, Y., Sun, Y., Ma, Y., Yu, D., & Leng, T. (2023). Simulation of daylight availability, visual comfort and view clarity for a novel window system with switchable blinds in classrooms. *Building and Environment*, 235, 110243. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110243
- Dabaj, B., Rahbar, M., & Fakhr, B. V. (2022). Impact of different shading devices on daylight performance and visual comfort of A four opening sides' reading room in rasht. *Journal of Daylighting*, 9(1), 97-116. DOI: 10.15627/jd.2022.7
- De Luca, F., Sepúlveda, A., & Varjas, T. (2022). Multi-performance optimization of static shading devices for glare, daylight, view and energy consideration. *Building and Environment*, 217, 109110. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109110
- Farivar, S., & Teimourtash, S. (2023). Impact of window design on dynamic daylight performance in an office building in Iran. *Journal of Daylighting*, 10(1), 31-44. DOI: 10.15627/jd.2023.3
- Fasi, M. A., & Budaiwi, I. M. (2015). Energy performance of windows in office buildings considering daylight integration and visual comfort in hot climates. *Energy and Buildings*, 108, 307-316. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.09.024
- Flamant, G., Bustamante, W., Tzempelikos, A., & Vera, S. (2022). Evaluation of view clarity through solar shading fabrics. *Building and Environment*, 212, 108750. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108750
- Heidari, B., Abravesh, M., & Khodabakhshian, M. (2025). Human-centric lighting in office spaces: Daylight strategies and environmental influences on visual effects and circadian health. *Building and Environment*, 113538. DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.113538
- Hosseini, S. M., Mohammadi, M., & Guerra-Santin, O. (2019). Interactive kinetic façade: Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant's positions by 2D and 3D shape changes. *Building and Environment*, 165, 106396. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106396
- Hsieh, H.-F., & Shannon, S. E. (2005). Three approaches to qualitative content analysis. *Qualitative health research*, 15(9), 1277-1288.
- Ivanov, M., & Sato, J. (2025). Occupant-Centric Visual Comfort Assessment and Optimization of Passive Solar Façade Shading Systems through View-Based Analysis of Daylight Glare Probability, View Content, and Spatial Frequency Distribution. *Journal of Daylighting*, 12(2), 293-305. DOI: 10.15627/jd.2025.20
- Krüger, E. L., Tamura, C., & Trento, T. W. (2018). Identifying relationships between daylight variables and human preferences in a climate chamber. *Science of the Total Environment*, 642, 1292-1302. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.164
- Le, D. M., Park, D. Y., Baek, J., Karunyasopon, P., & Chang, S. (2022). Multi-criteria decision making for adaptive façade optimal design in varied climates: Energy, daylight, occupants' comfort, and outdoor view analysis. *Building and Environment*, 223, 109479. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109479

- Lee, J., Kim, H., Lim, E., Shin, M., & Suk, J. Y. (2025). Reflected solar glare from building facades: A critical review of assessment methodologies. *Building and Environment*, 113902. DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.113902
- Li, J., Ban, Q., Chen, X., & Yao, J. (2019). Glazing sizing in large atrium buildings: A perspective of balancing daylight quantity and visual comfort. *Energies*, 12(4), 701. DOI: 10.3390/en12040701
- Ma, G., & Pan, X. (2021). Research on a visual comfort model based on individual preference in china through machine learning algorithm. *Sustainability*, 13(14), 7602. DOI: 10.3390/su13147602
- Mahdavinejad, M., Bazazzadeh, H., Mehrvarz, F., Berardi, U., Nasr, T., Pourbagher, S., & Hoseinzadeh, S. (2024). The impact of facade geometry on visual comfort and energy consumption in an office building in different climates. *Energy Reports*, 11, 1-17. DOI: 10.1016/j.egyr.2023.11.021
- Moazzeni, M. H., & Ghiabaklou, Z. (2016). Investigating the influence of light shelf geometry parameters on daylight performance and visual comfort, a case study of educational space in Tehran, Iran. *Buildings*, 6(3), 26. DOI: 10.3390/buildings6030026
- Nasrollahi, N., & Shokri, E. (2016). Daylight illuminance in urban environments for visual comfort and energy performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 861-874. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.052
- Nasrollahi, N., & Shokry, E. (2020). Parametric analysis of architectural elements on daylight, visual comfort, and electrical energy performance in the study spaces. *Journal of Daylighting*, 7(1), 57-72. DOI: 10.15627/jd.2020.5
- Navada, S. G., Adiga, C. S., & Kini, S. G. (2016). Prediction of daylight availability for visual comfort. *Int. J. Appl. Eng. Res*, 11(7), 4711-4717.
- Nourkojouri, H., Shafavi, N. S., Tahsildoost, M., & Zomorodian, Z. S. (2021). Development of a machine-learning framework for overall daylight and visual comfort assessment in early design stages. *Journal of Daylighting*, 8(2), 270-283. DOI: 10.15627/jd.2021.21
- Petticrew, M., & Roberts, H. (2008). *Systematic reviews in the social sciences: A practical guide*. John Wiley & Sons.
- Pilechiha, P., Mahdavinejad, M., Rahimian, F. P., Carnemolla, P., & Seyedzadeh, S. (2020). Multi-objective optimisation framework for designing office windows: quality of view, daylight and energy efficiency. *Applied Energy*, 261, 114356. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114356>
- Rezaei, F., Sangin, H., Heiranipour, M., & Attia, S. (2024). Multi-objective Optimization of Window and Light Shelf Design in Office Buildings to Improve Occupants' Thermal and Visual Comfort. *Journal of Daylighting*, 11. DOI: 10.15627/jd.2024.4
- Rizi, R. A., Bagherzadeh, F., Schnabel, M. A., & Bakshi, N. (2024). A design methodology to consider occupants' spatial adjustment and manage view content in adaptive façade design for improving visual comfort. *Architectural Engineering and Design Management*, 20(1), 168-190. DOI: 10.1080/17452007.2023.2259394
- Shafavi, N. S., Zomorodian, Z. S., Tahsildoost, M., & Javadi, M. (2020). Occupants visual comfort assessments: A review of field studies and lab experiments. *Solar energy*, 208, 249-274. DOI: 10.1016/j.solener.2020.07.058
- Valitabar, M., Mahdavinejad, M., Skates, H., & Pilechiha, P. (2021). A dynamic vertical shading optimisation to improve view, visual comfort and operational energy. *Open House International*, 46(3), 401-415. DOI: 10.1108/OHI-02-2021-0031



Nitrate Removal from Contaminated Water Sources Using Pyrite-Based Autotrophic Denitrification

Fatemeh Naderi^a, Shayan Shariati Feyzabadi^{a*}, Alireza Bazargan^a, Majid Baghdadi^a

^aDepartment of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

*Corresponding author: shayan_shariati@ut.ac.ir, <https://orcid.org/0000-0003-3441-209X>

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 2026/01/30

Received in revised form:

2026/02/20

Accepted 2026/02/31

Available online: 2026/03/06

Keywords:

Autotrophic denitrification,
Constructed wetland,
Mineral electron donor,
Nitrate removal,
Pyrite (FeS₂).

ABSTRACT

In recent years, autotrophic denitrification has attracted considerable attention as an effective alternative to heterotrophic processes due to its independence from external organic carbon sources, lower sludge production, and reduced operational costs. This review paper examines the role of inorganic electron donors in nitrate removal, with particular emphasis on pyrite (FeS₂). Owing to its natural abundance, chemical stability, low cost, and the simultaneous oxidation of iron and sulfur, pyrite has demonstrated high efficiency in removing nitrate from contaminated water. Furthermore, pyrite oxidation creates favorable conditions for the growth and activity of autotrophic denitrifying bacteria, enabling efficient nitrate removal without the addition of external carbon sources. Recent studies have also shown that FeS₂ can contribute to phosphorus removal through the formation of iron-containing compounds as well as adsorption and precipitation mechanisms. In Iran, nitrate contamination is considered one of the most critical groundwater quality challenges, particularly in arid and semi-arid regions where groundwater serves as the primary source of drinking water. Investigations conducted in several regions of the country, including Tehran–Karaj, Mashhad, Isfahan, Robat Karim, and Kerman, have reported nitrate concentrations exceeding the World Health Organization guideline value (50 mg/L), with levels surpassing 160 mg/L in some wells. The primary sources of this contamination include intensive agricultural activities, excessive application of nitrogen fertilizers, wastewater infiltration, and inadequate groundwater management. The persistence of these conditions poses serious risks to public health, especially for children, and threatens the sustainability of water resources. Therefore, implementing advanced treatment technologies, particularly pyrite-based autotrophic denitrification, represents a promising, cost-effective, and sustainable approach for the simultaneous removal of nitrate and phosphorus and the improvement of groundwater quality in Iran.

Cite this article: Naderi, F., Shariati, S., Bazargan, A., & Baghdadi, M. (2026). Nitrate Removal from Contaminated Water Sources Using Pyrite-Based Autotrophic Denitrification. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 1(1), 134-159. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252598>



Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252598>

Introduction

Water covers more than 70% of the Earth's surface; however, freshwater resources are severely limited, with only about 3% of the total water on Earth being fresh and usable. Of this, nearly 70% is frozen in ice and snow, approximately 29% exists as soil moisture or deep groundwater, and less than 1% is found in rivers and lakes. Although freshwater resources are continuously replenished through precipitation, rapid population growth and declining water quality and quantity have created critical imbalances between water supply and demand in many regions worldwide. According to the European Union Water Framework Directive guidelines "pressure" is defined as the negative effects of human activities on water resources. Among various pollution sources, diffuse pollution from human activities is recognized as the primary source of water contamination. Since the 1970s, nitrate pollution from intensive agriculture has become one of the most significant environmental challenges globally. Nitrate is highly soluble in water and does not readily attach to soil particles, making it susceptible to leaching into groundwater.

The World Health Organization has recommended a maximum allowable nitrate concentration of 50 mg/L in drinking water. High nitrate concentrations can disrupt iodine absorption and cause hyperthyroidism. Furthermore, numerous studies have demonstrated significant associations between elevated nitrate levels in drinking water and food with increased infant mortality, methemoglobinemia, diabetes in children, hypertension, cardiovascular diseases, neurological disorders, congenital anomalies, miscarriage, Alzheimer's disease, and various cancers. In Iran, nitrate pollution is one of the most pressing challenges for groundwater quality, particularly in arid and semi-arid regions where groundwater serves as the primary source of drinking water. Given these concerns, developing efficient nitrate removal methods is essential. While physicochemical processes such as reverse osmosis, ion exchange, and electrodialysis have been employed, they are economically unfeasible for large-scale applications due to high costs and secondary waste production. In contrast, biological denitrification offers a cost-effective and sustainable alternative. Recently, autotrophic denitrification has attracted considerable attention, where inorganic electron donors such as sulfur, iron, and hydrogen replace organic compounds. Among these, pyrite (FeS_2) has emerged as a promising option for natural treatment systems due to its high stability, simultaneous nitrate and phosphate removal capability, and independence from external carbon sources.

Method

This study is a systematic review with an analytical-synthetic approach. The study of population included all scientific articles published in the field of nitrate removal, autotrophic denitrification, pyrite-based treatment systems, and constructed wetlands between 2000 and 2025. A systematic search was conducted in reputable databases including ScienceDirect, Scopus, Web of Science, and Google Scholar using the combined keywords "Nitrate Removal," "Autotrophic Denitrification," "Pyrite (FeS_2)," "Electron Donor," and "Constructed Wetland." Inclusion criteria were: (1) publication in reputable scientific journals with peer review, (2) direct relevance to at least two components of nitrate removal via pyrite-based autotrophic denitrification, and (3) presentation of quantitative or analytical findings usable in research synthesis. Articles that addressed only conventional treatment methods or were unrelated to biological denitrification were excluded. Initially, 87 articles were identified, and after screening, 25 articles were selected for final analysis based on thematic relevance and methodological quality. Data extraction was performed qualitatively using the Directed Content Analysis method, and information was categorized into three main groups: (1) nitrate pollution status in Iran's water resources, (2) conventional nitrate removal methods, and (3) pyrite-based autotrophic denitrification systems. To enhance validity, two researchers independently reviewed the selected articles, and in cases of disagreement, consensus was reached with the

participation of a third author. The main limitation of this review was the heterogeneity of methodologies and measurement indicators across different studies, which precluded quantitative meta-analysis.

Results

Investigations across various regions of Iran have confirmed that nitrate pollution is a serious threat to groundwater quality, particularly in arid and semi-arid areas where groundwater serves as the primary drinking water source. Studies in Robat Karim, Mashhad, Tehran-Karaj, Isfahan, and Kerman have reported nitrate concentrations exceeding the WHO limit of 50 mg/L, with some wells reaching levels above 160 mg/L. The main sources of contamination are agricultural activities with excessive nitrogen fertilizer use, wastewater infiltration, and inadequate groundwater management. Regarding nitrate removal methods, conventional physicochemical processes including reverse osmosis, ion exchange, and electrodialysis can achieve removal efficiencies of 50–99%. However, these methods face significant limitations such as high energy consumption, membrane fouling, brine disposal challenges, and high operational costs, making them economically unfeasible for large-scale applications.

In contrast, pyrite-based autotrophic denitrification has emerged as a promising alternative. Studies have demonstrated that pyrite (FeS_2) can serve as an effective electron donor for denitrification while simultaneously removing phosphate through iron precipitation. Various reactor configurations including biological contactors, constructed wetlands, and microbial fuel cells have achieved nitrate removal efficiencies of 70–99% and phosphate removal of 91–100%. Pyrite-sulfur combined systems (PSAD) showed improved performance with 98.7% nitrate and 100% phosphate removal while producing lower sulfate levels than theoretical values. Pyrite-based constructed wetland-microbial fuel cells additionally generated bioelectricity while removing nutrients. However, the performance of pyrite-based systems depends on mineral characteristics, with different pyrite types showing variable denitrification capabilities due to differences in surface chemistry and crystal structure. Challenges include lower initial denitrification rates, sulfate production as a byproduct, and limited inorganic carbon availability. The integration of pyrite with complementary materials such as sulfur or steel slag has shown synergistic effects in enhancing performance while reducing sulfate production and greenhouse gas emissions.

Conclusions

This review indicates that nitrate contamination of water resources in Iran represents a serious environmental challenge, necessitating the development of effective and sustainable treatment technologies. Pyrite-based autotrophic denitrification offers a promising, cost-effective, and environmentally compatible solution for nitrate and phosphate removal. However, the performance of pyrite-based systems is strongly influenced by operational parameters and mineral characteristics. The integration of pyrite with complementary materials and the optimization of system design are critical for enhancing treatment efficiency. Future research should focus on pilot-scale implementation, long-term stability assessment, microbial community analysis, and economic evaluation to facilitate practical application in Iran's water treatment facilities.



حذف نیترات از منابع آب آلوده با دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر پیریت

فاطمه نادری^ا، شایان شریعتی فیض آبادی^ا، علی‌رضا بازارگان^ا، مجید بغدادی^ا

^ا گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: shayan_shariati@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	سال‌های اخیر، روش دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک به دلیل عدم نیاز به منبع کربن آلی، تولید لجن کمتر و هزینه‌های بهره‌برداری پایین‌تر، به عنوان جایگزینی مؤثر برای فرآیندهای هتروتروفیک مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله مروری، نقش الکترون‌دهنده‌های معدنی در حذف نیترات، به‌ویژه پیریت (FeS_2)، بررسی شده است. پیریت به دلیل فراوانی، پایداری شیمیایی، قیمت مناسب و قابلیت اکسایش همزمان آهن و گوگرد، کارایی بالایی در حذف نیترات از آب‌های آلوده نشان داده است. علاوه بر این، اکسیداسیون پیریت شرایط مناسبی برای فعالیت باکتری‌های دنیتریفیکاسیون اتوتروف فراهم می‌کند و امکان حذف مؤثر نیترات را بدون نیاز به افزودن منابع کربنی خارجی فراهم می‌سازد. همچنین، مطالعات اخیر نشان می‌دهد که FeS_2 می‌تواند علاوه بر حذف نیترات، در حذف فسفر از طریق تشکیل ترکیبات آهنی و فرایندهای جذب و رسوب‌گذاری نیز نقش مؤثری داشته باشد. در ایران، آلودگی نیترات یکی از مهم‌ترین چالش‌های کیفی منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شود، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب آشامیدنی است. بررسی‌های انجام‌شده در نواحی مختلف کشور از جمله تهران-کرج، مشهد، اصفهان، رباط کریم و کرمان نشان داده‌اند که در بسیاری از نقاط، غلظت نیترات از حد مجاز سازمان جهانی بهداشت (50 mg/L) فراتر رفته و در برخی چاه‌ها تا بیش از 160 mg/L نیز گزارش شده است. منشأ اصلی این آلودگی، فعالیت‌های کشاورزی، مصرف بی‌رویه کودهای نیتروژنی، نفوذ فاضلاب و مدیریت نامناسب منابع آب زیرزمینی است. تداوم این وضعیت می‌تواند پیامدهای جدی بر سلامت عمومی، به‌ویژه برای کودکان، و نیز بر پایداری منابع آب داشته باشد. از این رو، به‌کارگیری فناوری‌های نوین تصفیه، به‌ویژه دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر پیریت، می‌تواند رویکردی مؤثر، اقتصادی و پایدار برای کاهش همزمان نیترات و فسفر و ارتقای کیفیت منابع آب کشور فراهم سازد.
کلیدواژه‌ها: الکترون‌دهنده معدنی، پیریت (FeS_2)، تالاب مصنوعی، حذف نیترات، دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک.	

استناد به این مقاله: نادری، فاطمه؛ شریعتی فیض آبادی، شایان؛ بازارگان، علیرضا و بغدادی، مجید. (۱۴۰۴). حذف نیترات از منابع آب آلوده با دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر پیریت، راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم‌های پایدار، ۱(۱)، ۱۳۴-۱۵۹. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252598>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252598>

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

بیش از ۷۰ درصد از سطح زمین را آب پوشانده‌است؛ بنابراین در نگاه نخست، به نظر می‌رسد منابع آبی زمین بسیار فراوان باشند. با این حال، دسترسی به آب شیرین یکی از چالش‌های اساسی در سطح جهان است. تنها حدود ۳ درصد از کل آب‌های موجود بر روی زمین شیرین و قابل استفاده‌اند، که از این مقدار، نزدیک به ۷۰ درصد به صورت یخ و برف منجمد است، حدود ۲۹ درصد در قالب رطوبت خاک یا آب‌های زیرزمینی عمیق قرار دارد و کمتر از ۱ درصد از آب شیرین جهان در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها یافت می‌شود (Mohsenipour et al., 2014). اگرچه منابع آب شیرین به‌طور مداوم از طریق بارش باران و برف تجدید می‌شوند، اما رشد سریع جمعیت و کاهش کیفیت و کمیت این منابع بر اثر تخریب تدریجی آن‌ها، تعادل میان عرضه و تقاضای آب را در بسیاری از مناطق جهان به مرحله‌ای بحرانی رسانده است. براساس دستورالعمل‌های چارچوب آب اتحادیه اروپا (Martínez-Navarrete et al., 2011)، "فشار" به‌عنوان اثرات منفی ناشی از فعالیت‌های انسانی بر منابع آبی تعریف می‌شود. فعالیت‌های انسانی که منجر به تخریب آب‌های شیرین می‌گردند، به‌طور کلی در پنج گروه طبقه‌بندی می‌شوند: منابع آلودگی نقطه‌ای، منابع آلودگی پراکنده، بهره‌برداری بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی، تغذیه مصنوعی و نفوذ آب دریا. در میان این عوامل، آلودگی پراکنده ناشی از فعالیت‌های انسانی به‌عنوان اصلی‌ترین منبع آلودگی آب شناخته می‌شود. از دهه ۱۹۷۰ میلادی، آلودگی نیتراتی حاصل از کشاورزی فشرده به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در سطح جهان تبدیل شده است (Rivett et al., 2008). نیتروژن (N) در قالب نیترات، یکی از آلاینده‌های رایج و مهم در آب‌های سطحی و زیرزمینی به‌شمار می‌رود (Craswell, 2021). نیترات دارای حلالیت بسیار بالایی در آب است (Martínez-Navarrete et al., 2011) و به‌سختی به ذرات خاک متصل می‌شود، از این‌رو به‌راحتی در معرض آبشویی قرار گرفته و به لایه‌های زیرین خاک یا منابع آب زیرزمینی نفوذ می‌کند (Bhatnagar & Sillanpää, 2011). شناسایی منابع نیترات، نخستین گام در درک روابط پیچیده میان آب‌های زیرزمینی، آب‌های سطحی و خاک به‌شمار می‌رود. منابع مختلفی برای ورود نیترات به محیط وجود دارد؛ از جمله فضولات حیوانی، مخازن سپتیک، سیستم‌های تصفیه فاضلاب شهری و بقایای گیاهی در حال تجزیه. با این حال، کودهای نیتروژنه مورد استفاده در کشاورزی، به‌عنوان اصلی‌ترین منبع آلودگی نیترات در محیط‌زیست شناخته می‌شوند (Suthar et al., 2009). نیترات به‌راحتی می‌تواند از ناحیه ریشه گیاهان در خاک‌های کشاورزی عبور کرده و به آب‌های زیرزمینی و سطحی منتقل شود. در غلظت‌های بالاتر از حد مجاز، حضور نیترات باعث می‌شود آب‌های زیرزمینی برای مصرف آشامیدنی نامناسب شوند. آب زیرزمینی یکی از منابع اصلی تأمین آب برای مصارف شرب، صنعتی، کشاورزی و در برخی موارد تفریحی است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک که دسترسی به منابع آب سطحی محدود است، آب‌های زیرزمینی نقش حیاتی داشته و به‌عنوان جایگزینی ارزشمند مورد استفاده قرار می‌گیرند (Huan et al., 2020). آب‌های زیرزمینی حدود ۲۰ درصد از کل منابع آب شیرین جهان را تشکیل می‌دهند و در بسیاری از کشورها تنها منبع تأمین آب آشامیدنی محسوب می‌شوند. از این‌رو، حفظ کیفیت مطلوب این منابع برای تضمین سلامت انسان از اهمیت بالایی برخوردار است (Chen et al., 2017). در آب‌های سطحی آلوده به نیتروژن، حضور نیترات موجب افزایش رشد فیتوپلانکتون‌ها می‌شود که در نهایت فرآیند یوتروفیکاسیون را به‌دنبال دارد. این پدیده باعث کاهش شدید اکسیژن محلول در آب (هیپوکسیا و آنوکسیا)، کاهش تنوع زیستی و بروز شکوفایی جلبکی مضر می‌گردد. چنین شکوفایی‌هایی می‌توانند آسیب‌های جدی به شیلات و زیست‌بوم‌های دریایی حساس، از جمله صخره‌های مرجانی ارزشمند، وارد کنند (Craswell, 2021).

سازمان بهداشت جهانی حداکثر غلظت مجاز نیترات در آب آشامیدنی را ۵۰ میلی گرم در لیتر پیشنهاد کرده است (Azhdarpoor et al., 2019). غلظت‌های بالای نیترات (بیش از ۵۰ میلی گرم بر لیتر) می‌تواند موجب اختلال در جذب ید و بروز پرکاری تیروئید شود. افزون بر این، پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که بین مقادیر بالای نیترات در آب آشامیدنی و مواد غذایی با افزایش نرخ مرگ‌ومیر نوزادان، بروز متهموگلوبینمی، دیابت در کودکان، فشار خون بالا، بیماری‌های قلبی-عروقی، اختلالات عصبی، ناهنجاری‌های مادرزادی، سقط جنین، بیماری آلزایمر و انواع مختلف سرطان‌ها؛ از جمله سرطان‌های دستگاه گوارش، دهان، روده بزرگ، مثانه و پستان، ارتباط معناداری وجود دارد (Marhamati et al., 2021). سرطان‌زایی این آلاینده می‌تواند ناشی از واکنش آن با آمین‌ها و تشکیل ترکیبات واسطه‌ای مانند نیتروزوها باشد که از قوی‌ترین مواد جهش‌زا و سرطان‌زا به شمار می‌روند. نتایج آماری حاصل از برخی مطالعات انجام‌شده در دانمارک نیز نشان داده‌است که وجود نیترات در غلظت‌های ۷/۰ تا ۲ میلی گرم بر لیتر در آب آشامیدنی با افزایش قابل توجه خطر ابتلا به سرطان رکتوم ارتباط دارد (Azhdarpoor et al., 2019). سرطان روده بزرگ (CRC) به‌عنوان سومین نوع شایع سرطان در جهان شناخته می‌شود و یکی از اصلی‌ترین علل مرگ‌ومیر ناشی از سرطان در سطح جهانی به شمار می‌آید (Fathmawati et al., 2017). تحلیل داده‌های آماری چند دهه اخیر نشان می‌دهد که میزان بروز سرطان روده بزرگ (CRC) در ایران روندی افزایشی داشته‌است. این سرطان که در سال ۲۰۰۰ در رتبه نهم قرار داشت، به تدریج با سرعتی چشمگیر در رده‌بندی سرطان‌ها صعود کرده و تا سال ۲۰۱۵ به ترتیب به رتبه سوم در میان زنان و رتبه پنجم در میان مردان ایرانی از نظر بروز محلی تمامی سرطان‌ها رسیده‌است (Dolatkhah et al., 2015). براساس برآوردهای سازمان بهداشت جهانی از روندهای گذشته، پیش‌بینی می‌شود که میزان بروز سالانه سرطان روده بزرگ در ایران تا سال ۲۰۳۰ حدود ۵/۱ برابر افزایش یابد. به‌طور مشابه، نتایج یک مطالعه کوهورت انجام‌شده بر روی گروهی از زنان ۵۵ تا ۶۹ ساله در دانشگاه آيووا نشان داد که خطر ابتلا به سرطان‌های تخمدان، مثانه، کلیه و تیروئید در میان افرادی که در معرض سطوح بالاتری از نیترات قرار داشتند، به‌طور معناداری بیشتر است (Azhdarpoor et al., 2019). بنابراین، آلودگی نیترات ناشی از مصرف کودهای نیتروژنه به یک مسئله زیست‌محیطی جهانی تبدیل شده‌است که آثار آن در مقیاس حوضه‌های رودخانه‌ای و جهانی قابل مشاهده‌است.

ازاین‌رو، بررسی و توسعه‌ی روش‌های کارآمد برای حذف نیترات از آب‌های آلوده ضروری است. تاکنون، روش‌های فیزیک و شیمیایی از جمله اسمز معکوس، تبادل یونی و الکترودیالیز برای حذف نیترات مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما این فرآیندها به دلیل هزینه بالا، نیاز به انرژی زیاد و تولید پساب‌های ثانویه، برای کاربردهای وسیع اقتصادی نیستند. در مقابل، فرآیند دنیتریفیکاسیون زیستی به‌عنوان روشی کارآمد، پایدار و کم‌هزینه مطرح است که در آن میکروارگانیسم‌ها نیترات را به نیتروژن مولکولی تبدیل می‌کنند. در سال‌های اخیر، توجه پژوهشگران به دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک جلب شده‌است؛ فرآیندی که در آن دهنده‌های الکترون معدنی نظیر گوگرد، آهن و هیدروژن جایگزین ترکیبات آلی می‌شوند. در میان این دهنده‌ها، پیریت (FeS_2) به دلیل پایداری بالا، توانایی همزمان در حذف نیترات و فسفات و عدم نیاز به منابع کربنی خارجی، به‌عنوان گزینه‌ای امیدبخش برای استفاده در سامانه‌های تصفیه طبیعی مانند تالاب‌های مصنوعی معرفی شده‌است. ازاین‌رو، مرور پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر پیریت می‌تواند در توسعه فناوری‌های نوین تصفیه و مدیریت پایدار منابع آب نقش بسزایی داشته‌باشد. در ادامه، مطالعات انجام‌شده درباره‌ی وضعیت آلودگی نیترات در منابع آبی ایران مرور می‌شود.

وضعیت آلودگی نیترات در منابع آب ایران

آلودگی نیترات یکی از مهم‌ترین چالش‌های کیفی منابع آب زیرزمینی در ایران به‌شمار می‌رود. منابع آب ایمن، بهداشت به‌بودیافته و مدیریت کارآمد منابع آب از عوامل اساسی برای سلامت انسان هستند. در بسیاری از نواحی

کشور، به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک، آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب آشامیدنی است و آلودگی آن می‌تواند پیامدهای جدی بر سلامت انسان و پایداری منابع آب داشته‌باشد. بنابراین، تأمین آب زیرزمینی مطابق با استانداردهای تعیین‌شده از اهمیت حیاتی برخوردار است، زیرا تضمین‌کننده سلامت و رفاه عمومی است.

در پژوهش (Badihi et al., 2023) کیفیت آب شرب در روستاهای شهرستان رباط کریم (جنوب غرب تهران) از نظر نیتрат، سرب و جیوه بررسی شد. در مجموع ۶۶ نمونه از شبکه توزیع آب جمع‌آوری و پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که حدود ۳۳ درصد از نقاط نمونه‌برداری دارای غلظت نیترات بالاتر از حد مجاز سازمان بهداشت جهانی (۵۰ میلی گرم در لیتر) بودند و ۹۰ درصد از نمونه‌ها نیز سختی کل بالاتر از حد مجاز داشتند. بالاترین مقدار نیترات ۹۳۰۰۶ میلی گرم در لیتر گزارش شد. بررسی‌ها نشان داد که منشأ اصلی نیترات در منابع آب این منطقه، فعالیت‌های کشاورزی، مصرف کودهای نیتروژن دار، نفوذ فاضلاب و پساب‌های شهری است. ارزیابی شاخص کیفیت آب (WQI) بیانگر آن بود که کیفیت آب در ۱۹ درصد از نقاط «ضعیف»، در ۴۵ درصد «خوب» و در ۳۶ درصد «عالی» طبقه‌بندی می‌شود. نیترات و سختی کل بیشترین تأثیر را در کاهش کیفیت آب داشتند. در ارزیابی ریسک بهداشتی، مقادیر شاخص خطر (HQ) برای نیترات در بیشتر نقاط بالاتر از عدد ۱ بود که نشان‌دهنده خطر بالقوه برای سلامت است، به‌ویژه برای کودکان و نوزادان که آسیب‌پذیری بیشتری نسبت به مصرف نیترات دارند. نویسندگان نتیجه گرفتند که نیترات مهم‌ترین عامل تهدیدکننده سلامت در آب آشامیدنی این منطقه است و استفاده از فناوری‌های تصفیه پیشرفته مانند اسمز معکوس (RO) می‌تواند غلظت نیترات را تا حدود ۹۰ درصد کاهش دهد. همچنین تأکید شد که منشأ اصلی آلودگی نیترات در ایران به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مصرف زیاد کودهای شیمیایی، نفوذ فاضلاب و مدیریت نادرست منابع آب زیرزمینی است.

در پژوهش (Zendehbad et al., 2019) (شناسایی منبع آلودگی نیتراتی در سفره آب زیرزمینی شهری مشهد)، آلودگی نیترات در ۲۶۱ حلقه چاه آب زیرزمینی این شهر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در ۴۲ درصد از چاه‌ها غلظت نیترات از حد مجاز سازمان جهانی بهداشت (۵۰ میلی گرم در لیتر) فراتر رفته‌است و در برخی نقاط مقدار آن به ۱۶۶/۱ میلی گرم در لیتر نیز رسیده‌است. از نظر پراکندگی مکانی، بیشترین غلظت نیترات در مناطق مرکزی و جنوبی مشهد مشاهده شد؛ مناطقی که به‌دلیل نبود شبکه فاضلاب و استفاده از چاه‌های جذبی خانگی بیشترین آلودگی را دارند. در مقابل، ناحیه غربی شهر که اخیراً به سیستم جمع‌آوری فاضلاب مجهز شده‌است، غلظت نیترات کمتری دارد. پژوهشگران نتیجه گرفتند که نشت فاضلاب از سیستم‌های سنتی دفع پساب به درون آبخوان عامل اصلی آلودگی گسترده نیترات در مشهد است و در نبود فرآیندهای طبیعی حذف نیترات، این آلودگی در سال‌های آینده نیز پایدار خواهدماند. بنابراین، بهبود سامانه فاضلاب شهری و مدیریت ورودی نیتروژن به سفره آب زیرزمینی ضروری است.

در مطالعه‌ای که توسط (Alizadeh et al., 2024) انجام شد، وضعیت آلودگی نیترات در دشت تهران-کرج به‌عنوان یکی از مهم‌ترین آبخوان‌های کشور مورد بررسی قرار گرفت. این دشت که بیش از ۸۰ درصد آب مصرفی حدود ۱۸ میلیون نفر را تأمین می‌کند، طی سال‌های اخیر با افزایش قابل توجه غلظت نیترات در منابع آب زیرزمینی مواجه بوده‌است. نتایج حاصل از تحلیل داده‌های ۱۲ ساله (۲۰۰۷ تا ۲۰۱۸) مربوط به ۷۵ حلقه چاه نشان داد که غلظت نیترات در محدوده‌ی ۶ تا ۱۴۸/۸ میلی گرم در لیتر متغیر بوده و در برخی موارد تا سه برابر حد مجاز سازمان جهانی بهداشت (۵۰ میلی گرم در لیتر) افزایش یافته‌است. بیشترین مقادیر نیترات در سال ۲۰۱۰ ثبت شد و به‌طور کلی ناحیه شرقی و جنوب شرقی آبخوان بیشترین میزان آلودگی را نشان داد. ارزیابی خطر سلامت غیرسرطانی (HQ) نشان داد که کودکان آسیب‌پذیرترین گروه سنی در برابر نیترات هستند؛ به‌گونه‌ای که در بسیاری از سال‌های مطالعه، مقدار HQ برای کودکان بیشتر از ۱ بوده و بیانگر ریسک قابل توجه برای سلامت آنان است. در مقابل، خطر برای بزرگسالان روندی

کاهش داشت و تعداد چاه‌های دارای ریسک برای این گروه از ۱۷ حلقه در سال ۲۰۰۷ به ۶ حلقه در سال ۲۰۱۸ کاهش یافت. مهم‌ترین منابع آلودگی نیتراتی شامل دفع فاضلاب‌های خانگی در چاه‌های جذبی، استفاده نامتعادل از کودهای نیتروژنی در کشاورزی و فضای سبز شهری و گسترش سریع شهرنشینی و صنایع بوده‌است. با این حال، توسعه زیرساخت‌های فاضلاب و احداث تصفیه‌خانه‌ها در سال‌های اخیر موجب کاهش نسبی غلظت نیترات در حدود ۵۴ درصد از چاه‌ها شده‌است. در مجموع، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اگرچه اقدامات اخیر در بهبود شبکه‌ی فاضلاب و کاهش نفوذ پساب‌ها مؤثر بوده‌اند، اما سطوح نیترات در بخش‌هایی از دشت تهران-کرج همچنان بالاتر از حد مجاز باقی مانده‌است و نیاز به مدیریت پایدارتر در بخش کشاورزی و بهبود کامل پوشش شبکه‌ی جمع‌آوری فاضلاب در این ناحیه ضروری است.

در پژوهش (Esmacili et al., 2014)، کیفیت آب زیرزمینی دشت اصفهان از نظر آلودگی نیترات و ویژگی‌های هیدروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. این دشت که بخشی از حوضه گاوخونی را تشکیل می‌دهد، از منابع اصلی تأمین آب برای کشاورزی، صنعت و مصارف شهری در مرکز ایران محسوب می‌شود. در این مطالعه، ۱۱۱ نمونه آب زیرزمینی از چهار زیرحوضه اصفهان-برخوار، کوهپایه-سگری، نجف‌آباد و لنجانان مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج نشان داد که میانگین غلظت نیترات برابر با ۴۱ میلی گرم در لیتر است و در محدوده‌ی ۲ تا ۴۰۲ میلی گرم در لیتر نوسان دارد. حدود ۲۶ درصد از نمونه‌ها دارای غلظتی بالاتر از حد مجاز سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (۴۴/۲۷ میلی گرم در لیتر) و سازمان جهانی بهداشت (۵۰ میلی گرم در لیتر) بودند. بیشترین میزان آلودگی به نیترات در زیرحوضه‌های لنجانان (میانگین ۴۹/۲ میلی گرم در لیتر) و نجف‌آباد (۴۶/۶ میلی گرم در لیتر) مشاهده شد، در حالی که زیرحوضه‌های کوهپایه-سگری و اصفهان-برخوار دارای غلظت‌های پایین‌تری بودند. بررسی‌های آماری نشان داد که میان میزان مصرف کودهای نیتروژنی و غلظت نیترات در آب زیرزمینی همبستگی مثبت و معنی‌داری ($r = 0/8$, $p < 0/01$) وجود دارد. منابع اصلی آلودگی نیتراتی شامل فعالیت‌های کشاورزی با مصرف زیاد کودهای نیتروژنی (اوره و سولفات آمونیوم)، فاضلاب‌های خانگی و صنعتی و زه‌آب‌های کشاورزی در مجاورت رودخانه زاینده‌رود تشخیص داده شدند. توزیع عمقی نیترات نیز نشان داد که غلظت نیترات در لایه‌های سطحی (کمتر از ۱۰۰ متر) بالاتر است و با افزایش عمق کاهش می‌یابد که نشانگر منشأ سطحی آلودگی است. از دیدگاه کیفی، حدود ۵۵ درصد از نمونه‌ها به دلیل شوری و قلیائیت بالا برای آبیاری نامناسب ارزیابی شدند. همچنین نوع غالب آب زیرزمینی در منطقه Na-Cl و Ca-Cl گزارش شد. نویسندگان نتیجه‌گیری کردند که استفاده بیش از حد از کودهای نیتروژنی، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و خشکسالی‌های متوالی موجب افزایش چشمگیر نیترات و شوری در سال‌های اخیر شده‌است. در نهایت، پیشنهاد شد که برنامه‌های مدیریتی فوری برای کنترل مصرف کودهای شیمیایی، بهبود سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهری و صنعتی، و مدیریت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در این ناحیه اجرا شود.

در پژوهش انجام‌شده توسط (Marhamati et al., 2021)، سطوح نیترات و نیتريت در منابع مختلف آب آشامیدنی ایران شامل آب‌های زیرزمینی، شبکه‌ی توزیع آب، آب بطری‌شده و آب‌میوه‌ها طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه که با مرور ۵۷ مقاله‌ی منتشرشده انجام شد، نشان داد که میزان نیترات در بسیاری از مناطق ایران بالا بوده و در بخش قابل توجهی از نقاط کشور از حدود مجاز سازمان جهانی بهداشت (۵۰ میلی گرم در لیتر) فراتر رفته‌است. براساس نتایج، در استان‌های گیلان، مازندران، بوشهر، اردبیل، کرمان، دیواندره، هشتگرد و تالش، بیش از نیمی از چاه‌های آب دارای غلظت نیترات بالاتر از حد مجاز بودند. غلظت نیترات در آب‌های زیرزمینی کشور در محدوده ۲ تا بیش از ۱۵۰ میلی گرم در لیتر نوسان داشت و بیشترین مقادیر مربوط به مناطق شمالی، مرکزی و غربی ایران گزارش شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که آلودگی نیترات در بخش قابل توجهی از منابع زیرزمینی ایران

فراتر از سطح ایمن برای شرب است. در حالی که کیفیت شبکه توزیع آب شهری در اغلب شهرها در محدوده استاندارد قرار داشت، در برخی مناطق از جمله گیلان، مازندران و بوشهر، نیترات در بخش‌هایی از شبکه از حد مجاز فراتر رفت. همچنین در بررسی آب‌های بطری‌شده مشخص شد که اگرچه مقادیر نیترات و نیتريت در محدوده مجاز قرار دارند، اما ۹۶ درصد از برندها میزان واقعی نیترات بیشتری نسبت به مقدار درج‌شده روی برچسب داشتند و در ۸۰ درصد از آن‌ها، نیتريت اصلاً ذکر نشده بود. براساس تحلیل نویسندگان، مصرف بی‌رویه کودهای نیتروژنی در کشاورزی، نفوذ فاضلاب‌های خانگی و صنعتی و فقدان سیستم‌های مناسب جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب مهم‌ترین عوامل بروز سطوح بالای نیترات در منابع آبی ایران هستند. در این مرور نظام‌مند تأکید شده است که در بسیاری از نواحی کشور، به‌ویژه در مناطق شمالی، غربی و مرکزی، غلظت نیترات همچنان بالا و نگران‌کننده است و می‌تواند خطرات جدی برای سلامت عمومی، به‌ویژه در کودکان و نوزادان، ایجاد کند. از این رو، پایش مستمر و مدیریت منبع آلودگی برای کنترل سطوح بالای نیترات در آب‌های زیرزمینی ایران ضروری دانسته شده است.

در پژوهش (Shayestehfar et al., 2024) ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی و ریسک بهداشتی ناشی از غلظت نیترات در حوضه راین، کرمان، کیفیت و ایمنی آب زیرزمینی منطقه راین از نظر نیترات و سایر پارامترهای شیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، ۱۲۰ نمونه آب زیرزمینی از چاه‌های منطقه جمع‌آوری شد و شاخص‌های کیفیت آب آشامیدنی (WQI)، آلودگی آب زیرزمینی (GPI) و آلودگی نیترات (NPI) محاسبه گردید. مقادیر نیترات در نمونه‌ها بین ۰/۱ تا ۱۱۵ میلی‌گرم در لیتر متغیر بود و در برخی نقاط از حد مجاز سازمان جهانی بهداشت (۵۰ میلی‌گرم در لیتر) فراتر رفت. نتایج نشان داد که حدود ۳۲ درصد از نمونه‌ها کیفیت نامناسبی برای آشامیدن داشتند و نیاز به تصفیه دارند. مقدار شاخص آلودگی آب زیرزمینی (GPI) بین ۰/۱۷ تا ۹/۱۴ با میانگین ۱/۷۵ متغیر بود؛ به‌طوری که ۴۷ درصد نمونه‌ها بدون آلودگی یا دارای آلودگی ناچیز، ۹ درصد با آلودگی کم، ۱۴ درصد با آلودگی متوسط، ۱۱ درصد با آلودگی زیاد و ۱۹ درصد با آلودگی بسیار زیاد طبقه‌بندی شدند. براساس شاخص آلودگی نیترات (NPI)، حدود ۷۷ درصد چاه‌ها فاقد آلودگی، ۱۰ درصد دارای آلودگی کم، ۷ درصد متوسط و ۶ درصد دارای آلودگی زیاد تا بسیار زیاد بودند. منابع اصلی نیترات در این منطقه شامل فعالیت‌های کشاورزی (مصرف بیش از حد کودهای نیتروژنی)، نفوذ فاضلاب، دپوی زباله و فاضلاب دامی گزارش شد. توزیع مکانی غلظت نیترات نشان داد که بیشترین آلودگی در اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی شرق و جنوب شرق راین مشاهده می‌شود. نویسندگان نتیجه گرفتند که فعالیت‌های انسانی به‌ویژه کشاورزی و فاضلاب شهری، عامل اصلی آلودگی نیترات در آب زیرزمینی منطقه راین هستند و با توجه به خطر بالای مواجهه با نیترات، به‌کارگیری روش‌های تصفیه مانند اسمز معکوس، تقطیر و الکترودیالیز برای اطمینان از ایمنی آب آشامیدنی ضروری است.

جدول ۱. خلاصه وضعیت آلودگی نیترات در منابع آب ایران

Table 1. Summary of the status of nitrate pollution in Iranian water resources

منبع پژوهش	منطقه مطالعه	تعداد نمونه	دامنه یا مقدار نیترات (mg/L)	درصد نقاط بالاتر از حد مجاز (WHO=50 mg/L)	منابع اصلی آلودگی
(Badihi et al., 2023)	روستاهای رباط کریم (جنوب غرب تهران)	۶۶	تا ۹۳/۰۶	۳۳ درصد از نقاط	فعالیت‌های کشاورزی، کود نیتروژن دار، فاضلاب و پساب شهری
(Zendehbad et al., 2019)	مشهد	۲۶۱	تا ۱۶۶/۱	۴۲ درصد از چاه‌ها	نشت فاضلاب از چاه‌های جذبی خانگی
(Alizadeh et al., 2024)	دشت تهران-کرج	۷۵	تا ۱۴۸/۸	-	فاضلاب خانگی، کودهای نیتروژنی، شهرنشینی و صنعت

(Esmacili et al., 2014)	دشت اصفهان	۱۱۱	۲ تا ۴۰۲ (میانگین ۴۱)	۲۶ درصد از نمونه‌ها	کودهای نیتروژنی، فاضلاب خانگی و صنعتی، زه‌آب کشاورزی
(Marhamati et al., 2021)	مرور ۵۷ مقاله از مناطق مختلف ایران	-	۲ تا بیش از ۱۵۰	در بسیاری از استان‌ها بالاتر از حد مجاز	کودهای نیتروژنی، نفوذ فاضلاب، نبود سیستم جمع‌آوری مناسب
(Shayestehfar et al., 2024)	حوضه راین، کرمان	۱۲۰	۱/۱ تا ۱۱۵	در برخی نقاط بیش از حد مجاز؛ ۳۲ درصد کیفیت نامناسب	کشاورزی، فاضلاب، دپوی زباله، فاضلاب دامی

بررسی مطالعات انجام‌شده در مناطق مختلف کشور نشان می‌دهد که آلودگی نیترات در ایران مسئله‌ای فراگیر و روبه‌افزایش است که با گسترش شهرنشینی، توسعه کشاورزی و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع زیرزمینی تشدید می‌شود. اگرچه در برخی مناطق، توسعه زیرساخت‌های فاضلاب و اقدامات کنترلی منجر به کاهش نسبی غلظت نیترات شده‌است، اما در بسیاری از دشت‌ها هنوز سطوحی بالاتر از حد مجاز مشاهده می‌شود. تداوم این روند می‌تواند خطرات جدی برای سلامت عمومی، به‌ویژه در کودکان و نوزادان، ایجاد کند. در این راستا، شناسایی و به‌کارگیری روش‌های مؤثر برای حذف نیترات از منابع آب، به‌ویژه با تکیه بر فرآیندهای زیستی و مواد معدنی پایدار، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در ادامه، مهم‌ترین روش‌های حذف نیترات مورد بررسی قرار می‌گیرند.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش یک مطالعه مروری نظام‌مند با رویکرد تحلیلی-تلفیقی است. جامعه مطالعه شامل کلیه مقالات علمی منتشرشده در حوزه حذف نیترات، دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک، سامانه‌های تصفیه مبتنی بر پیریت و تالاب‌های مصنوعی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ می‌باشد. جستجوی نظام‌مندی در پایگاه‌های معتبر شامل ScienceDirect، Scopus، Web of Science و Google Scholar با استفاده از کلیدواژه‌های ترکیبی "Nitrate Removal"، "Autotrophic Denitrification"، "Pyrite (FeS₂)"، "Electron Donor" و "Constructed Wetland" انجام شد. معیارهای ورود شامل: (۱) انتشار در مجلات علمی معتبر با داوری هم‌تا، (۲) ارتباط مستقیم با حداقل دو مؤلفه از حذف نیترات از طریق دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر پیریت، و (۳) ارائه یافته‌های کمی یا تحلیلی قابل استفاده در سنتز پژوهش بود. مقالاتی که صرفاً به روش‌های تصفیه مرسوم پرداخته بودند یا با دنیتریفیکاسیون زیستی مرتبط نبودند، از دوره مرور حذف شدند. در ابتدا ۸۷ مقاله شناسایی شد و پس از غربالگری، ۲۵ مقاله بر اساس ارتباط موضوعی و کیفیت روش‌شناسی برای تحلیل نهایی انتخاب گردیدند. فرآیند استخراج داده‌ها به‌صورت کیفی با استفاده از روش تحلیل محتوای جهت‌یافته انجام شد و اطلاعات در سه دسته اصلی طبقه‌بندی گردید: (۱) وضعیت آلودگی نیترات در منابع آب ایران، (۲) روش‌های مرسوم حذف نیترات، و (۳) سامانه‌های دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر پیریت. برای افزایش اعتبار یافته‌ها، دو پژوهشگر به‌طور مستقل مقالات را بررسی کرده و در موارد اختلاف، با مشارکت نویسنده سوم به توافق نهایی رسیدند. محدودیت اصلی این مرور، ناهمگونی روش‌شناسی و شاخص‌های اندازه‌گیری در مطالعات مختلف بود که امکان انجام فراتحلیل کمی را فراهم نمی‌کرد.

روش‌های حذف نیترات

افزایش غلظت نیترات در منابع آب زیرزمینی و سطحی طی دهه‌های اخیر سبب شده‌است که توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های کارآمد برای حذف این ترکیب به یکی از اولویت‌های اصلی در مدیریت کیفیت آب تبدیل شود. فرآیندهای مرسوم تصفیه آب، مانند لخته‌سازی، فیلتراسیون و ضدعفونی که معمولاً برای تولید آب آشامیدنی به‌کار می‌روند، توانایی مؤثری در حذف یون نیترات ندارند؛ ازاین‌رو، به‌کارگیری روش‌های تکمیلی برای حذف مؤثر این یون از آب ضروری

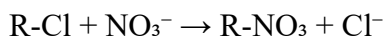
است (Ghafari et al., 2008). حذف نیترات از آب و پساب‌ها می‌تواند از طریق دو گروه اصلی از روش‌های تصفیه، شامل روش‌های فیزیکیوشیمیایی و زیستی، انجام گیرد. متداول‌ترین فرآیندهای فیزیکیوشیمیایی مورد استفاده برای حذف نیترات عبارت‌اند از اسمز معکوس (RO)، تبادل یونی (IE)، الکترودیالیز (ED) و جذب بر روی کربن فعال همراه با تنظیم (Ergas & Reuss, 2001; Feleke & Sakakibara, 2002; Islam & Suidan, 1998; Prosnansky et al., 2002; Shrimali & Singh, 2001). pH افزون بر این، در سال‌های اخیر توجه قابل‌توجهی به روش‌های نوین حذف نیترات، به‌ویژه کاهش غیرزیستی نیترات با استفاده از فلزات فعال، معطوف شده‌است. در این زمینه، چندین پژوهشگر فرآیند دنیتریفیکاسیون شیمیایی به کمک آهن صفروالانسی (Fe^0)، منیزیم صفروالانسی (Mg^0) و سایر فلزات را به‌عنوان روشی مؤثر برای کاهش نیترات گزارش کرده‌اند. در ادامه روش‌های مرسوم مورد بحث قرار می‌گیرند.

اسمز معکوس

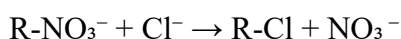
اسمز معکوس (RO) به‌عنوان یکی از روش‌های درجا و غیردرجا برای کاهش غلظت نیترات در آب آشامیدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Black, 2013). فرآیند اسمز معکوس قادر است به‌طور همزمان غلظت طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها را کاهش دهد (Seidel et al., 2011). مبنای عملکرد روش اسمز معکوس بر اصل عبور انتخابی است؛ بدین معنا که تنها مولکول‌های آب قادر به عبور از غشای نیمه‌تراوا هستند و سایر یون‌ها در پشت غشا باقی می‌مانند. از یک غشای اسمز معکوس می‌توان برای حذف آلاینده‌های گوناگون از جمله کلرید، فلورید، سدیم و دیگر یون‌ها استفاده کرد. در این فرآیند، اعمال فشار موجب عبور آب از غشا و در نتیجه جداسازی آلاینده‌ها می‌شود؛ به‌طوری‌که غلظت محلول رابطه مستقیمی با فشار مورد نیاز دارد. بازده حذف مواد محلول در این روش به غلظت اولیه آن‌ها وابسته‌است و حداکثر راندمان حذف نیترات حدود ۹۳ درصد گزارش شده‌است. با این حال، عواملی مانند افزایش غلظت اولیه نیترات و جنس غشا می‌توانند تأثیر منفی بر کارایی فرآیند داشته‌باشند. برای مثال، افزایش غلظت نیترات از ۲۵ به ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، بازده حذف را از ۵/۹۳ درصد به ۵/۸۲ درصد کاهش می‌دهد. با گذشت زمان، سیستم اسمز معکوس ممکن است با مشکلاتی نظیر گرفتگی، فشردگی غشا و تخریب روبه‌رو شود. همچنین این روش به انرژی بالا، هزینه زیاد و دفع پساب غلیظ نیاز دارد و در صورت پایین بودن کیفیت آب ورودی، عملکرد آن مطلوب نخواهد بود (Mohsenipour et al., 2014).

تبادل یونی

اصل عملکرد روش تبادل یونی (Ion Exchange - IE) بر مبنای جایگزینی یون‌های موجود در آب با یون‌های دیگر است؛ به‌طور معمول، یون‌های کلرید با یون‌های نامطلوبی مانند آلاینده‌ها یا کل جامدات محلول (TDS) جایگزین می‌شوند. فرآیند حذف نیترات در تبادل یونی از نظر مکانیزم مشابه سختی‌گیری آب است، اما تفاوت اصلی در نوع رزین پلیمری مورد استفاده قرار دارد. در این روش، یون نیترات موجود در آب با یون کلرید موجود بر سطح رزین تعویض می‌شود. واکنش تبادل بین یون‌های نیترات و کلرید روی سطح رزین در معادله ۱ نشان داده شده‌است:



پس از اشباع شدن رزین کلریدی، آن را با محلول غلیظ آب‌نمک حاوی (Gatiboni et al., 2021) احیا می‌کنند. در این فرآیند، یون‌های کلرید موجود در محلول جایگزین یون‌های نیترات جذب‌شده روی سطح رزین می‌شوند و بدین ترتیب، رزین بازیابی و برای استفاده مجدد آماده می‌گردد. واکنش احیا به‌صورت زیر بیان می‌شود (Seidel et al., 2011):



عواملی گوناگون از جمله غلظت اولیه نیترات، میزان کل جامدات محلول (TDS)، نوع محلول احیاکننده، نوع رزین و همچنین وجود یون‌های مزاحم مانند سولفات، می‌توانند بر کارایی حذف نیترات در فرآیند تبادل یونی تأثیرگذار باشند (Torabian et al., 2006). روش تبادل یونی برای آب‌هایی با میزان بالای کل جامدات محلول (TDS) مناسب نیست، زیرا کارایی آن کاهش می‌یابد. علاوه بر این، در طی فرآیند احیای رزین، احتمال آزاد شدن نیترات به محیط وجود دارد (Mohsenipour et al., 2014).

الکترو دیالیز

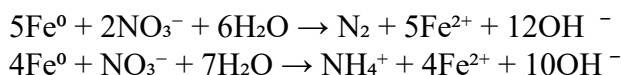
در روش الکترو دیالیز (ED)، نیروی محرکه اصلی برای حذف یا کاهش آلاینده‌ها از آب، جریان الکتریکی است. این سامانه از غشاهای نیمه‌تراوای کاتیونی و آنیونی به همراه دو الکتروود (آند و کاتد) تشکیل شده است. با اعمال جریان الکتریکی، یون‌های منفی (آنیون‌ها) به سمت آند و یون‌های مثبت (کاتیون‌ها) به سمت کاتد حرکت می‌کنند. در طول فرآیند، یون‌ها در بخش پسماند تجمع می‌یابند و در سمت دیگر، آب بدون یون یا آب دیونیزه باقی می‌ماند. روش الکترو دیالیز برای کاهش آلاینده‌های معدنی مختلفی مانند رادیوم، پرکلرات، بروماید، فلوراید، آهن، منگنز و نیترات در آب آشامیدنی به کار می‌رود. بازده حذف آلاینده‌ها در این روش بسته به میزان آلودگی اولیه بین ۵۰ تا ۹۹ درصد متغیر است. برای نمونه، در یک مطالعه گزارش شده است که روش الکترو دیالیز توانسته غلظت نیترات را از ۴۲ میلی‌گرم در لیتر $\text{NO}_3\text{-N}$ به کمتر از ۱۰ میلی‌گرم در لیتر $\text{NO}_3\text{-N}$ کاهش دهد، که معادل راندمان حذف حدود ۷۶ درصد است (Seidel et al., 2011). روش الکترو دیالیز با وجود کارایی بالا در حذف آلاینده‌ها، دارای محدودیت‌هایی مانند پیچیدگی زیاد سیستم، نیاز بالا به انرژی، تولید پسماند و دشواری در بهره‌برداری و نگهداری به‌ویژه در مناطق روستایی است (Mohsenipour et al., 2014).

دنیتریفیکاسیون شیمیایی^۱

ترکیبات شیمیایی گوناگونی برای کاهش نیترات در آب‌های آلوده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از میان آن‌ها، آهن صفر ظرفیتی^۲ و منیزیم از رایج‌ترین ترکیبات به شمار می‌روند. توضیحات مربوط به انواع مختلف دنیتریفیکاسیون شیمیایی در ادامه ارائه شده است.

آهن صفر ظرفیتی

از دهه ۱۹۹۰، آب‌های زیرزمینی آلوده به نیترات با استفاده از آهن صفر ظرفیتی به‌عنوان مانعی واکنشی نفوذپذیر^۳ تصفیه شده‌اند. در این روش، آهن صفر ظرفیتی و نیترات وارد واکنش‌های اکسایش-کاهش می‌شوند که در نتیجه ترکیباتی مانند نیتريت، نیتروژن مولکولی (N_2) و آمونیوم (NH_4^+) تولید شده و در نهایت غلظت نیترات کاهش می‌یابد. پژوهشگران مختلفی؛ از جمله فلیس، هوانگ و ژانگ، سو و پالس، معادلات گوناگونی را برای تبیین فرایند کاهش نیترات ارائه کرده‌اند. برای نمونه، معادلات واکنش میان آهن صفر ظرفیتی و نیترات را نشان می‌دهند:



راندمان حذف نیترات در محلول تحت تأثیر عواملی همچون pH، اندازه و روش تولید نانوذرات، نسبت دوز نانوذرات به نیترات و زمان تماس میان ذرات و آلاینده قرار دارد. به عنوان نمونه، در شرایطی با pH برابر ۴، زمان تماس ۶۰

^۱ Chemical denitrification

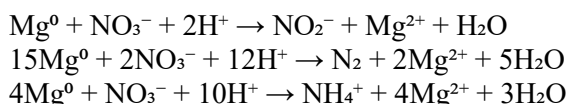
^۲ Zero-valent iron

^۳ Permeable Reactive Barrier

دقیقه، غلظت اولیه نیترات ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و غلظت نانوذرات ۱۵ گرم بر لیتر، راندمان حذف نیترات حدود ۹۵ درصد گزارش شده‌است.

منیزیم صفر ظرفیتی

منیزیم از جمله فلزاتی است که در سال‌های اخیر برای حذف نیترات از محلول‌ها به کار گرفته شده‌است. این فلز در طی واکنش‌های احیایی، نیترات را به نیتريت و آمونیاک تبدیل می‌کند. معادلات (۵) تا (۷) واکنش‌های مربوط به تبدیل نیترات به نیتريت و آمونیوم را نشان می‌دهند:



عوامل متعددی بر کارایی حذف نیترات از فاز آبی با استفاده از منیزیم صفر ظرفیتی تأثیر گذارند. تعادل واکنش در مدت‌زمان کوتاهی برقرار می‌شود و سرعت دنیتریفیکاسیون به عواملی همچون زمان تماس، غلظت اولیه نیترات، نسبت منیزیم به نیترات و میزان منیزیم مصرفی وابسته است. از سوی دیگر، تشکیل آمونیاک و گاز نیتروژن از جمله محصولات جانبی ناخواسته در فرآیندهای مبتنی بر فلزات صفر ظرفیتی محسوب می‌شود (Mohsenipour et al., 2014). روش‌های فیزیک و شیمیایی به دلیل هزینه‌های بالا و ضرورت دفع پساب‌های نمکی، از نظر اقتصادی برای کاربردهای گسترده مقرون به صرفه نیستند (Park & Yoo, 2009). به عنوان روش جایگزین، دنیتریفیکاسیون زیستی به دلیل کارایی بالا و هزینه پایین، مؤثرترین روش برای حذف نیترات محسوب می‌شود.

دنیتریفیکاسیون زیستی

دنیتریفیکاسیون زیستی معمولاً به عنوان روشی مؤثر برای حذف ترکیبات نیتروژنی از آب شناخته می‌شود و به همین دلیل در بخش‌های زیستی تصفیه آب آشامیدنی و بازچرخانی فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فرآیند، میکروارگانیسم‌ها با رشد مستقیم در آب یا در حضور یک الکترون دهنده، نیترات را در نهایت به نیتروژن مولکولی تبدیل می‌کنند که می‌تواند به صورت ایمن به اتمسفر رها شود. در مقایسه با دنیتریفیکاسیون شیمیایی که نیازمند استفاده از مواد شیمیایی مانند کاتالیزورهای فلزات سنگین، اسیدها و بازها برای تنظیم pH و همچنین مصرف انرژی الکتریکی است، دنیتریفیکاسیون زیستی روشی پایدارتر و کارآمدتر به شمار می‌آید (Alessio Siciliano et al., 2020; Rodziewicz et al., 2020). به طور معمول، در فرآیند تصفیه فاضلاب شهری، دنیتریفیکاسیون زیستی به افزودن ترکیبات خارجی نیاز ندارد، زیرا کربن آلی موجود در جریان ورودی معمولاً الکترون‌های لازم برای کاهش NO_x حاصل از مرحله نیتریفیکاسیون را فراهم می‌کند. این فرآیند تنها به مقدار محدودی انرژی، مانند انرژی پمپاژ و هم‌زدن، نیاز دارد که در سامانه‌های زیستی با اختلاط کامل^۱ متداول است. از آنجا که کربن آلی نقش منبع انرژی را ایفا می‌کند، دنیتریفیکاسیون هتروتروفیک رایج‌ترین مسیر حذف NO_x در تصفیه فاضلاب محسوب می‌شود. افزودن ترکیبات آلی، الکترون‌های مورد نیاز برای کاهش NO_x می‌توانند از دهنده‌های معدنی مانند ترکیبات احیاشده گوگرد و فلزات یا از هیدروژن مولکولی (H_2) تأمین شوند، که در این صورت فرآیند به عنوان دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک شناخته می‌شود (Di Capua et al., 2019). اگرچه دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک معمولاً کندتر از دنیتریفیکاسیون هتروتروفیک تلقی می‌شود، اما سیستم‌های اتوتروفیک مبتنی بر گوگرد احیاشده می‌توانند در شرایط بهینه، نرخ‌هایی مشابه یا حتی بالاتر از حذف نیترات را حاصل کنند، به ویژه زمانی که با پیکربندی‌های ویژه بیورآکتور و انتخاب مناسب الکترون دهنده همراه شوند (Huang et al., 2021). افزودن بر کارایی بالای آن در حذف نیتروژن از جریان‌های مایع، دنیتریفیکاسیون زیستی

^۱ completely mixed bioreactors

چه از نوع هتروتروفیک و چه اتوتروفیک می‌تواند در غیرفعال‌سازی یا سم‌زدایی طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرد؛ از جمله سولفیدها، فلزات سنگین و ترکیبات آروماتیک که قادرند به‌عنوان الکترون‌دهنده یا الکترون‌گیرنده عمل کنند. این آلاینده‌ها ممکن است منشأ طبیعی یا انسانی داشته‌باشند و به‌صورت ترکیبات آبی یا گازی وجود داشته‌باشند. مکانیسم‌های سم‌زدایی در این فرآیند عمدتاً مبتنی بر واکنش‌های اکسایش-کاهش آلاینده‌ها است که هم‌زمان با کاهش ترکیبات نیتروژنی (NO_x^-) انجام می‌شود و در نتیجه، اثرات سمی این ترکیبات را کاهش داده یا به‌طور کامل حذف می‌کند (Ucar et al., 2025).

تالاب‌های مصنوعی^۱ یا تالاب‌های تصفیه‌ای به‌منظور حذف آلاینده‌ها از آب طراحی شده‌اند و با الگوگیری از ساختار و عملکرد مواد موجود در تالاب‌های طبیعی عمل می‌کنند (Vymazal, 2007). این سیستم‌ها در سراسر جهان با هزینه‌های پایین ساخت، بهره‌برداری و نگهداری و بدون نیاز به زیرساخت‌های پیچیده لوله‌کشی توسعه یافته‌اند و در عین حال، از نظر منظر محیطی نیز دارای ارزش زیبایی‌شناختی هستند. فرآیند دنیتریفیکاسیون، مسیر اصلی حذف نیترات در تالاب‌های مصنوعی به شمار می‌رود. با این حال، در آب‌های سطحی که میزان کربن آلی آن‌ها پایین است، الکترون‌دهنده کافی برای انجام دنیتریفیکاسیون وجود ندارد؛ از این‌رو، برای دستیابی به حذف مؤثر نیتروژن، استفاده از دهنده‌های الکترون جایگزین ضروری است (Ma et al., 2020). مطالعات متعددی انواع مختلفی از الکترون‌دهنده‌های جایگزین را برای به‌کارگیری در تالاب‌های مصنوعی (CWs) پیشنهاد کرده‌اند که به‌طور کلی شامل الکترون‌دهنده‌های هتروتروفیک و اتوتروفیک هستند. با این حال، استفاده از منابع کربنی حاصل از ترشحات ریشه گیاهان آب‌دوست^۲ به‌عنوان الکترون‌دهنده هتروتروفیک، به‌تنهایی برای حفظ راندمان بالای حذف نیترات کافی نیست (Gagnon et al., 2007)؛ از این‌رو، برای تأمین الکترون‌دهنده‌های مورد نیاز، باید از منابع کربنی خارجی استفاده شود. از جمله الکترون‌دهنده‌های هتروتروفیک می‌توان به بیوجار (زغال زیستی)، منابع کربنی گیاهی و ترکیبات شیمیایی متداول کربن اشاره کرد. با این حال، به دلیل تجزیه سریع اکسایشی و مصرف سریع آن‌ها توسط میکروارگانیسم‌ها، این منابع کربنی نیازمند جایگزینی مکرر هستند (Li et al., 2014). افزون بر این، افزودن بیش از حد کربن می‌تواند منجر به رشد بیش از اندازه بیوفیلم‌ها شود، که این امر به‌نوبه خود موجب انسداد و گرفتگی بستر تالاب‌های مصنوعی می‌گردد (Zhao et al., 2019). بنابراین، به‌کارگیری الکترون‌دهنده‌های اتوتروفیک به‌عنوان رویکردی کارآمدتر و مقرون‌به‌صرفه‌تر، به‌ویژه برای مناطق کمتر توسعه‌یافته و دارای محدودیت نیروی انسانی، گزینه‌ای مناسب‌تر به شمار می‌آید (Sierra-Alvarez et al., 2007). در سال‌های اخیر، گاز هیدروژن (H_2) و ترکیبات معدنی گوگرد احیاشده (RISCs) مانند گوگرد عنصری (S^0)، سولفید (S^{2-}) و تیوسولفات ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) به‌طور گسترده به‌عنوان الکترون‌دهنده در فرآیند دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک (AuDen) در سیستم‌های ناپیوسته (batch) و پیوسته مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Di Capua et al., 2015). همچنین، کارایی ترکیباتی مانند پیریت (FeS_2)، تیوسیانات (SCN^-)، آهن دوظرفیتی (Fe^{2+}) و آرسنیت (As^{3+}) به‌عنوان منابع انرژی برای باکتری‌های دنیتریفیکان مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته‌است (Di Capua et al., 2019). انتخاب نوع الکترون‌دهنده تأثیر قابل توجهی بر سینتیک دنیتریفیکاسیون زیستی دارد. برای دستیابی به نرخ و بازده بهینه دنیتریفیکاسیون، عواملی نظیر غلظت الکترون‌دهنده، تمایل میکروبی^۳، آب‌دوستی^۴ و اندازه ذرات باید با دقت مورد ارزیابی قرار گیرند (Di Capua et al., 2016; Sierra-Alvarez et al., 2007). با توجه به نقش تعیین‌کننده الکترون‌دهنده در کارایی دنیتریفیکاسیون زیستی، در ادامه به بررسی چند الکترون‌دهنده مورد استفاده در این فرآیند

¹ Constructed Wetlands – CWs

² macrophytes

³ affinity

⁴ hydrophilicity

پرداخته می‌شود و سپس تأکید ویژه‌ای بر ترکیب معدنی پیریت (FeS_2) به عنوان یکی از کارآمدترین الکترون دهنده در دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک خواهد شد.

دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر هیدروژن

هیدروژن (H_2) گازی غیرسمی است و تنها محصول دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر آن، آب می‌باشد؛ بدین معنا که این فرآیند بدون تولید مواد مضر و فاقد هرگونه پسماند است. از دیدگاه ترمودینامیکی، هیدروژن یکی از مطلوب‌ترین الکترون‌دهنده‌ها برای انجام دنیتریفیکاسیون به شمار می‌آید (Di Capua et al., 2019). با این حال، مهم‌ترین ضعف دنیتریفیکاسیون مبتنی بر H_2 ، انحلال‌پذیری پایین این گاز در آب و همچنین خطر بالقوه انفجار آن است (Wu et al., 2018). فرآیند نیترات‌زدایی اتوتروفیک مبتنی بر H_2 باعث مصرف H^+ موجود در آب می‌شود که منجر به افزایش pH می‌گردد. افزایش بیش از حد pH می‌تواند بر فعالیت متابولیکی میکروارگانیسم‌ها و تشکیل رسوبات معدنی تأثیر منفی بگذارد. در واقع، دما، pH و غلظت H_2 محلول از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده عملکرد باکتری‌های دنیتریفیکان اتوتروفیک هیدروژنی هستند (Xing et al., 2020).

دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر آهن

در شرایط بی‌هوازی، یون آهن دوظرفیتی (Fe^{2+}) می‌تواند توسط باکتری‌های دنیتریفیکان فتواتوتروف یا شیمیواتوتروف اکسید شود، که این واکنش‌ها منجر به کاهش قلیائیت^۱ می‌شوند. نرخ دنیتریفیکاسیون حاصل از استفاده از Fe^{2+} به عنوان الکترون‌دهنده معمولاً کمتر از نرخ دنیتریفیکاسیون با دهنده‌های الکترون آلی یا معدنی دیگر است. علاوه بر این، محصول دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر آهن، یعنی $\text{Fe}(\text{OH})_3$ محلول، می‌تواند سطح سلول‌های باکتریایی را پوشش دهد و در نتیجه کارایی دنیتریفیکاسیون را کاهش دهد. همچنین، واکنش‌های کمپلکس شدن بین آهن و مواد آلی موجود در محیط می‌توانند تأثیر منفی بر فرآیند حذف نیتروژن داشته باشند (Ma et al., 2020).

دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر گوگرد

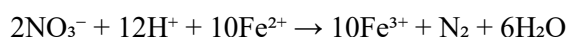
دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر گوگرد فرآیندی است که در آن، در شرایط بی‌هوازی، باکتری‌های شیمیواتوتروف یا فتواتوتروف با استفاده از گوگرد احیاء شده به عنوان الکترون‌دهنده و نیترات (NO_3^-) به عنوان الکترون گیرنده، نیترات را به نیتروژن مولکولی (N_2) و سولفات (SO_4^{2-}) تبدیل می‌کنند (Chen et al., 2018). الکترون‌دهنده‌های اصلی در دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر گوگرد، ترکیبات معدنی احیاء شده گوگرد هستند که شامل:

- گوگرد عنصری (S^0)
- سولفید (S^{2-})
- تیوسولفات ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$)

علاوه بر این، سایر ترکیبات حاوی گوگرد نیز می‌توانند به عنوان الکترون‌دهنده عمل کنند، از جمله:

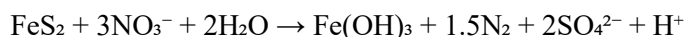
- پیریت (FeS_2)
- سولفیت (SO_3^{2-})

پیریت (FeS_2) یکی از کانی‌های رایج در چرخه بیوژئوشیمیایی گوگرد و آهن محسوب می‌شود. واکنش اکسیداسیون نیترات توسط پیریت در شرایط کاملاً بی‌هوازی به صورت زیر رخ می‌دهد (Torrentó et al., 2011).



^۱ Alkalinity

معادله شیمیایی کلی واکنش به صورت زیر بیان می شود (Bosch et al., 2012):



در این واکنش، میزان سولفات (SO_4^{2-}) تولیدی کمتر از مقدار حاصل از دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر گوگرد عنصری (S^0) است و نیاز به افزودن بافرهایی مانند سنگ آهک^۱ وجود ندارد (Ma et al., 2020). پیریت در آب نامحلول است و از یک سو می تواند به عنوان بستر عمل کند و بازده حذف نیتروژن از طریق دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک را افزایش دهد (Torrentó et al., 2011). از سوی دیگر، واسطه های متابولیکی حاصل از تجزیه پیریت، شامل یون های آهن دوظرفیتی (Fe^{2+})، آهن سه ظرفیتی (Fe^{3+}) و هیدروکسید آهن ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) می توانند با فسفات (PO_4^{3-}) موجود در فاضلاب ترکیب شده و فرآیند حذف فسفر را تسهیل کنند (Ju et al., 2014).

برای مثال، در یک بیوفیلتر جریان پیوسته، به کارگیری پیریت به عنوان فیلر منجر به حذف همزمان نیترات (NO_3^-) و فسفات (PO_4^{3-}) شده است. بررسی های فاز جامد نشان داده اند که رسوبات اصلی تشکیل شده بر سطح پیریت شامل FePO_4 ، $\text{Fe}(\text{OH})_3$ و سولفات های آهن می باشند (Di Capua et al., 2019). با توجه به ویژگی های فیزیکی و شیمیایی منحصربه فرد پیریت و توانایی آن در تأمین الکترون برای باکتری های دنیتریفیکان، مطالعات متعددی به بررسی عملکرد این ترکیب در حذف نیترات پرداخته اند. در ادامه، شماری از پژوهش های انجام شده در زمینه دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر پیریت مرور می شوند.

مرور چند پژوهش انجام شده در زمینه دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر پیریت

در پژوهش (Chen et al., 2025)، سامانه دنیتریفیکاسیون خودتغذیه ای با پیریت در قالب راکتور تماس زیستی (PAD-BC) طراحی شد که در آن طناب های پوشیده شده با پیریت همزمان به عنوان حامل بیوفیلم و منبع الکترون عمل کردند. نتایج نشان داد با کاهش اندازه ذرات پیریت و افزایش بارگذاری آن، راندمان حذف نیترات افزایش می یابد و در شرایط بهینه (پیریت با اندازه متوسط و بارگذاری مناسب) راندمان حذف نیتروژن به حدود ۹۹ درصد رسید. فرآیند حذف نیترات در غلظت های پایین از سینتیک مرتبه اول پیروی کرد، اما در غلظت های بالاتر رفتار نیم مرتبه ای داشت. در اندازه های کوچک تر پیریت، دنیتریفیکاسیون کارآمدتر بود، هرچند تولید سولفات در برخی شرایط به مقادیر بالاتر نزدیک شد. pH سیستم در محدوده پایدار باقی ماند و نیازی به افزودن قلیا نبود. بیوفیلم عمدتاً در فصل مشترک طناب و پیریت تشکیل شد. تحلیل عملکردی نشان داد در بیوفیلم، فعالیت های مرتبط با چرخه گوگرد و اکسیداسیون ترکیبات معدنی بیشتر بوده، در حالی که در لجن، فرآیندهای تخمیری غالب بوده اند. به طور کلی، استفاده از طناب های زیستی بارگذاری شده با پیریت باعث دستیابی به راندمان بالای حذف نیترات، پایداری pH، و زمان راه اندازی کوتاه شد و رویکردی مؤثر برای تصفیه آب های دارای غلظت پایین نیترات ارائه داد.

در مطالعه (Liu et al., 2023)، سامانه دنیتریفیکاسیون خودتغذیه ای ترکیبی پیریت و گوگرد (PSAD) برای حذف همزمان نیترات و فسفات از فاضلاب های با نسبت C/N پایین طراحی و ارزیابی شد. نتایج آزمایش های ناپیوسته و ستونی نشان داد که ترکیب پیریت و گوگرد به عنوان منبع مشترک الکترون، عملکرد بهتری نسبت به استفاده منفرد از هر یک دارد. در مقایسه با سامانه های SAD و PAD، سیستم PSAD بالاترین راندمان حذف نیترات و کل نیتروژن را به ترتیب حدود ۹۸/۷ درصد و ۹۹/۱ درصد به دست آورد و تجمع نیتريت در effluent پایین باقی ماند. راندمان حذف فسفات نیز تا ۱۰۰ درصد افزایش یافت. حذف فسفات عمدتاً از طریق رسوب گذاری با یون های Fe^{2+} ، Fe^{3+} و Ca^{2+} و اثر همزمان انحلال سنگ آهک انجام شد و کاهش pH موجب افزایش کارایی جذب فسفات گردید. تولید سولفات در PSAD پایین تر از مقدار تئوریک و کمتر از حد مجاز سازمان جهانی بهداشت بود. به طور کلی، سامانه PSAD توانست

^۱ limestone

بدون نیاز به منبع کربنی خارجی، حذف عمیق و همزمان نیترات و فسفات را با پایداری pH، تولید محدود سولفات و کاهش انتشار گاز N_2O محقق سازد و گزینه‌ای کارآمد برای تصفیه فاضلاب‌های کم کربن به شمار می‌آید. در پژوهش (Liu et al., 2024)، عملکرد سامانه‌ی دنیتریفیکاسیون خودتغذیه‌ای ترکیبی پیریت و گوگرد (PSAD) در مقایسه با دنیتریفیکاسیون گوگردی (SAD) و هتروتروفیک بررسی شد. نتایج نشان داد که راندمان حذف فسفات در PSAD حدود ۹۲ درصد بوده و به‌طور قابل توجهی بالاتر از SAD (۶۵ درصد) و HD (۰ درصد) بود، در حالی که حذف نیترات در همه سامانه‌ها مشابه بود. حذف فسفات عمدتاً از طریق تشکیل $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$ و Fe_3PO_4 انجام شد و با کاهش نیترات همبستگی داشت. سامانه PSAD همچنین تولید گازهای گلخانه‌ای را کاهش داد؛ غلظت N_2O در PSAD کمتر از دیگر سامانه‌ها بود و CH_4 نیز از $31/32$ به $22/32 \text{ mg/m}^3$ کاهش یافت. تولید سولفات در PSAD کمی بالاتر از SAD ولی کمتر از مقدار تثوریک بود و pH سیستم در محدوده پایدار باقی ماند. از نظر اقتصادی، هزینه فرآیند PSAD تنها حدود ۸۳ درصد هزینه SAD و یک‌پنجم هزینه HD بود. به‌طور کلی، سامانه PSAD حذف همزمان و مؤثر نیترات و فسفات را با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه کمتر نسبت به روش‌های مرسوم فراهم کرد و گزینه‌ای پایدار و کم‌هزینه برای تصفیه فاضلاب‌های کم کربن به شمار می‌آید.

در پژوهش (Zhu et al., 2023)، سامانه‌ی تالاب مصنوعی ترکیب‌شده با پیل سوختی میکروبی مبتنی بر پیریت (Pyrite-based CW-MFC) برای حذف همزمان مواد مغذی و تولید برق زیستی توسعه یافت. نتایج نشان داد که حضور پیریت عملکرد حذف مواد مغذی را به‌طور قابل توجهی بهبود داد؛ راندمان حذف کل نیتروژن، نیترات و فسفات به ترتیب حدود ۹۴/۵ درصد، ۹۷/۷ درصد و ۹۳ درصد بود و غلظت نیتريت در خروجی در حد بسیار پایین باقی ماند. حذف فسفات عمدتاً از طریق رسوب با آهن آزادشده از پیریت و تا حدی جذب سطحی انجام شد و تولید سولفات پایین‌تر از مقدار تثوریک بود.

همچنین، حضور پیریت هدایت الکتریکی و فعالیت الکتروشیمیایی سیستم را افزایش داد و موجب تولید برق زیستی شد؛ ولتاژ مدار باز و تراکم توان بیشینه به ترتیب $2/2$ و $3/3$ برابر بیشتر از CW-MFC بدون پیریت بود. به‌طور کلی، سامانه Pyrite-based CW-MFC توانست حذف مؤثر نیتروژن و فسفات را با بازده بالا انجام دهد و انرژی زیستی قابل توجهی تولید کند، و به‌عنوان رویکردی پایدار و کم‌هزینه برای تصفیه فاضلاب و بازیابی انرژی معرفی شد (Li et al., 2022). ویژگی‌های معدنی دو پیریت طبیعی از معادن یون‌فو (YP) و تونگلینگ (TP) و عملکرد آن‌ها را در فرآیند دنیتریفیکاسیون اتوتروف با پیریت (PAD) از طریق آزمایش‌های دسته‌ای و ستونی بررسی کردند. هر دو نمونه دارای بلورهای خالص و طیف XRD مشابه بودند، اما از نظر ساختاری و شیمی سطح تفاوت قابل توجهی داشتند. پیریت YP چندبلوری با لبه‌های شبکه نامنظم، اندازه ذرات کوچک‌تر (در حدود ۱۰ تا ۲۰ میکرومتر) و صفحات بلوری غالب (۱۱۰) و (۱۱۱) بود، در حالی که TP ساختار تک‌بلوری با لبه‌های منظم در صفحه (۱۰۰) و ذرات بزرگ‌تر داشت. براساس نتایج تحلیل XPS، در YP درصد گوگرد احیاء‌شده سطحی (S^{2-}) بیشتر و میزان $Fe(III)$ کمتر بود، در حالی که در TP نسبت $Fe(III)$ به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر گزارش شد. در آزمایش‌های دسته‌ای، پیریت YP توانست نیترات را طی ۲۳ روز به‌طور کامل حذف کند و نسبت مولی نیترات حذف‌شده به سولفات تولیدشده (۱/۳۷) با مقدار استوکیومتریک واکنش PAD مطابقت داشت. در مقابل، در پیریت TP هیچ‌گونه حذف نیترات مشاهده نشد و افزایش اندک سولفات (حدود ۱۵۰ میلی گرم بر لیتر) به اکسیدهای سطحی باقیمانده نسبت داده شد. حذف فسفات در TP سریع‌تر بود که ناشی از حضور آهن سه‌ظرفیتی بیشتر در سطح برای جذب بود، در حالی که در YP این فرآیند کندتر و همراه با تولید یون آهن ناشی از واکنش PAD انجام شد. کاهش pH در سیستم‌های YP به تولید یون هیدروژن در طول واکنش نسبت داده شد. در آزمایش‌های ستونی شامل ترکیبات YP-سنگ‌آهک (YPC) و TP-سنگ‌آهک (TPC) با زمان ماند هیدرولیکی

۲۴ ساعت و دوره‌ی عملکرد ۴۶ روز، مشاهده شد که واکنش PAD تنها در ستون YPC رخ داد. در فاز نخست (روزهای ۰ تا ۲۵)، غلظت نیترات در YPC تقریباً به صفر رسید و در فاز دوم حدود ۲ میلی گرم بر لیتر باقی ماند. نسبت مولی نیترات حذف شده به سولفات تولید شده در این مرحله برابر با ۱/۰۹ بود که نشان دهنده اکسیداسیون اندک هوازی است. در مقابل، ستون TPC نه تنها کاهش نیترات نداشت، بلکه افزایش آن تا سطح ورودی مشاهده شد و مقدار سولفات تولیدی نیز ناچیز (به طور میانگین حدود ۱۷ میلی گرم بر لیتر) بود. تحلیل های ساختاری و سطحی نشان داد تفاوت عملکرد دو پیریت ناشی از ویژگی های ذاتی کانی است و پارامترهایی نظیر میزان اندک اکسیژن محلول، گونه های گوگرد احیاء شده سطحی یا وجود اکسیدهای سطحی تأثیری بر ماهیت اتوتروفیک واکنش PAD ندارند. نتایج XPS و TEM بیانگر آن بود که در سطح YP اکسیداسیون همزمان آهن و گوگرد رخ داده و ترکیباتی مانند تیوسولفات ($S_2O_3^{2-}$) و سولفات (SO_4^{2-}) شکل گرفته اند، در حالی که در TP چنین پدیده ای مشاهده نشد. بنابراین توانایی انجام PAD به امکان اکسیداسیون میکروبی گوگرد سطحی وابسته است، نه به آهن. در مجموع، اختلاف عملکرد دو نوع پیریت در فرآیند PAD ناشی از ویژگی های معدنی آن ها، به ویژه نوع صفحه ی بلوری غالب و حالت شیمیایی اتم های سطحی گوگرد و آهن است. نتایج این پژوهش تأکید می کند که در کاربردهای عملی حذف نیترات و فسفات از آب و فاضلاب، انتخاب پیریت با ویژگی های سطحی مناسب اهمیت اساسی دارد، زیرا این ویژگی ها علت اصلی تفاوت و گاه تناقض در نتایج مطالعات پیشین پیرامون PAD بوده اند.

در پژوهش (Ge et al., 2020)، عملکرد سامانه ی تالاب مصنوعی-پیل سوختی میکروبی مبتنی بر پیریت (PCW-MFC) در حذف همزمان نیترات، فسفر و اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) و همچنین در تولید زیست انرژی بررسی شد. چهار ریز سامانه ساخته شد:

- تالاب مصنوعی معمولی (CW)
- تالاب مصنوعی با پیریت (PCW)
- تالاب مصنوعی-پیل سوختی میکروبی (CW-MFC)
- تالاب مصنوعی-پیل سوختی میکروبی با پیریت (PCW-MFC)

پس از ۱۸۰ روز بهره برداری، سامانه PCW-MFC بهترین کارایی را در حذف آلاینده ها و تولید برق نشان داد. در شرایط زمان ماند هیدرولیکی ۶ ساعت، راندمان حذف COD، نیترات (NO_3^- -N)، نیتروژن معدنی کل (TIN) و فسفر کل (TP) به ترتیب ۷۱/۹ درصد، ۷۰/۱ درصد، ۶۳/۲ درصد و ۹۱/۲ درصد بود. توان خروجی الکتریکی در PCW-MFC به طور میانگین ۱۹ تا ۲۸/۴ درصد بیشتر از CW-MFC بود و ثابت سرعت حذف نیترات (k) در این سامانه برابر ۱/۰۴ روز به دست آمد که به طور معنی داری از سایر سیستم ها بالاتر بود. از دیدگاه عملکرد حذف، افزودن پیریت باعث بهبود چشمگیر راندمان حذف نیترات نسبت به سیستم های بدون پیریت شد؛ به طوری که کارایی حذف نیترات در PCW-MFC حدود ۱۵ درصد بالاتر از CW معمولی بود. حذف نیتروژن از طریق دنیتریفیکاسیون ترکیبی هتروتروف و اتوتروف^۱ صورت گرفت. غلظت آمونیوم خروجی در همه سیستم ها کمتر از ۰/۶ mg/L بود؛ بنابراین فرآیند احیای نیترات به آمونیوم (DNRA) غالب نبود. در خصوص فسفر، کارایی حذف در PCW-MFC بسیار بالا و پایدار بود و اشباع جذب فسفر در طول آزمایش مشاهده نشد. تحلیل های XRD و EDS نشان داد که پس از استفاده از پیریت، ترکیبات $FePO_4$ و $FeOOH$ تشکیل شدند که نشانگر جذب یا رسوب فسفات توسط ترکیبات آهن حاصل از اکسیداسیون پیریت است. در سطح پیریت مصرف شده، درصد عناصر گوگرد و آهن کاهش و درصد اکسیژن و فسفر افزایش یافت که بیانگر اکسیداسیون سطحی پیریت و جذب فسفات است. همچنین مشخص شد که اکسیداسیون گوگرد در پیریت باعث

^۱ mixotrophic

تولید SO_4^{2-} و همزمان تسهیل حذف نیترات می‌شود. تولید سولفات در سامانه‌های حاوی پیریت کمتر از مقدار تئوریک بود که احتمالاً به دلیل فعالیت باکتری‌های احیاکننده‌ی سولفات است.

در جمع‌بندی، افزودن پیریت و ترکیب آن با پیل سوختی میکروبی موجب ارتقای قابل توجه در موارد زیر شد:

– حذف همزمان نیترات و فسفر

– تولید پایدار زیست‌برق

– تثبیت pH و کاهش غلظت سولفات در پساب خروجی.

به‌طور کلی، نتایج نشان داد که سامانه PCW-MFC فناوری مؤثری برای تصفیه‌ی فاضلاب با بار نیتروژن و فسفر بالا همراه با تولید انرژی زیستی است (Liu et al., 2023).

یک تالاب مصنوعی جدید مبتنی بر پیریت و سرباره فولاد (PSCW) را برای حذف همزمان نیتروژن و فسفر از آب‌های کم‌آلودگی توسعه دادند و عملکرد و سازوکار آن را در مقایسه با تالاب‌های مبتنی بر پیریت (PCW) و سرباره فولاد (SCW) بررسی کردند. این سیستم‌ها به‌صورت پیوسته به مدت ۲۶۰ روز، با زمان ماند هیدرولیکی (HRT) برابر با ۳۶ ساعت و در دمای ۱۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد، تحت شرایط ورودی NO_3^- ، $\text{NH}_4^+ = 5 \text{ mg/L}$ ، $\text{COD} = 30 \text{ mg/L}$ ، $\text{PO}_4^{3-} = 0.5 \text{ mg/L}$ و 5 mg/L مورد بهره‌برداری قرار گرفتند. سیستم PSCW بالاترین راندمان حذف را برای هر دو شاخص فسفر کل (TP) و نیترات (NO_3^-) نشان داد، به‌طوری‌که بازده حذف به‌ترتیب به ۹۸/۶ درصد و ۹۱/۳ درصد رسید، در حالی‌که در PCW تنها ۱۸/۶ درصد و در SCW حتی کاهش کارایی (۷/۴- درصد) مشاهده شد. عملکرد بهبودیافته‌ی PSCW به افزایش فعالیت فرآیند دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر پیریت (PAD) و خنثی‌سازی اسیدیته تولیدشده در این فرآیند توسط خاصیت قلیایی سرباره فولاد نسبت داده شد. فسفر عمدتاً به‌صورت فسفات‌های پیوندیافته با کلسیم و منیزیم (Ca + Mg-bound P) در PSCW تثبیت شد (۷۵/۳ درصد)، در حالی‌که در PCW فسفر غالباً به‌صورت پیوندیافته با آهن و آلومینیوم (Fe + Al-bound P) وجود داشت. بیش از ۸۷ درصد حذف فسفر کل در لایه معدنی (E2) از طریق جذب بستر و رسوب با یون‌های فلزی (Al^{3+} ، Fe^{3+} ، Ca^{2+}) رخ داد. ظرفیت جذب فسفر به‌ترتیب برای سرباره فولاد، پیریت و زئولیت برابر با ۳۵/۲۱۱، ۱۱/۶۲۸ و ۲/۷۱۲ mg/kg بود. آزادسازی همزمان آهن از پیریت و فلزات فعال از سرباره فولاد باعث افزایش رسوب و تثبیت فسفات شد. در مورد نیتروژن، سیستم PSCW بالاترین نرخ حذف نیترات را با راندمان $91/3 \pm 4/0$ درصد و نرخ بارگذاری $1/69 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ نشان داد. دنیتریفیکاسیون عمدتاً در لایه مخلوط رخ داد که بیانگر افزایش فعالیت PAD بود. در مجموع، افزودن سرباره فولاد به سامانه‌های مبتنی بر پیریت باعث افزایش ۴۰ تا ۵۴ درصدی حذف کل نیتروژن نسبت به سیستم‌های فاقد سرباره فولاد، بهبود قابل توجه حذف فسفر از طریق جذب و رسوب شیمیایی، کاهش آزادسازی فلزات سنگین و سمیت پساب، افزایش فعالیت میکروبی مرتبط با دنیتریفیکاسیون و چرخه گوگرد، و بهبود رشد و سلامت گیاهان تالاب شد. بنابراین، PSCW به‌عنوان یک فناوری کارآمد و پایدار برای حذف همزمان نیتروژن و فسفر از فاضلاب‌های کم‌کربن معرفی گردید.

جدول ۲. مرور پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر پیریت (FeS_2)

Table 2. Review of research conducted on pyrite (FeS_2)-based autotrophic denitrification

منبع پژوهش	نوع سامانه و ترکیب	راندمان حذف نیترات (%)	راندمان حذف فسفات (%)	تولید سولفات
(Chen et al., 2025)	راکتور تماس زیستی خودتغذیه‌ای (PAD-BC) با طناب پوشیده‌شده از پیریت	۹۹	–	متوسط
(Liu et al., 2023)	سامانه خودتغذیه‌ای ترکیبی پیریت-گوگرد	۹۸/۷	۱۰۰	کمتر از مقدار تئوریک

(Liu et al., 2024)	PSAD در مقایسه با SAD و دنیتریفیکاسیون هتروتروفیک	مشابه SAD	۹۲	کمی بالاتر از SAD
(Zhu et al., 2023)	تالاب مصنوعی-پیل سوختی میکروبی مبتنی بر پیریت (CW-MFC)	۹۷/۷	۹۳	کمتر از مقدار تثویریک
(Li et al., 2022)	دنیتریفیکاسیون خودتغذیه‌ای با دو نوع پیریت طبیعی (TP, YP)	فقط در YP (≈۱۰۰)	کندتر در YP	در YP مطابق استوکیومتری
(Ge et al., 2020)	تالاب مصنوعی-پیل سوختی میکروبی با پیریت (PCW-MFC)	۷۰/۱	۹۱/۲	کمتر از مقدار تثویریک
(Liu et al., 2023)	تالاب مصنوعی مبتنی بر پیریت و سرباره فولاد (PSCW)	۹۱/۳	۹۸/۶	کم

یافته‌ها و بحث

وضعیت آلودگی نیترات در منابع آب ایران

بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در مناطق مختلف کشور نشان می‌دهد که آلودگی نیترات یکی از مهم‌ترین چالش‌های کیفی منابع آب زیرزمینی در ایران محسوب می‌شود. در بسیاری از نواحی کشور، به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک، آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب آشامیدنی است. نتایج مطالعات در رباط کریم نشان داد که حدود ۳۳ درصد از نقاط نمونه‌برداری دارای غلظت نیترات بالاتر از حد مجاز سازمان جهانی بهداشت (۵۰ میلی‌گرم در لیتر) بودند و بالاترین مقدار به ۹۳ میلی‌گرم در لیتر رسید. در مشهد، ۴۲ درصد از چاه‌های مورد بررسی دارای غلظت نیترات بالاتر از حد مجاز بودند و در برخی نقاط مقدار آن به ۱۶۶ میلی‌گرم در لیتر نیز رسیده‌است. در دشت تهران-کرج، غلظت نیترات در محدوده ۶ تا ۱۴۸/۸ میلی‌گرم در لیتر متغیر بود و در برخی موارد تا سه برابر حد مجاز افزایش یافته‌است. در دشت اصفهان، حدود ۲۶ درصد از نمونه‌ها دارای غلظت نیترات بالاتر از حد مجاز بودند و بیشترین میزان آلودگی در زیرحوضه‌های لنجان و نجف‌آباد مشاهده شد. بررسی مرور نظام‌مند انجام‌شده نیز نشان داد که در استان‌های گیلان، مازندران، بوشهر، اردبیل، کرمان و برخی مناطق دیگر، بیش از نیمی از چاه‌های آب دارای غلظت نیترات بالاتر از حد مجاز بودند. منابع اصلی آلودگی در تمامی این مناطق شامل فعالیت‌های کشاورزی با مصرف بی‌رویه کودهای نیتروژنی، نفوذ فاضلاب‌های خانگی و صنعتی و مدیریت نامناسب منابع آب زیرزمینی بوده‌است. تداوم این وضعیت می‌تواند پیامدهای جدی بر سلامت عمومی، به‌ویژه برای کودکان و نوزادان، و نیز بر پایداری منابع آب داشته باشد.

روش‌های مرسوم حذف نیترات

روش‌های فیزیکوشیمیایی مختلفی برای حذف نیترات از آب به‌کار می‌روند. اسمز معکوس با بازده حذف تا ۹۳ درصد، تبادل یونی و الکترودیالیز با بازده ۵۰ تا ۹۹ درصد از جمله این روش‌ها هستند. با این حال، این روش‌ها با محدودیت‌های قابل توجهی از جمله مصرف بالای انرژی، گرفتگی غشا، تولید پساب‌های نمکی و هزینه‌های عملیاتی بالا مواجه هستند که آن‌ها را برای کاربردهای گسترده از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه نمی‌سازد. در مقابل، دنیتریفیکاسیون زیستی به‌عنوان روشی کارآمد، پایدار و کم‌هزینه مطرح است که در آن میکروارگانیسم‌ها نیترات را به نیتروژن مولکولی تبدیل می‌کنند. در سال‌های اخیر، توجه پژوهشگران به دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک جلب شده‌است؛ فرآیندی که در آن الکترون‌دهنده‌های معدنی نظیر گوگرد، آهن و هیدروژن جایگزین ترکیبات آلی می‌شوند. در میان این الکترون‌دهنده‌ها، پیریت (FeS_2) به‌دلیل فراوانی، پایداری شیمیایی و قابلیت اکسایش همزمان آهن و گوگرد، کارایی بالایی در حذف نیترات از آب‌های آلوده نشان داده‌است. همچنین، مطالعات اخیر نشان می‌دهد که پیریت می‌تواند علاوه بر حذف نیترات، در حذف فسفر از طریق تشکیل ترکیبات آهنی نقش مؤثری داشته باشد.

سامانه‌های دنیتریفیکاسیون اتوتروفیک مبتنی بر پیریت

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که پیریت به‌عنوان الکترون‌دهنده در فرآیند دنیتریفیکاسیون اتوتروفاک عملکرد بسیار خوبی دارد. در یک راکتور تماس زیستی با طناب‌های پوشیده‌شده از پیریت، راندمان حذف نیترات به حدود ۹۹ درصد رسید و سیستم در محدوده pH پایدار باقی ماند بدون نیاز به افزودن قلیا. در سامانه ترکیبی پیریت-گوگرد (PSAD)، راندمان حذف نیترات و فسفات به‌ترتیب به ۹۸/۷ درصد و ۱۰۰ درصد رسید و تولید سولفات کمتر از مقدار تئوریک و پایین‌تر از حد مجاز سازمان جهانی بهداشت بود. این سیستم بدون نیاز به منبع کربنی خارجی، حذف عمیق و همزمان نیترات و فسفات را با پایداری pH و کاهش انتشار گاز N_2O محقق ساخت.

در سامانه تالاب مصنوعی-پیل سوختی میکروبی مبتنی بر پیریت، راندمان حذف کل نیتروژن، نیترات و فسفات به‌ترتیب حدود ۹۴/۵ درصد، ۹۷/۷ درصد و ۹۳ درصد بود و تولید سولفات پایین‌تر از مقدار تئوریک باقی ماند. حضور پیریت هدایت الکتریکی و فعالیت الکتروشیمیایی سیستم را افزایش داد و موجب تولید برق زیستی شد. در تالاب مصنوعی ترکیبی پیریت و سرباره فولاد (PSCW)، راندمان حذف فسفات و نیترات به‌ترتیب به ۹۸/۶ درصد و ۹۱/۳ درصد رسید و افزودن سرباره فولاد باعث افزایش ۴۰ تا ۵۴ درصدی حذف کل نیتروژن نسبت به سیستم‌های فاقد سرباره شد.

با این حال، بررسی‌ها نشان داد که عملکرد سامانه‌های مبتنی بر پیریت به شدت تحت تأثیر عواملی چون اندازه ذرات، نسبت سطح به حجم، pH، دما و ویژگی‌های سطحی کانی پیریت قرار دارد. مطالعه بر روی دو نوع پیریت طبیعی نشان داد که پیریت با ساختار چندبلوری و اندازه ذرات کوچک‌تر توانست نیترات را به‌طور کامل حذف کند، در حالی که پیریت با ساختار تک‌بلوری و ذرات بزرگ‌تر هیچ‌گونه حذف نیتراتی نشان نداد. این تفاوت عملکرد به ویژگی‌های سطحی کانی، به‌ویژه نوع صفحه بلوری غالب و حالت شیمیایی اتم‌های سطحی گوگرد و آهن مربوط می‌شود. از جمله چالش‌های اصلی این فناوری می‌توان به نرخ پایین دنیتریفیکاسیون در مراحل ابتدایی، تولید سولفات به‌عنوان محصول جانبی و محدودیت در کربن غیرآلی اشاره کرد. با این حال، ترکیب پیریت با مواد مکمل مانند گوگرد، سرباره فولاد یا مواد غنی از آهن و منگنز اثرات هم‌افزایی در بهبود عملکرد و کاهش تولید سولفات و انتشار گازهای گلخانه‌ای نشان داده‌است.

نتیجه‌گیری

بررسی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که افزایش غلظت نیترات در منابع آب ایران به‌عنوان یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی مطرح است و توسعه فناوری‌های مؤثر و پایدار برای حذف آن ضرورت دارد. در میان روش‌های موجود، فرآیندهای زیستی به‌ویژه دنیتریفیکاسیون اتوتروفاک به دلیل هزینه‌ی پایین، تولید لجن کمتر و سازگاری زیست‌محیطی، جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. در مقایسه‌ی انواع دنیتریفیکاسیون اتوتروفاک، مشاهده می‌شود که فرآیندهای مبتنی بر گوگرد و آهن نسبت به سیستم‌های مبتنی بر هیدروژن ایمن‌تر و از نظر بهره‌برداری اقتصادی‌تر هستند. در این میان، ترکیب معدنی پیریت (FeS_2) به‌عنوان الکترون‌دهنده طبیعی، به‌دلیل پایداری بالا در دسترس بودن و قابلیت حذف هم‌زمان نیترات و فسفات یکی از گزینه‌های امیدبخش در سامانه‌های تصفیه زیستی محسوب می‌شود. با این حال، بررسی‌ها نشان می‌دهد که عملکرد سامانه‌های مبتنی بر پیریت به شدت تحت تأثیر عواملی چون اندازه ذرات، نسبت سطح به حجم، pH، دما، و حضور گونه‌های هم‌زیست میکروبی است. همچنین نرخ پایین دنیتریفیکاسیون در مراحل ابتدایی، تولید سولفات به‌عنوان محصول جانبی و محدودیت در کربن غیرآلی، از جمله چالش‌های اصلی این فناوری به شمار می‌روند.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی با تمرکز بر بهبود کارایی سامانه‌های مبتنی بر پیریت از طریق استفاده از ترکیبات هم‌افزا (مانند ترکیب پیریت با گوگرد، سرباره فولاد یا مواد غنی از آهن و منگنز)، طراحی سامانه‌های هیبریدی و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی ادامه یابد. همچنین مطالعه‌ی رفتار میکروبی، مسیرهای بیوشیمیایی و پایداری بلندمدت این سامانه‌ها در مقیاس پایلوت و واقعی می‌تواند دید دقیق‌تری از پتانسیل استفاده‌ی صنعتی آن‌ها فراهم سازد.

References

- Alessio Siciliano, O., Curcio, G. M., & Limonti, C. (2020). Chemical denitrification with Mg^0 particles in column systems. *Sustainability*, 12(7), 2984. <https://doi.org/10.3390/su12072984>
- Alizadeh, M., Noori, R., Omidvar, B., Nohegar, A., & Pistre, S. (2024). Human health risk of nitrate in groundwater of the Tehran–Karaj Plain, Iran. *Scientific Reports*, 14(1), 7830. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58290-6>.
- Azhdarpoor, A., Radfard, M., Pakdel, M., Abbasnia, A., Badeenezhad, A., Mohammadi, A. A., & Yousefi, M. (2019). Assessing fluoride and nitrate contaminants in drinking water resources and their health risk assessment in a semiarid region of southwest Iran. *Desalination and Water Treatment*, 149, 43–51. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23865>.
- Badihi, A., Jahangiri-rad, M., Mahmoudkhani, R., & Kashi, G. (2023). Water quality indices appraisal and health risk assessment of nitrate, mercury and lead in water distribution network: A case study of Robat Karim in Tehran, Iran. *Environmental Quality Management*, 32(3), 275-285. <https://doi.org/10.1002/tqem.21914>.
- Bhatnagar, A., & Sillanpää, M. (2011). A review of emerging adsorbents for nitrate removal from water. *Chemical Engineering Journal*, 168(2), 493-504. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.01.103>.
- Black, J. (2013). Treasure from the deep: Drinking water. Deep Ocean Stewardship Initiative. Retrieved on May, 1. https://www.dosi-project.org/wp-content/uploads/TreasuresOfTheDeep_PDF-ebook-small.pdf
- Bosch, J., Lee, K. Y., Jordan, G., Kim, K. W., & Meckenstock, R. U. (2012). Anaerobic, nitrate-dependent oxidation of pyrite nanoparticles by *Thiobacillus denitrificans*. *Environmental science & technology*, 46(4), 2095–2101. <https://doi.org/10.1021/es2022329>.
- Chen, D., Wang, H., Yang, K., & Ma, F. (2018). Performance and microbial communities in a combined bioelectrochemical and sulfur autotrophic denitrification system at low temperature. *Chemosphere*, 193, 337-342. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.017>.
- Chen, J., Wu, H., Qian, H., & Gao, Y. (2017). Assessing nitrate and fluoride contaminants in drinking water and their health risk of rural residents living in a semiarid region of Northwest China. *Exposure and Health*, 9(3), 183-195. <https://doi.org/10.1007/s12403-016-0231-9>.
- Chen, W., Liu, Z., Ren, Z., Huang, J., Yang, W., Liu, W., & Zhao, H. (2025). Pyrite autotrophic denitrification in a biological contactor for low-strength nitrate-contaminated water treatment. *Bioresource Technology*, 133355. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133355>.
- Craswell, E. (2021). Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem. *SN Applied Sciences*, 3(4), 518. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04521-8>.
- Di Capua, F., Ahoranta, S. H., Papirio, S., Lens, P. N., & Esposito, G. (2016). Impacts of sulfur source and temperature on sulfur-driven denitrification by pure and mixed cultures of *Thiobacillus*. *Process Biochemistry*, 51(10), 1576-1584. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.06.010>.
- Di Capua, F., Papirio, S., Lens, P. N., & Esposito, G. (2015). Chemolithotrophic denitrification in biofilm reactors. *Chemical Engineering Journal*, 280, 643-657. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.05.131>.
- Di Capua, F., Pirozzi, F., Lens, P. N. L., & Esposito, G. (2019). Electron donors for autotrophic denitrification. *Chemical Engineering Journal*, 362, 922-937. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.069>.

- Dolatkhah, R., Somi, M. H., Kermani, I. A., Ghojzadeh, M., Jafarabadi, M. A., Farassati, F., & Dastgiri, S. (2015). Increased colorectal cancer incidence in Iran: a systematic review and meta-analysis. *BMC public health*, 15(1), 997. <https://doi.org/10.1186/s12889-015-2342-9>.
- Ergas, S. J., & Reuss, A. F. (2001). Hydrogenotrophic denitrification of drinking water using a hollow fibre membrane bioreactor. *Journal of Water Supply: Research and Technology AQUA*, 50(3), 161-171. <https://doi.org/10.2166/aqua.2001.0015>.
- Esmaili, A., Moore, F., & Keshavarzi, B. (2014). Nitrate contamination in irrigation groundwater, Isfahan, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 72(7), 2511-2522. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3159-z>.
- Fathmawati, Fachiroh, J., Gravitiani, E., Sarto, & Husodo, A. H. (2017). Nitrate in drinking water and risk of colorectal cancer in Yogyakarta, Indonesia. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 80(2), 120-128. <https://doi.org/10.1080/15287394.2016.1260508>.
- Feleke, Z., & Sakakibara, Y. (2002). A bio-electrochemical reactor coupled with adsorber for the removal of nitrate and inhibitory pesticide. *Water Research*, 36(12), 3092-3102. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00538-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00538-3).
- Gatiboni, L. C., de Souza Junior, A. A., Dall'Orsoletta, D. J., Mumbach, G. L., Kulesza, S. B., & Abdala, D. B. (2021). Phosphorus speciation in soils with low to high degree of saturation due to swine slurry application. *Journal of environmental management*, 282, 111553. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111553>.
- Gagnon V, Chazarenc F, Comeau Y, Brisson J. (2007). Influence of macrophyte species on microbial density and activity in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 56(3), 249-54. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.510>.
- Ge, X., Cao, X., Song, X., Wang, Y., Si, Z., Zhao, Y., Wang, W., & Tesfahunegn, A. A. (2020). Bioenergy generation and simultaneous nitrate and phosphorus removal in a pyrite-based constructed wetland-microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 296, 122350. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122350>.
- Ghafari, S., Hasan, M., & Aroua, M. K. (2008). Bio-electrochemical removal of nitrate from water and wastewater—a review. *Bioresource Technology*, 99(10), 3965-3974. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.017>.
- Huan, H., Hu, L., Yang, Y., Jia, Y., Lian, X., Ma, X., Jiang, Y., & Xi, B. (2020). Groundwater nitrate pollution risk assessment of the groundwater source field based on the integrated numerical simulations in the unsaturated zone and saturated aquifer. *Environment international*, 137, 105532. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105532>.
- Huang, C., Liu, Q., Li, Z.L., Ma, X.d., Hou, Y.N., Ren, N.Q., & Wang, A.J. (2021). Relationship between functional bacteria in a denitrification desulfurization system under autotrophic, heterotrophic, and mixotrophic conditions. *Water Research*, 188, 116526. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116526>.
- Islam, S., & Suidan, M. T. (1998). Electrolytic denitrification: long term performance and effect of current intensity. *Water Research*, 32(2), 528-536. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00286-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00286-8).
- Ju, X., Wu, S., Zhang, Y., & Dong, R. (2014). Intensified nitrogen and phosphorus removal in a novel electrolysis-integrated tidal flow constructed wetland system. *Water Research*, 59, 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.04.004>.
- Rodziewicz, J., Janczukowicz, W., Mielcarek, A., & Bryszewski, K. (2020). The influence of electric current density on specific denitrification rate of and nitrogen removal rate in electrochemical and electrobiological rotating contactor. *Archives of Environmental Protection*, 46 (4), 23-32. <https://doi.org/10.24425/aep.2020.135761>.
- Li, R., Zhang, Y., & Guan, M. (2022). Investigation into pyrite autotrophic denitrification with different mineral properties. *Water Research*, 221, 118763. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118763>.
- Li, F., Lu, L., Zheng, X., Ngo, H. H., Liang, S., Guo, W., & Zhang, X. (2014). Enhanced nitrogen removal in constructed wetlands: Effects of dissolved oxygen and step-feeding. *Bioresource Technology*, 169, 395-402. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.004>.
- Liu, X., Li, Y., Wang, C., Xu, T., Liu, W., Chen, Q., Liu, X., Zhang, T., Gao, X., & Zhao, C. (2024). Pyrite and Sulfur Autotrophic Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal

- and Greenhouse Gas Emission Reduction Potential. *Environmental Engineering Science*, 41(9), 347-357. <https://doi.org/10.1089/ees.2024.0019>.
- Liu, X., Zhao, C., Xu, T., Liu, W., Chen, Q., Li, L., Tan, Y., Wang, X., & Dong, Y. (2023). Pyrite and sulfur-coupled autotrophic denitrification system for efficient nitrate and phosphate removal. *Bioresource Technology*, 384, 129363. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129363>.
- Liu, Y., Liu, X.-H., Wang, H.-C., Li, Z.-L., Liang, B., Sun, Y.-L., Cheng, H.-Y., Lu, S.-Y., & Wang, A.-J. (2023). Pyrite coupled with steel slag to enhance simultaneous nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands. *Chemical Engineering Journal*, 470, 143944. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143944>.
- Ma, Y., Zheng, X., Fang, Y., Xu, K., He, S., & Zhao, M. (2020). Autotrophic denitrification in constructed wetlands: Achievements and challenges. *Bioresource Technology*, 318, 123778. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123778>.
- Marhamati, M., Afshari, A., Kiani, B., Jannat, B., & Hashemi, M. (2021). Nitrite and nitrate levels in groundwater, water distribution network, bottled water and juices in Iran: a systematic review. *Current pharmaceutical biotechnology*, 22(10), 1325-1337. <https://doi.org/10.2174/1389201021666201203160012>.
- Martínez-Navarrete, C., Jiménez-Madrid, A., Sánchez-Navarro, I., Carrasco-Cantos, F., & Moreno-Merino, L. (2011). Conceptual framework for protecting groundwater quality. *International Journal of Water Resources Development*, 27(1), 227-243. <https://doi.org/10.1080/07900627.2010.532476>.
- Mohsenipour, M., Shahid, S., & Ebrahimi, K. (2014). Removal Techniques of Nitrate from Water. *Asian Journal of Chemistry*, 26(23). <https://doi.org/10.14233/ajchem.2014.17136>.
- Park, J. Y., & Yoo, Y. J. (2009). Biological nitrate removal in industrial wastewater treatment: which electron donor we can choose. *Applied microbiology and biotechnology*, 82(3), 415-429. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1799-1>.
- Prosnansky, M., Sakakibara, Y., & Kuroda, M. (2002). High-rate denitrification and SS rejection by biofilm-electrode reactor (BER) combined with microfiltration. *Water Research*, 36(19), 4801-4810. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00206-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00206-3).
- Rivett, M. O., Buss, S. R., Morgan, P., Smith, J. W., & Bemment, C. D. (2008). Nitrate attenuation in groundwater: a review of biogeochemical controlling processes. *Water Research*, 42(16), 4215-4232. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.07.020>.
- Seidel, C., Gorman, C., Darby, J., & Jensen, V. (2011). An assessment of the state of nitrate treatment alternatives. Final Report of the American Water Works Association, Inorganic Contaminant Research & Inorganic Water Quality Joint Project Committees, 118-121.
- Shayestehfar, M., Rezaei, A., Mousavi, S. B. F., & Yashoo, N. K. (2024). Evaluation of Groundwater Quality and Health Risk Assessment of Nitrate Concentration in the Rayen Basin, Kerman, Southeast Iran. available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3970570/v1>.
- Shrimali, M., & Singh, K. (2001). New methods of nitrate removal from water. *Environmental Pollution*, 112(3), 351-359. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00147-0](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00147-0).
- Sierra-Alvarez, R., Beristain-Cardoso, R., Salazar, M., Gómez, J., Razo-Flores, E., & Field, J. A. (2007). Chemolithotrophic denitrification with elemental sulfur for groundwater treatment. *Water Research*, 41(6), 1253-1262. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.12.039>.
- Suthar, S., Bishnoi, P., Singh, S., Mutiyar, P. K., Nema, A. K., & Patil, N. S. (2009). Nitrate contamination in groundwater of some rural areas of Rajasthan, India. *Journal of hazardous materials*, 171(1-3), 189-199. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.111>.
- Torabian, A., Hasani, A., & Samak, A. M. (2006). Nitrate Removal From Drinking Water By ION Exchange and Reverse OSMOSIS. *Journal of Environmental Science and Technology*, 8 (3), 21-28. (In Persian).
- Torrentó, C., Cama, J., Urmeneta, J., Otero, N., & Soler, A. (2010). Denitrification of groundwater with pyrite and *Thiobacillus denitrificans*. *Chemical Geology*, 278(1-2), 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.09.003>.
- Ucar, D., Sahinkaya, E., Sabba, F., & Di Capua, F. (2025). Biological denitrification for water detoxification: A review. *Chemical Engineering Journal*, 163799. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.163799>.

- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 380(1-3), 48-65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>.
- Wu, J., Yin, Y., & Wang, J. (2018). Hydrogen-based membrane biofilm reactors for nitrate removal from water and wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.178>.
- Xing, W., Wang, Y., Hao, T., He, Z., Jia, F., & Yao, H. (2020). pH control and microbial community analysis with HCl or CO₂ addition in H₂-based autotrophic denitrification. *Water Research*, 168, 115200. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115200>.
- Zendehbad, M., Cepuder, P., Loiskandl, W., & Stumpp, C. (2019). Source identification of nitrate contamination in the urban aquifer of Mashhad, Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 25, 100618. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100618>.
- Zhao, Y., Song, X., Cao, X., Wang, Y., Zhao, Z., Si, Z., & Yuan, S. (2019). Modified solid carbon sources with nitrate adsorption capability combined with nZVI improve the denitrification performance of constructed wetlands. *Bioresource Technology*, 294, 122189. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122189>.
- Zhu, Z.W., Xu, P., Yu, L., Huang, X.H., Yang, H.Y., Li, W.H., Zhang, P., Chen, J., & Kong, L.T. (2023). Innovative pyrite-based constructed wetland-microbial fuel cell for enhancing nutrients removal and bioelectricity generation. *Journal of Water Process Engineering*, 55, 104277. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104277>.

MEMORANDUM OF UNDERSTANDING ON SCIENTIFIC AND RESEARCH COOPERATION

In the event of any dispute, the matter shall first be resolved through direct negotiation. In the event that no agreement is reached, the competent authorities for adjudication shall be the judicial authorities of the Islamic Republic of Iran.

Article 9 – Term of the MoU

This MoU shall remain valid for a period of five years from the date of signature and may be extended subject to the agreement of both parties.

Note: Either party may notify the other party in writing, at least three months prior to the expiration of the term, of its intention not to renew the MoU.

Article 10 – Miscellaneous Provisions

1. This MoU shall not create an employment relationship or a legal agency/representation relationship between the parties.
2. Any change in the officials or managers of either party shall not affect the validity of this MoU.
3. This MoU has been prepared and signed in two counterparts, both of which have equal validity.

Article 11 – Number of Copies

This MoU, consisting of 11 Articles and 3 Notes, has been prepared in two counterparts, both of which are equally valid. This MoU was signed by the parties on 12 Bahman 1404 (Solar Hijri calendar).

Signatories



Mohammad Javad Amiri (PhD)

Proprietor and Director-in-Charge of the Journal of
Strategies of Engineering Sciences and Sustainable
Systems Management



Abdolreza Karbasi (PhD)

President of the Iranian Scientific
Association of Waste Engineering and
Management



Iranian Scientific Association of
Waste Engineering and Management



فصلنامه راهبردهای علوم مهندسی
و مدیریت سیستم های پایدار
Journal of Strategies of Engineering Sciences
and Sustainable Systems Management

MEMORANDUM OF UNDERSTANDING ON SCIENTIFIC AND RESEARCH COOPERATION

Note 1: The Scientific Association may, in accordance with the conditions set forth herein, nominate qualified members of its scientific board for membership in the Journal's Editorial Board. The final decision shall be made in accordance with the regulations governing scientific journals.

Note 2: Matters concerning the Journal shall be administered by the Editorial Board in accordance with the relevant regulations, and this MoU shall not prejudice the Journal's legal authority and discretion.

Article 3 – Obligations of the Scientific Association

The Scientific Association undertakes to:

1. Introduce specialized reviewers for participation in the scientific evaluation of articles;
2. Inform and introduce the Journal to its members and relevant scientific networks;
3. Cooperate scientifically in organizing joint programs and events;
4. Introduce outstanding articles from relevant scientific events for consideration for publication in the Journal, in accordance with the applicable regulations.

Article 4 – Implementation Procedure

1. Each party shall designate a representative to coordinate relevant matters.
2. Joint programs shall be implemented on the basis of written minutes of meetings and agreements.
3. A separate agreement shall be executed for each independent operational or financial activity.

Article 5 – Financial Obligations

4. This MoU, by itself, shall not create any financial obligation for either party.
5. Any expense or financial commitment shall be valid only within the framework of separate agreements duly approved by both parties.

Article 6 – Intellectual Property and Use of Name and Logo

6. Intellectual property rights relating to published works shall be governed by the regulations applicable to scientific publishing in the country.
7. The use of the name, emblem, and logo of either party shall be permitted solely within the framework of this MoU and in compliance with the relevant regulations.

Article 7 – Confidentiality

The parties undertake to treat scientific and operational information, as well as internal correspondence related to their cooperation, as confidential and shall not publish or disclose such information without the consent of the other party.

Article 8 – Dispute Resolution

MEMORANDUM OF UNDERSTANDING ON SCIENTIFIC AND RESEARCH COOPERATION

Journal of Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management

This Memorandum of Understanding (MoU) is concluded with the aim of expanding scientific, research, and specialized cooperation and in line with enhancing the quality of scientific publishing activities, between the scientific journal “Journal of Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management,” under the ownership and management of Dr. Mohammad-Javad Amiri, with its address at: Tehran, Enqelab Street, Qods Street, Zarrin-Koob Alley, and hereinafter referred to in this MoU as the “Journal,” and the Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management, represented by Dr. Abdolreza Karbasi, President of the Association, with its address at: Tehran, Enqelab Street, Qods Street, Zarrin-Koob Alley, and hereinafter referred to as the “Scientific Association,”

which is hereby concluded on the basis of the following terms and provisions:

Article 1 – Subject of the MoU

The subject of this MoU is to establish a framework for scientific and research cooperation between the two parties in the following areas:

1. Cooperation in organizing conferences, seminars, meetings, and specialized scientific events;
2. Scientific cooperation in refereeing and enhancing the quality of journal articles;
3. Participation in the publication of joint scientific works and publications in accordance with the regulations governing scientific journals;
4. Utilization of the scientific capacities of both parties in the development of relevant research activities.

Article 2 – Obligations of the Journal

The Journal undertakes to comply with the regulations governing scientific journals in the country and shall:

1. Publish the Journal regularly in four issues per year, in either Persian or English;
2. Comply with the regulations and approved guidelines of the Ministry of Science, Research and Technology concerning scientific journals;
3. Utilize the scientific expertise and capacities introduced by the Scientific Association in the process of peer review of articles;
4. Include the name and logo of the Scientific Association on the Journal’s website and official letterheads, in accordance with the applicable regulations;
5. Include the following statement on the Journal’s introduction/about page:

“This journal is the result of the joint activities of the Journal of Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management and the Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.”

Table of Contents

	Title	Page
1.	<u>Performance Evaluation of Chlor-Alkali Process Waste in Marl Soil Stabilization with Emphasis on Unconfined Compressive Strength</u>	1-22
	reza Mohammadzadeh, Mehran Moallemi, Alireza Dashti Rahmatabadib / 10.22034/jsesm.2026.252680	
2.	<u>Spatiotemporal Analysis of Traffic-Related Pollutants at a Micro-Scale Using Stacked Ensemble Learning(A Case Study of Mahalati Highway)</u>	23-40
	Nastaran Marzban Panah Maklavani / 10.22034/jsesm.2026.252609	
3.	<u>Assessment of the Cumulative Impacts of Desalination Brine Discharge on Marine Ecosystems</u>	41-59
	Masoud Sadrinassab, Neda Toraby / 10.22034/jsesm.2026.252693	
4.	<u>Analysis of Neighborhood Livability Levels in Tehran District 12 within the Framework of Sustainable Urban Development</u>	60-76
	Majid Karimpourreihan, Shahrzad Sharifjahed / 10.22034/jsesm.2026.252684	
5.	<u>Performance Evaluation of the MIDREX Gas Processing System for Reducing Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions in the Steel Industry</u>	77-95
	Mina yazdani, Bahdor Abolpor, Hanie Abbaslou / 10.22034/jsesm.2026.252687	
6.	<u>Sustainable Landscape Design of the Karaj–Qazvin Freeway for Enhancing Safety and Maintaining Habitat Connectivity</u>	96-115
	Mahdi Khansefid, zeinab Ansari Jaber, Saba Arasteh / 10.22034/jsesm.2026.252692	
7.	<u>Assessment and Selection of an Appropriate Oil Spill Response Method in Gulf of Oman</u>	116-129
	Saeed karimi, Ehsan Talebi, Mahnaz Jadidi / 10.22034/jsesm.2026.252691	
8.	<u>Economic Valuation of the Role of Rangeland Ecosystems in Soil Nutrient Conservation</u>	130-154
	Farshad Keivan Behjou / 10.22034/jsesm.2026.252689	

List of Esteemed Journal Reviewers

(in alphabetical order)

No.	Full Name	Institutional Affiliation
1	Mohammad Javad Amiri	Associate Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
2	Jahanbakhsh Balist	Assistant Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
3	Abbas Banaj Shafiei	Professor, Urmia University
4	Amirali Boroumand	PhD, Faculty of Environment, University of Tehran
5	Khadijeh Bozargomehri	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
6	Maryam Pazouki	Assistant Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
7	Alireza Pardakhti	Assistant Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
8	Mahnaz Jadidi	PhD, Faculty of Environment, University of Tehran
9	Zabihollah Chaharrahi	Assistant Professor, Faculty of Geography, University of Tehran
10	Khalil Hajipour	Associate Professor, Shiraz University
11	Hassan Darabi	Associate Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
12	Mahmoud Zoughi	PhD, Faculty of Environment, University of Tehran
13	Lobat Zebardast	Associate Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
14	Navid Zamani	Assistant Professor, Lorestan University
15	Roudabeh Samiei Zafarghandi	Assistant Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
16	Takhtam Shahriari	Associate Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
17	Masoud Sadri-Nasab	Associate Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
18	Ali Alavi Naeini	Assistant Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
19	Abdolreza Karbasi	Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
20	Gholamreza Nabi-Bidhendi	Professor, Faculty of Environment, University of Tehran

should use Times New Roman 11 pt. The manuscript should be single-spaced, fully justified, and formatted according to the journal template. Main section headings should appear in B Titr 12 pt, and subsection headings in B Titr 11 pt. Numbering of section headings should be avoided.

Tables, Figures, and Equations

All tables, figures, charts, maps, and illustrations should be numbered consecutively in the order in which they appear in the manuscript. Tables must include titles placed above the table, whereas figure captions should appear below the figure. Every table and figure should be cited within the text and prepared in publication-quality resolution. Mathematical equations should be created using Microsoft Equation and numbered sequentially throughout the manuscript.

References

All citations and references must conform to the **APA 7th Edition** referencing style. Every citation appearing in the text must be included in the reference list, and all references listed must be cited in the manuscript. Persian-language references should also be transliterated or translated into English in the References section, followed by the notation **[In Persian]**. Authors are responsible for ensuring the completeness and accuracy of all bibliographic information.

Submission Files

Authors are required to upload four separate files during submission: the anonymized main manuscript, the author information file, the author commitment form, and the conflict-of-interest declaration. Submissions lacking any of these required documents will not proceed to peer review.

Publication Ethics

Authors are expected to comply fully with internationally accepted principles of publication ethics. Manuscripts involving plagiarism, data fabrication or falsification, duplicate publication, inappropriate authorship attribution, or other forms of research misconduct will be rejected. Authors are solely responsible for obtaining all necessary permissions for copyrighted material and ensuring compliance with applicable ethical standards throughout the research and publication process.

Author Guideline of Journal of Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management

Aims and Scope

The *Journal of Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management* publishes original, high-quality research that advances knowledge in engineering sciences, sustainable systems management, environmental studies, sustainability, governance, planning, emerging technologies, and related interdisciplinary fields. The journal welcomes studies that provide theoretical innovation, methodological advancement, or practical solutions to contemporary scientific and societal challenges.

Submission Policy

Submitted manuscripts must represent original work that has not been published previously and is not under consideration by another journal. Authors are fully responsible for the originality of the manuscript, the accuracy of the reported data, compliance with research ethics, and the integrity of the submission. All manuscripts must be submitted through the journal's online submission system and will undergo an initial editorial screening before entering the peer-review process.

Peer Review Process

The journal employs a double-blind peer-review system in which neither authors nor reviewers are informed of each other's identities. Consequently, the main manuscript must not contain author names, affiliations, acknowledgements, funding information, or any other identifying details. Editorial decisions regarding acceptance, revision, or rejection are based on reviewers' evaluations and the judgment of the Editorial Board.

Manuscript Organization

Manuscripts should include the following sections: Title, Abstract, Keywords, Introduction, Methodology, Results and Discussion, Conclusion, and References. The Introduction should clearly present the research problem, objectives, background, and significance of the study. The Methodology section should provide sufficient detail regarding research design, participants, instruments, data collection procedures, analytical methods, and ethical considerations. Results should be reported objectively and accurately, while the Discussion should interpret the findings in relation to previous research. The Conclusion should summarize the main findings, theoretical and practical implications, study limitations, and recommendations for future research.

Abstract and Keywords

The Persian abstract should contain between 300 and 400 words and be written as a structured abstract covering the study objective, methodology, principal findings, and conclusion in a single coherent paragraph. An extended English abstract of 500–700 words is mandatory and should include the headings Introduction, Method, Results, and Conclusions. Authors should provide three to five keywords in both Persian and English, ensuring that the English keywords accurately correspond to their Persian equivalents.

Manuscript Formatting

The complete manuscript, including abstracts, tables, figures, and references, should not exceed fifteen pages. Persian text should be prepared in B Nazanin 13 pt, while English text

Thematic Areas

This journal welcomes research articles, review articles, case studies, and applied studies in the following thematic areas:

1. Systems Thinking, Resilience, and Sustainability Engineering
2. Environmental Assessment (Development Impacts, Land Suitability, Strategic Environmental Assessment, and Life Cycle Assessment)
3. Environmental Monitoring, Management, and Engineering
4. Climate Change, Disaster Risk Management, and Nature-Based Solutions
5. Water Resources, Ecosystems, Biodiversity, and the Marine Environment
6. Renewable Energy, Energy Efficiency, and Low-Carbon Systems
7. Environmental Economics, Circular Economy, Waste Management, and Sustainable Production and Consumption
8. Emerging Technologies (Artificial Intelligence, Data Science, Internet of Things, GIS, and Remote Sensing)
9. Urban Planning, Green Infrastructure, Sustainable Architecture, and Sustainable Civil Engineering
10. Sustainable Industries (Oil, Gas, Mining, Petrochemicals, HSE, and Supply Chains)
11. Governance, Policy-Making, Innovation, and Sustainable Businesses
12. Social Dimensions of Sustainability (Education, Ethics, Environmental Justice, Health, and Stakeholder Engagement)

Objectives and Vision

The journal *Strategies in Engineering Sciences and Sustainable Systems Management* was established with the aim of advancing the frontiers of knowledge, promoting innovative research, and providing a scientific platform for the exchange of ideas and research findings in the fields of engineering, management, and sustainability. Through the publication of original, applied, and interdisciplinary scholarly articles, the journal seeks to contribute to identifying and developing effective solutions to the complex challenges of sustainable development at the local, national, and global levels. Enhancing the quality of decision-making, policymaking, and management in organizations, industries, and communities through the application of robust scientific evidence is also among the journal's principal objectives.

Adopting a systems-oriented and forward-looking approach, the journal focuses on advancing knowledge in areas including sustainable systems engineering, resource management, emerging technologies, digital transformation, renewable energy, risk management and resilience, sustainable governance, the circular economy, and technological innovation. Accordingly, it seeks to foster meaningful interaction among researchers, professionals, managers, policymakers, and industry practitioners and, by supporting interdisciplinary research, to help bridge the gap between theoretical knowledge and practical applications. The journal also prioritizes research that contributes to addressing real-world societal challenges and advancing the Sustainable Development Goals (SDGs).

The journal's vision is to become, in the years ahead, a reputable and influential scholarly reference in the field of engineering sciences and sustainable systems management at the national and regional levels and, through indexing in reputable international databases, to play an effective role in shaping scientific discourse and generating knowledge of lasting scholarly value. The journal seeks to become a hub for the dissemination of pioneering and impactful research by maintaining high standards of scientific rigor, research ethics, and peer-review quality, while making a meaningful contribution to shaping innovative engineering, managerial, and policy approaches toward a sustainable, smart, and resilient future.



**Strategies in Engineering Sciences and Sustainable Systems
Management
(Scientific Journal)
Volume 1, Issue 1, Winter 2025–2026**

Morteza Ghabadi, PhD — Associate Professor, Lorestan University
Hossein Rahmani, PhD — Associate Professor, Sari University of Agricultural Sciences and
Natural Resources

Bahman Jabbaryan Amiri, PhD — Associate Professor, University of Łódź, Poland

Babak Naeimi, PhD — Senior Researcher, Utrecht University, the Netherlands

Edwin Safari, PhD — Assistant Professor, University of Toronto, Canada

Mohsen Saeidi, PhD — Professor, University of British Columbia, Canada

Mehrdad Nazariha, PhD — Assistant Professor, University of Ottawa, Canada

English Language Editor: Mohammad Alavi, PhD — Professor, University of Tehran

Scientific Editor: Roudabeh Samiei Zafarghandi, PhD

Literary Editor: Fatemeh Zare Sheikh-Kalaei, PhD

Graphic Designer: Hamed Ahmadi, MSc

Executive Officer: Sahar Bidokhti, MSc

Layout Editor: Manizhe Shirmohamadi, MSc

Articles represent the intellectual contributions of their authors and are published in the order in which they are received and approved for publication.

This quarterly journal is published with the support of the Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

Pursuant to Article 13 of the Press Law, ratified by the Islamic Consultative Assembly on 28 February 1990, a publication license for *Strategies in Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, in Persian and English and published quarterly, was issued under **Registration No. 99862.**

Address: Room 303, No. 15, Dr. Abdolhossein Zarrinkoub Alley, corner of Dr. Abdolhossein Zarrinkoub Alley, Qods Street, Enghelab Street, Tehran, Iran

Journal Website: www.jsesm.ir

Telephone: +98 21 6111 3177

Postal Code: 1417853111

Email: jsessm@gmail.com

Abstracting and Indexing

This journal is indexed in the following databases:

- Scientific Information Database (SID), Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR)
- Google Scholar



Iranian Scientific Association of
Waste Engineering and Management



فصلنامه راهبردهای علوم مهندسی
و مدیریت سیستم های پایدار
Journal of Strategies of Engineering Sciences
and Sustainable Systems Management

Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management

Editor-in-Chief: Mohammad Javad Amiri, PhD

Editor: Abdolreza Karbasi, PhD

Managing Editor: Mahnaz Jadidi, PhD

Associate Editors: Jahanbakhsh Balist, PhD; Amirali Boroumand, PhD

Advisor: Masoud Nasouri, PhD

Editorial Board

- Naser Mehrdadi, PhD — Professor, University of Tehran
Gholamreza Nabi Bidhendi, PhD — Professor, University of Tehran
Abdolreza Karbasi, PhD — Professor, University of Tehran
Mohammad Javad Amiri, PhD — Associate Professor, University of Tehran
Shahnaz Danesh, PhD — Professor, Ferdowsi University of Mashhad
Seyed Mohsen Hosseini, PhD — Professor, Tarbiat Modares University
Kamran Davari, PhD — Professor, Ferdowsi University of Mashhad
Afshin Takdastan, PhD — Professor, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences
Mahmoudreza Hemami, PhD — Professor, Isfahan University of Technology
Ali Asadi, PhD — Professor, University of Tehran
Masoud Sadri-Nasab, PhD — Associate Professor, University of Tehran
Mohammad-Hossein Nik-Sokhan, PhD — Professor, University of Tehran
Behrouz Behnam, PhD — Associate Professor, Amirkabir University of Technology
Mohammad Kaboli, PhD — Professor, University of Tehran
Alireza Zare-Asadi, PhD — Professor, Shahid Chamran University of Ahvaz
Kamaledin Naseri, PhD — Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
Masoud Rezaei, PhD — Professor, Tarbiat Modares University
Abbas Banaj Shafiei, PhD — Professor, Urmia University
Hassan Darabi, PhD — Associate Professor, University of Tehran
Lobat Zebardast, PhD — Associate Professor, University of Tehran
Marjan Mohammadzadeh, PhD — Associate Professor, Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources
Mehdi Jalili Ghazi-Zadeh, PhD — Associate Professor, Shahid Beheshti University
Hamidreza Pourkhabbaz, PhD — Associate Professor, Khatam al-Anbia University of
Technology, Behbahan
Kiumars Safidi, PhD — Professor, University of Mohaghegh Ardabili
Mohammad Reza Ekhtesasi, PhD — Professor, Yazd University
Naghi Shabanian, PhD — Associate Professor, University of Guilan

Scientific Journal



ENGINEERING SCIENCES STRATEGIES AND SUSTAINABLE SYSTEMS MANAGEMENT

Vol. 1 | No. 1 | Winter 2026

In This Issue

- Determination of a Safe Buffer Zone for an Industrial Facility to Manage Air Pollutant Emissions
- Design of Deep Learning-Based Models for Intelligent Waste Classification Using Single-Label and Multi-Label Approaches
- The Role of Macrobenthic Indicator Species as Bioindicators for Assessing Marine Ecosystem Health
- Sustainable Management of Solar Panels within the Framework of a Circular Economy
- Investigating the Role of Latent Variables and Species Interactions in Joint Species Distribution Modeling of Fish Species in Rivers of the Southern Caspian Sea Basin
- A Comparative Assessment of Tehran's Wastewater Treatment Plants from the Perspective of International Standards
- Investigating the Interactions among Visual Comfort Components in Buildings and Their Impact on Sustainable Performance
- Nitrate Removal from Contaminated Water Sources Using Pyrite-Based Autotrophic Denitrification



**Iranian Solid
Waste Association**