



دوره ۲ | شماره ۱ | بهار ۱۴۰۵

عناوين مقالات

- 
- انجمن مهندسی و مدیریت پسماند ایران



اسلام‌الرحمن

فصلنامه راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم‌های پایدار

(نشریه علمی)

سال دوم، شماره اول، بهار ۱۴۰۵

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 دازابی - 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 شیخکلائی

گرافیکست: مهندس حامد احمدی کارشناس اجرایی: مهندس سحر بیدختی صفحه آرا: مهندس پیمان حیدری

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

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.	بالیست جهانبخش	استادیار دانشکده محیط‌زیست - دانشگاه تهران
۲.	بانج شفيعی عباس	استاد دانشگاه ارومیه
۳.	برومند پویان	استادیار دانشگاه شیراز
۴.	پازوکی مریم	استادیار دانشکده محیط‌زیست - دانشگاه تهران
۵.	پرداختی علیرضا	دانشیار دانشکده محیط‌زیست - دانشگاه تهران
۶.	چهارراهی ذبیح‌الله	استادیار دانشکده جغرافیا - دانشگاه تهران
۷.	حسین‌زاده محمدمهدی	دانشیار دانشکده علوم زمین - دانشگاه شهید بهشتی
۸.	حسینی سید محسن	استاد دانشکده منابع طبیعی - دانشگاه تربیت مدرس
۹.	دارابی حسن	دانشیار دانشکده محیط‌زیست - دانشگاه تهران
۱۰.	زبردست لعبت	دانشیار دانشکده محیط‌زیست - دانشگاه تهران
۱۱.	زمانی وحید	استادیار دانشگاه کردستان
۱۲.	سمیعی زفرقندی رودابه	استادیار دانشکده محیط‌زیست - دانشگاه تهران
۱۳.	صدری‌نسب مسعود	دانشیار دانشکده محیط‌زیست - دانشگاه تهران
۱۴.	قبادی مرتضی	دانشیار دانشگاه لرستان
۱۵.	کرباسی عبدالرضا	استاد دانشکده محیط‌زیست - دانشگاه تهران
۱۶.	لیاقتی هومان	استاد پژوهشکده علوم محیطی - دانشگاه شهید بهشتی
۱۷.	مشاری محمد	استادیار دانشکده محیط‌زیست - دانشگاه تهران
۱۸.	معرب یاسر	استادیار دانشگاه امام حسین (ع)
۱۹.	مهاجر میلانی آزاده	استادیار دانشکده محیط‌زیست - دانشگاه تهران
۲۰.	مهردادی ناصر	استاد دانشکده محیط‌زیست - دانشگاه تهران
۲۱.	ناصری کمال‌الدین	دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد
۲۲.	نبی بیدهندی غلامرضا	استاد دانشکده محیط‌زیست - دانشگاه تهران
۲۳.	همامی محمودرضا	استاد دانشگاه صنعتی اصفهان
۲۴.	الوانی‌نژاد سهراب	دانشیار دانشگاه یاسوج
۲۵.	یزدی محمد	استاد پژوهشکده علوم محیطی - دانشگاه شهید بهشتی

فهرست مطالب

صفحات	فهرست مندرجات
۱-۱۸	ارزیابی عملکرد پسماند فرآیند کلر-آلکالی در تثبیت خاک مارن با تأکید بر مقاومت فشاری تک‌محوری رضا محمدزاده، مهران معلمی، علیرضا دشتی رحمت آبادی / 10.22034/jsesm.2026.252680
۱۹-۳۹	تحلیل مکانی-زمانی آلاینده‌های مرتبط با ترافیک در مقیاس خرد با استفاده از یادگیری گروهی پشته‌ای (مطالعه موردی بزرگراه محلاتی) نسترن مرزبان پناه ماکلوانی / 10.22034/jsesm.2026.252609
۴۰-۵۳	بررسی اثرات تجمعی تخلیه پساب آب‌شیرین‌کن‌ها بر اکوسیستم‌های دریایی مسعود صدری نسب، ندا ترابی / 10.22034/jsesm.2026.252693
۵۴-۶۹	تحلیل سطح زیست‌پذیری محلات منطقه ۱۲ تهران در چارچوب توسعه پایدار شهری مجید کریم پور ریحان، شهرزاد شریف جاهد / 10.22034/jsesm.2026.252684
۷۰-۸۷	ارزیابی عملکرد سیستم فرآوری گاز MIDREX با هدف کاهش مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن در صنعت فولاد مینا یزدانی، بهادر ابول‌پور، حانیه عباسلو / 10.22034/jsesm.2026.252687
۸۸-۱۰۸	طراحی منظر پایدار آزادراه کرج-قزوین با هدف ارتقای ایمنی و حفظ پیوستگی زیستگاه‌ها مهدی خان سفید، زینب انصاری جابری، صبا آراسته / 10.22034/jsesm.2026.252692
۱۰۹-۱۲۰	ارزیابی و انتخاب روش مناسب مقابله با لکه‌های نفتی در دریای عمان سعید کریمی، احسان طالبی، مهناز جدیدی / 10.22034/jsesm.2026.252691
۱۲۱-۱۳۴	ارزش‌گذاری اقتصادی نقش اکوسیستم‌های مرتعی در حفظ عناصر غذایی خاک فرشاد کیوان بهجو / 10.22034/jsesm.2026.252689



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.

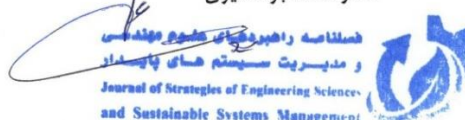
تبصره ۲: امور علمی نشریه توسط هیئت تحریریه طبق مقررات مربوطه اداره می‌شود و این تفاهم‌نامه ناقض اختیارات قانونی نشریه نخواهد بود.

رییس انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران
دکتر عبدالرضا کرباسی



انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران
(شماره ثبت: ۲۸۵۱۶)

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 سیستم‌های ایران

دکتر عبدالرضا کرباسی

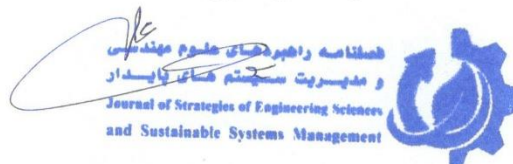


انجمن علمی مهندسی و مدیریت سیستم‌های ایران
(شماره ثبت: ۲۸۵۲۶)

صاحب‌امتیاز 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





Performance Evaluation of Chlor-Alkali Process Waste in Marl Soil Stabilization with Emphasis on Unconfined Compressive Strength

Reza Mohammadzadeh^{a*}, Mehran Moallemi^b, Alireza Dashti Rahmatabadi^b

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

^bDepartment of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

*Corresponding Author: mohammadzadeh.r@ut.ac.ir, <https://orcid.org/0009-0000-3506-3368>

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 2026/03/25

Received in revised form:
2026/04/19

Accepted: 2026/04/26

Available online: 2026/05/21

Keywords:

Soil Stabilization,
Marl Soil,
Chlor-Alkali Process,
Waste Management,
Unconfined Compressive
Strength.

ABSTRACT

The growth of the petrochemical industry in Iran has resulted in the generation of substantial quantities of chemical waste, posing a significant environmental challenge in terms of waste management. Chlor-alkali process waste predominantly contains calcium carbonate and magnesium hydroxide, and its composition provides potential for beneficial reuse in various applications, including as a filler in construction materials, a neutralizing agent, and a stabilizing material for problematic soils. Marl soils are also highly sensitive to moisture variations and may experience substantial reductions in strength, with strength losses of up to 80% reported with increasing moisture content. Conventional soil stabilization methods, particularly the use of cement and lime, have limited environmental sustainability due to their high energy consumption and associated greenhouse gas emissions. Therefore, this study investigates the feasibility of utilizing chlor-alkali waste from Bandar Imam Khomeini as a low-cost stabilizing agent to improve the mechanical properties of marl soil. In this laboratory study, marl soil specimens were mixed with 30% chlor-alkali waste by dry weight, both with and without alkaline activators. The specimens were subsequently cured for 7 days and subjected to unconfined compressive strength (UCS) testing. The results showed that the addition of chlor-alkali waste increased the compressive strength from 90 kPa for the untreated control specimen to 123 kPa for the stabilized specimen, corresponding to a 35.66% improvement in strength. This enhancement in strength is attributed to the formation of hydrated calcium silicate and magnesium silicate phases resulting from pozzolanic reactions between the calcium and magnesium ions present in the waste and the silicate and aluminate components of the marl soil. In contrast, specimens containing alkaline activators exhibited a substantial reduction in strength, reaching 48.49 kPa, indicating the adverse effect of excessive alkalinity on the stabilization process. Based on the findings of this study, chlor-alkali process waste can provide a practical approach for the management and beneficial reuse of industrial waste while serving as an effective stabilizing material for marl soils.

Cite this article: Mohammadzadeh, R., Moallemi, M., & Dashti Rahmatabadi, A. (2026). Performance Evaluation of Chlor-Alkali Process Waste in Marl Soil Stabilization with Emphasis on Unconfined Compressive Strength. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 2(1), 1-19. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252680>.



© The Author(s).

Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252680>.

Introduction

The rapid expansion of the oil, petrochemical, and chemical industries has contributed substantially to economic development and industrial growth but has also resulted in the generation of considerable quantities of industrial waste. The chlor-alkali process is one of the important industrial processes in which brine is electrolyzed to produce chlorine, sodium hydroxide, and hydrogen. These products are widely used in the production of pharmaceuticals, detergents, disinfectants, pesticides, plastics, and many other industrial products. However, the purification and demineralization of brine before electrolysis generates solid waste containing considerable amounts of calcium carbonate, magnesium hydroxide, sodium chloride, and other mineral constituents. Improper disposal of this waste can cause environmental problems and increase the burden on industrial waste-management systems. Marl is also considered a problematic soil because of its complex mineralogical composition and sensitivity to moisture variations. The simultaneous presence of clay minerals and calcium carbonate can significantly affect its mechanical behavior under wetting, drying, and loading conditions. Although marl may exhibit relatively high strength in a dry state, its strength can decrease considerably under saturated conditions, limiting its use in infrastructure projects. Chemical stabilization is widely used to improve the engineering properties of problematic soils because of its effectiveness, flexibility, and relatively low cost. Cement is one of the most common stabilizing materials; however, its production is energy-intensive and associated with considerable carbon dioxide emissions. Therefore, the reuse of industrial wastes as alternative stabilizing materials can provide both environmental and geotechnical benefits. Accordingly, this study investigated the feasibility of using chlor-alkali process waste generated in Bandar Imam Khomeini as a stabilizing agent for marl soil. The main objective was to evaluate the effect of the waste on the unconfined compressive strength (UCS) of marl and to determine whether this industrial by-product could serve as a more sustainable alternative to conventional stabilizing materials. The effect of an alkaline activator consisting of sodium hydroxide and sodium silicate was also examined.

Method

A laboratory-based experimental approach was adopted. Based on previous studies and the chemical composition of the chlor-alkali waste, particularly the presence of calcium carbonate and magnesium hydroxide, the waste was considered potentially suitable for marl stabilization. A waste content of 30% by dry weight was selected as an initial level for evaluating its stabilization performance. Three mixtures were prepared: untreated marl as the control specimen, marl containing 30% chlor-alkali waste, and marl containing 30% chlor-alkali waste with an alkaline activator. The dry materials were thoroughly mixed, after which water was added until a homogeneous mixture was obtained. The initial moisture content was set at 8%, corresponding to the dry side of the optimum moisture content obtained from compaction tests. The specimens were compacted to a dry density of 1.5 g/cm^3 , equivalent to approximately 84% of the maximum dry density. For the activated mixture, a 14 M sodium hydroxide solution was prepared and mixed with sodium silicate at an equal mass ratio. The resulting activator was added at a dosage corresponding to 50% of the mass of the chlor-alkali waste. The mixtures were compacted in cylindrical PVC molds measuring 5 cm in diameter and 10 cm in height in accordance with the requirements of ASTM D2166. Petroleum jelly was applied to the internal surfaces of the molds to facilitate demolding. After preparation, the specimens were placed in sealed plastic chambers to minimize moisture loss and cured for seven days at an ambient laboratory temperature of approximately 25°C . Following curing, the specimens were removed from the molds and tested for unconfined compressive strength. Mean UCS values and standard deviations were subsequently determined.

Results

The results showed that adding 30% chlor-alkali process waste increased the mean UCS of marl from 90 to 123 kPa after seven days of curing, corresponding to a 35.66% improvement. This increase may be attributed to interactions between the calcium- and magnesium-bearing constituents of the waste and reactive mineral phases in the marl, potentially enhancing interparticle bonding and soil cohesion. However, the formation of C–S–H and M–S–H phases could not be experimentally verified because XRD and SEM analyses were not performed. In contrast, the addition of the alkaline activator reduced the UCS to 48.49 kPa. This reduction may be related to the high alkalinity and increased salinity resulting from the combined use of 14 M NaOH, sodium silicate, and the NaCl-rich waste (40.9% NaCl). Overall, direct application of chlor-alkali waste produced the most favorable mechanical performance, whereas alkaline activation had an adverse effect on strength development.

Conclusions

The findings demonstrate the potential of chlor-alkali process waste as a stabilizing material for marl soil. Incorporation of 30% waste by dry weight increased the seven-day UCS from 90 to 123 kPa, representing an improvement of approximately 35.66%. This improvement may be associated with interactions between calcium- and magnesium-bearing constituents of the waste and reactive mineral phases in the marl, potentially promoting the development of cementitious binding products. However, further mineralogical and microstructural analyses are required to confirm these mechanisms. In contrast, the alkaline activator composed of sodium hydroxide and sodium silicate reduced the UCS to 48.49 kPa, indicating that activation was not beneficial under the conditions investigated. Therefore, direct utilization of chlor-alkali waste, without alkaline activation, appears to be a more promising approach for marl stabilization. The reuse of this industrial waste can potentially reduce the volume of waste requiring disposal while decreasing dependence on conventional cementitious stabilizers. Considering the availability of chlor-alkali waste in southern Iran, particularly around Bandar Imam Khomeini, this approach may have practical potential for construction applications in the region. Nevertheless, further studies should investigate different waste contents, longer curing periods, durability under repeated wetting–drying cycles, and the leaching behavior of stabilized materials. XRD and SEM analyses are also recommended to identify reaction products and clarify the mechanisms governing strength development. Overall, the beneficial reuse of chlor-alkali process waste represents a potentially sustainable strategy for problematic-soil stabilization while simultaneously contributing to industrial waste management and more environmentally sustainable construction practices.



ارزیابی عملکرد پسماند فرآیند کلر - آلکالی در تثبیت خاک مارن با تأکید بر مقاومت فشاری تک محوری

رضا محمدزاده^{a*}، مهران معلمی^b، علیرضا دشتی رحمت آبادی^b

^aگروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

^bگروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

*نویسنده مسئول: رضا محمدزاده mohammadzadeh.r@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	رشد صنایع پتروشیمی در ایران حجم زیادی پسماند شیمیایی تولید کرده که مدیریت آن چالش محیط زیستی جدی است. پسماند فرآیند کلر-آلکالی عمدتاً حاوی کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم می باشد که به جهت مدیریت پسماند می توان از پتانسیل این پسماند در مواردی از جمله پرکننده مصالح ساختمانی، خنثی کننده مواد و همچنین تثبیت کننده خاک های مسئله دار استفاده کرد. خاک مارن نیز از است که با افزایش رطوبت تا ۸۰ درصد افت مقاومت نشان می دهد. روش های متداول تثبیت (سیمان و آهک) به دلیل مصرف بالای انرژی و انتشار گازهای گلخانه ای، پایداری زیست محیطی کمی دارند. این پژوهش امکان سنجی استفاده از پسماند کلر-آلکالی بندر امام خمینی به عنوان تثبیت کننده کم هزینه برای بهبود خواص مکانیکی خاک مارن را بررسی می کند. در این مطالعه آزمایشگاهی، نمونه های خاک مارن با ۳۰ درصد وزنی پسماند کلر-آلکالی همراه و بدون فعال کننده های قلیایی ترکیب شده و پس از ۷ روز عمل آوری، تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزودن پسماند به خاک مارن، موجب افزایش مقاومت فشاری از ۹۰ کیلوپاسکال در نمونه شاهد به ۱۲۳ کیلوپاسکال در نمونه تثبیت شده گردیده که بیانگر بهبود ۳۵/۶۶ درصدی می باشد. این افزایش مقاومت به تشکیل فازهای هیدراته سیلیکات کلسیم و سیلیکات منیزیم در اثر واکنش های پوزولانی بین یون های کلسیم و منیزیم موجود در پسماند با سیلیکات ها و آلومینات های خاک مارن نسبت داده می شود. در مقابل، نمونه های حاوی فعال کننده های قلیایی با افت مقاومت به ۴۸/۴۹ کیلوپاسکال مواجه شدند که حاکی از اثر نامطلوب قلیائیت بالا بر فرآیند تثبیت است. بر اساس یافته های این پژوهش، پسماند فرآیند کلر-آلکالی ضمن ارائه راهکاری عملی برای مدیریت پسماندهای صنعتی، می تواند به عنوان ماده ای مؤثر در تثبیت خاک های مارن استفاده شود.
کلیدواژه ها: تثبیت خاک، خاک مارن، فرآیند کلر-آلکالی، مدیریت پسماند، مقاومت فشاری تک محوری خاک.	

استناد به این مقاله: محمدزاده، رضا؛ معلمی، مهران و دشتی رحمت آبادی، علیرضا. (۱۴۰۵). ارزیابی عملکرد پسماند فرآیند کلر-آلکالی در تثبیت خاک مارن با تأکید بر مقاومت فشاری تک محوری. راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، ۲(۱)، ۱-۱۹.

<https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252680>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252680>.

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد سریع صنایع نفت و پتروشیمی نقش بسزایی در توسعه اقتصادی کشورها ایفا کرده‌است، اما در عین حال منجر به تولید حجم بالایی از آلاینده‌ها و پسماندهای صنعتی شده‌است (Das et al., 2023; Oladimeji et al., 2025; Yeshiwas et al., 2025; al., 2024). بر اساس گزارش‌های موجود، صنایع پتروشیمی سالانه میلیون‌ها تن پسماند جامد تولید می‌کنند که بخش قابل توجهی از آن بدون مدیریت اصولی دفع می‌شود. این پسماندها به دلیل دارا بودن ترکیبات شیمیایی خطرناک نظیر فلزات سنگین، نمک‌های قلیایی و مواد سمی، اثرات نامطلوبی بر محیط‌زیست و سلامت انسان دارند (Hsu et al., 2019; Das et al., 2023). مدیریت نادرست این پسماندها در کشورهای در حال توسعه، یکی از چالش‌های اساسی زیست‌محیطی محسوب می‌شود. یکی از فرآیندهای مهم در صنایع پتروشیمی، فرآیند کلر-آلکالی است که با استفاده از الکترولیز محلول آب‌نمک، محصولات اصلی از جمله کلر، هیدروکسید سدیم و هیدروژن را تولید می‌کند (Aziz et al., 2017; Crook & Mousavi, 2016; Lakshmanan & Murugesan, 2014). کلر و هیدروکسید سدیم جزو ده ماده شیمیایی برتر و پرمصرف در جهان هستند که در تولید طیف گسترده‌ای از محصولات شامل داروها، مواد شوینده، دئودورانت‌ها، ضد عفونی‌کننده‌ها، علف‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها و پلاستیک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (Contreras et al., 2025; Ito & Manabe, 2022).

این فرآیند علاوه بر تولید مواد سودمند، منجر به ایجاد پسماندهایی غنی از کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم می‌شود که دفع غیراصولی آن‌ها مشکلات زیست‌محیطی جدی به همراه دارد. پسماندهای حاوی ترکیبات قلیایی و نمک‌ها، در صورت دفن غیراصولی، می‌توانند منابع آب زیرزمینی را آلوده کرده و تعادل شیمیایی خاک را بر هم بزنند. این فرآیند علاوه بر تولید مواد سودمند، منجر به تولید پسماندهای جامدی نیز می‌شود که بخش عمده آن‌ها در مرحله تصفیه و نمک‌زدایی آب‌نمک، پیش از ورود محلول به سلول‌های الکترولیز، ایجاد می‌شوند. در این مرحله، ناخالصی‌های موجود در آب‌نمک حذف شده و پسماندی موسوم به پسماند جامد آب‌نمک^۱ تولید می‌شود که عمدتاً حاوی ترکیباتی نظیر کربنات کلسیم، هیدروکسید منیزیم و مقادیر متغیری از کلرید سدیم است. این پسماند معمولاً به محل‌های دفن صنعتی منتقل می‌شود و مدیریت نامناسب آن می‌تواند پیامدهای محیط زیستی به همراه داشته باشد (De Carvalho et al., 2021; Brinkmann et al., 2014).

در بخش نمک‌زدایی^۲ و تغلیظ آب نمک مراحل مختلفی جهت خالص‌سازی چرخه آب نمک وجود دارد. یکی از آن‌ها حذف مواد جامد معلق از آب نمک در خروجی کلاریفایرها می‌باشد که توسط فیلتر پرس^۳ انجام می‌شود که از رایج‌ترین سیستم‌های تصفیه فاضلاب می‌باشد (Ali et al., 2025; de Carvalho Izidoro et al., 2021). در این فرآیند عمل جداسازی جامد از مایع را تحت فشار انجام داده و رسوبات جمع‌آوری شده به شکل کیک با گل نمک جدا می‌گردد. رسوبات جمع‌آوری شده در بخش نمک‌زدایی فرآیند کلر-آلکالی به مقدار ۱۳۳ کیلوگرم در ساعت جمع‌آوری می‌شوند (Aziz et al., 2017; Brinkmann et al., 2014; O'Brien et al., 2005).

از طرفی دیگر، خاک مارن از خاک‌های مسئله‌دار به شمار می‌رود که به علت وجود حدود ۳۵ تا ۶۵ درصد کربنات کلسیم و کانی‌های رسی در ترکیبات خاک، رفتار مکانیکی پیچیده‌ای در شرایط مختلف به همراه دارد (Ouhadi & Yong, 2003). در مهندسی ژئوتکنیک، خاک‌های مسئله‌دار به خاک‌هایی اطلاق می‌شود که به دلیل ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی یا کانی‌شناسی خود، رفتار مهندسی نامطلوبی از جمله کاهش مقاومت، تغییر حجم، نشست یا

¹ Brine Sludge

² Salt Washing

³ Filter press

ناپایداری در برابر تغییرات رطوبت یا بارگذاری از خود نشان می‌دهند. خاک مارن نیز به دلیل حضور هم‌زمان کانی‌های رسی و کربناته، در مواجهه با تغییرات رطوبتی مستعد افت مقاومت و تخریب ساختار بوده و از این‌رو در زمره خاک‌های مسئله‌دار قرار می‌گیرد. وجود کانی‌های رسی فعال در خاک مارن، آن را به یکی از حساس‌ترین خاک‌ها از نظر واکنش به رطوبت تبدیل کرده است (Ebrahimi et al., 2025). خاک مارن با وجود مقاومت بسیار بالای آن در حالت خشک، مقاومت آن در حالت اشباع تا حدود ۸۰ درصد کاهش می‌یابد. لذا فقدان مقاومت فشاری مناسب خاک مارن در شرایط آب و هوایی مختلف باعث محدودیت استفاده از این خاک در پروژه‌های زیرساختی مانند بزرگراه و راه آهن شده است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که خاک مارن در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن، رفتار ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهد که لزوم تثبیت آن را دوجندان می‌کند (Jamalimoghadam et al., 2024; Moallemi et al., 2025; Vakili et al., 2025).

روش‌های گوناگونی برای تثبیت خاک‌های ضعیف ارائه شده‌است که شامل روش‌های مکانیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و الکتریکی می‌باشد. در میان آن‌ها، تثبیت شیمیایی به دلیل انعطاف‌پذیری، دوام و هزینه کمتر، روشی رایج و مؤثر محسوب می‌شود. در این روش، با افزودن مواد معدنی یا پوزولانی، واکنش‌هایی مشابه با واکنش‌های سیمانی در خاک رخ می‌دهد که منجر به تشکیل فازهای سیمانی از جمله C-S-H و C-A-S-H با افزایش مقاومت خاک می‌شود (Vu et al., 2018; Wang et al., 2024). تثبیت شیمیایی خاک مارن با استفاده از افزودنی به عنوان یک روش اقتصادی و انعطاف‌پذیر با رویکرد اصلاح فیزیکی و مکانیکی خاک همواره مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تثبیت شیمیایی می‌تواند موجب بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک‌های مارنی شود. اوحدی و قلندرزاده اثر افزودن آهک و سیمان را بر خاک مارن بررسی کردند و نشان دادند که نوع ماده تثبیت‌کننده بر عملکرد خاک تثبیت‌شده تأثیرگذار است (Ouhadi & Ghalandarzadeh, 1991). همچنین العمودی و همکاران با بررسی تثبیت خاک مارن با آهک هیدراته و سیمان پرتلند، عملکرد بهتر نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان را نسبت به آهک گزارش کردند (Al-Amoudi et al., 2010). فیوضی و همکاران (Feyozi et al., 2016) نیز اثر مقادیر مختلف آهک و زمان‌های مختلف عمل‌آوری شامل ۱، ۷ و ۱۵ روز را بر پارامترهای مقاومت برشی خاک مارن بررسی کردند و نشان دادند که مقدار حداکثر چسبندگی خاک، در عمل‌آوری ۷ روزه و با ۸ درصد آهک حاصل شد تثبیت‌شده هستند. محمدرضایی و همکاران (Mohammad Rezaei, 2022) به بررسی اثر متاکائولن و خاکستر پوسته برنج بر روی خاک مارن پرداختند. ایشان درصد‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد افزودنی را بررسی نمودند و دریافتند بیشترین مقاومت برشی در ۳۰ درصد افزودنی حاصل شده است. آبیان و همکاران (Aiban, et al., 1995; Aiban, et al., 1998) بررسی پارامترهای تراکم، درصد رطوبت و وزن مخصوص خشک در خاک‌های مارن بدون افزودنی و تثبیت‌شده پرداختند. ایشان دریافتند نمونه‌های متراکم شده با سمت تر و خشک منحنی تراکم نسبت به نمونه‌های متراکم شده با رطوبت بهینه، تراکم‌پذیری بیشتر و مقاومت کمتری دارند. به طور کلی مطالعات گذشته حاکی از تأثیر نوع و مقدار ماده تثبیت‌کننده، شرایط رطوبتی، وزن مخصوص خشک و زمان عمل‌آوری در فرآیند تثبیت شیمیایی خاک مارن دارند. همچنین در میان افزودنی‌های خاک مارن به جهت تثبیت، سیمان جزو رایج‌ترین مواد می‌باشد. با توجه به تولید هر تن سیمان به انرژی زیادی برای پخته شدن ۲/۸ تن مواد خام نیاز است که تقریباً یک تن دی‌اکسید کربن را در هوا پخش می‌کند، تولید سیمان با مسائل چالش‌برانگیز، تأثیرات خطرناک بر محیط زیست همراه است. بر اساس مطالعات، صنعت سیمان حدود ۵ تا ۸ درصد از انتشار جهانی دی‌اکسید کربن را به خود اختصاص داده است که این موضوع لزوم یافتن جایگزین‌های پایدار را آشکار می‌سازد (Lacheheb et al., 2025). با توجه به پیامدهای محیط‌زیستی تولید سیمان، از جمله انتشار دی‌اکسید کربن و همچنین با هدف توسعه پایدار جهت عدم استفاده از منابع، یافتن افزودنی پایدار، ارزان‌قیمت و

دوستدار محیط زیست در راستای توسعه پایدار امری ضروری است (Bansal & Jain, 2026; Inweer et al., 2025; Vakili et al., 2024). امروزه استفاده از پسماندهای صنعتی به عنوان جایگزین سیمان، یکی از رویکردهای نوین در تثبیت خاک محسوب می‌شود که ضمن کاهش هزینه‌ها، به مدیریت پسماند نیز کمک می‌کند (Luo et al., 2025). بر این اساس، هدف پژوهش حاضر، بررسی اثر استفاده از پسماند فرآیند کلر-آلکالی بندر امام خمینی به عنوان ماده تثبیت‌کننده بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک مارن است. در این راستا، با افزودن پسماند کلر-آلکالی به خاک مارن، تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های تثبیت‌شده مورد بررسی قرار گرفته و میزان بهبود مقاومت خاک در اثر افزودن پسماند ارزیابی می‌شود. نوآوری و اهمیت این پژوهش، بررسی قابلیت استفاده از پسماند فرآیند کلر-آلکالی به عنوان یک ماده تثبیت‌کننده برای بهسازی خاک مارن، هم‌زمان با ارائه رویکردی برای استفاده مجدد از یک پسماند صنعتی است که می‌تواند در کاهش مشکلات ناشی از دفع این پسماند و بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک مؤثر باشد.

روش‌شناسی پژوهش

روش انجام پژوهش به صورت آزمایشگاهی می‌باشد. ابتدا با مطالعه پژوهش‌های انجام شده مرتبط با تثبیت خاک، این نتیجه حاصل شد که با توجه به وجود ترکیبات کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم در پسماند نهایی فرآیند کلر-آلکالی، می‌توان از این پسماند به عنوان تثبیت‌کننده خاک مارن استفاده کرد. لذا برای سنجیدن میزان مقاومت فشاری حاصل شده از تثبیت نیاز است نمونه‌هایی مختلفی ساخته و با استفاده از مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت فشاری بررسی شود. در ادامه به مراحل مختلف روش انجام و مواد مورد استفاده پژوهش پرداخته شده است.

خاک مارن

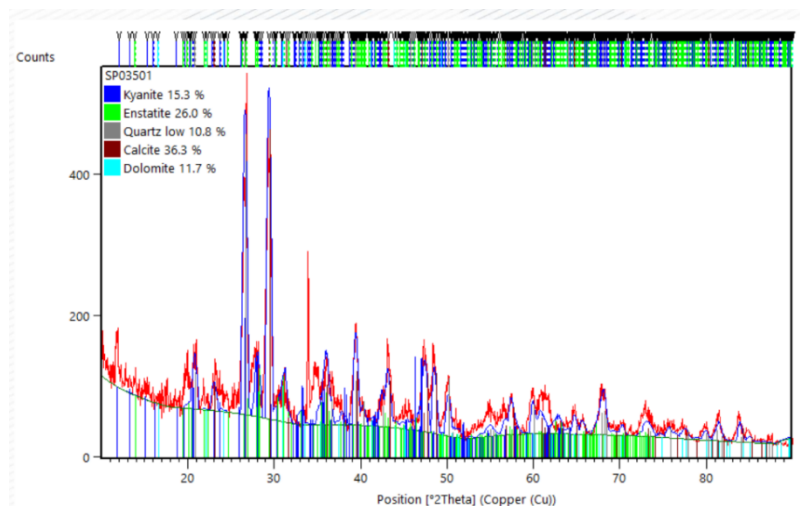
در این پژوهش از خاک مارن منطقه شهرک قدس شهر قم واقع در استان قم استفاده و با مشخصات فیزیکی در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۱، این خاک از نوع رس غیرآلی با پلاستیسیته کم و بافت نیمه سنگین است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک مارن پژوهش

Table 1. Physical Characteristics of the Marl Soil Studied

مشخصات	حد خمیری (درصد)	حد روانی (درصد)	نشانه خمیری (درصد)	دانشیه در محل (کیلوگرم بر سانتی متر مکعب)	وزن مخصوص (کیلوگرم بر سانتی متر مکعب)	رطوبت بهینه (درصد)	چگالی مخصوص ذرات جامد (کیلوگرم بر سانتی متر مکعب)	رده بندی خاک بر اساس نتایج دانه بندی
مقدار	۴۱	۲۱/۱	۱۸/۹	۱/۶۱	۱/۷۸	۱۴٪	۲/۵۸	CL
استاندارد	ASTM-D4318		ASTM-D1556		ASTM-D698		ASTM-D854	ASTM-D422

به منظور شناسایی ترکیبات کانی‌شناسی و فازهای بلوری خاک مارن مورد استفاده در این تحقیق، آنالیز XRD انجام شد. نتایج این آنالیز در شکل ۱ و جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱. آنالیز XRD خاک مارن بدون افزودنی

Figure 1. XRD analysis of marl soil without additives

جدول ۲. مواد تشکیل دهنده‌ی خاک مارن

Table 2. Marl Soil Constituents

درصد (%)	فرمول شیمیایی	ماده تشکیل دهنده
۳۶/۳	CaCO ₃	Calcite
۱۰/۸	SiO ₂	Quartz
۲۶	MgSiO ₃	Enstatite
۱۵/۳	Al ₂ SiO ₅	Kyanite
۱۱/۷	CaMg(CO ₃)	Dolomite

پسماند فرآیند کلر-آلکالی

پسماند نهایی فرآیند کلر-آلکالی پتروشیمی امام خمینی حاوی ترکیبات ناخالصی از جمله کلرید سدیم، کربنات کلسیم، هیدروکسید منیزیم و فلزات سنگین می‌باشد. این پسماند به عنوان تثبیت کننده خاک مارن مورد استفاده قرار گرفته‌است. این پسماند بدین جهت جایگزین سیمان شده‌است که مانند سیمان آلودگی‌های محیط زیستی در فرآیند تولید ندارد و از منابع دست اول استفاده نمی‌کند و همچنین کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم با نسبت ۴ به ۱ در پسماند نهایی فرآیند موجود می‌باشد. به منظور تاثیرگذاری بیشتر و اختلاط بهتر با خاک، ابتدا این ماده در اون در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. سپس پسماند آسیاب شد و به شکل پودر مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۳ ترکیبات و درصد وزنی هر یک از مواد موجود در پسماند نهایی فرآیند کلر-آلکالی و نمونه‌ای از پسماند خشک‌شده در شکل ۲ نشان داده شده‌است.

جدول ۳. مشخصات شیمیایی پسماند فرآیند کلر-آلکالی بندر امام خمینی

Table 3. Chemical Characteristics of Chlor-Alkali Process Waste in Bandar Imam Khomeini

ترکیبات	کلرید سدیم	کربنات کلسیم	منیزیم هیدروکسید	منعقد کننده	پوشش فیلترها	آب	سایر
درصد وزنی	۴۰/۹	۱۰/۹	۵/۴	۱/۲	۹/۷	۲۸/۰۵	۳/۸۵



شکل ۲. پسماند فرآیند کلر-آلکالی به صورت پودر خشک

Figure 2. Chlorine-alkali process waste as dry powder

فعال ساز

به جهت فعالسازی اثرگذاری ترکیبات از فعال ساز ترکیبات بر پایه هیدروکسید سدیم (NaOH) و سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) استفاده شده است.

مواد و روش ها

طرح اختلاط و آماده سازی نمونه خاک

با توجه به روش تحقیق در این پژوهش، مقدار ۳۰ درصد وزنی پسماند با استناد به نتایج مطالعات پیشین در زمینه تثبیت خاک های مارنی با مواد افزودنی معدنی و پوزولانی، به عنوان یک سطح مناسب اولیه برای بررسی عملکرد پسماند انتخاب شد (Moallemi et al., 2025; Mohammad Rezaei, 2022). مشخصات نمونه های تهیه شده در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس اصول پیشنهادی FHWA (۲۰۱۳)، ابتدا مصالح خشک شامل خاک مارن و پسماند فرآیند کلر-آلکالی به طور یکنواخت با یکدیگر مخلوط شدند و سپس مقدار آب موردنظر به مخلوط افزوده شد و اختلاط تا دستیابی به توزیع یکنواخت رطوبت ادامه یافت. رطوبت اولیه نمونه ها برابر ۸ درصد در نظر گرفته شد که بر اساس نتایج آزمایش تراکم در سمت خشک رطوبت بهینه قرار داشت. انتخاب این مقدار رطوبت با هدف شبیه سازی شرایط نسبتاً محافظه کارانه و بحرانی انجام شد. نمونه ها با وزن مخصوص خشک ۱٫۵ گرم بر سانتی مترمکعب، معادل حدود ۸۴ درصد وزن مخصوص خشک بیشینه، متراکم شدند. در نمونه های حاوی فعال کننده قلیایی، ابتدا محلول NaOH با غلظت ۱۴ مولار تهیه شد و سپس محلول NaOH و سدیم سیلیکات (Na_2SiO_3) با نسبت وزنی برابر با یکدیگر مخلوط شدند. محلول فعال کننده حاصل به میزان ۵۰ درصد وزنی نسبت به مقدار پسماند به مخلوط افزوده شد. پس از آماده سازی و اختلاط کامل، مخلوط ها در قالب های استوانه ای ساخته شده از لوله PVC با قطر ۵ سانتی متر و ارتفاع ۱۰ سانتی متر قرار داده و متراکم شدند. این ابعاد مطابق با استاندارد مقاومت فشاری تک محوری نمونه ها ASTM D2166 تعیین شد. قالب ها به صورت دو کپه ای طراحی شدند تا خروج نمونه پس از عمل آوری با حداقل دست خوردگی انجام شود. برای اتصال دو بخش قالب از بست های فلزی و پلاستیکی استفاده شد و سطح داخلی قالب ها نیز پیش از آماده سازی نمونه با لایه ای نازک از وازلین پوشانده شد تا از چسبندگی نمونه به قالب و آسیب هنگام خروج جلوگیری شود. پس از قالب گیری، نمونه ها در محفظه پلاستیکی قرار داده شدند تا از تبخیر رطوبت جلوگیری شود و به مدت ۷ روز در دمای

محیط آزمایشگاه، حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد، عمل‌آوری شدند. در جدول ۴، مشخصات نمونه‌های ساخته شده نشان داده شده است.

جدول ۴. مشخصات نمونه‌های ساخته شده

Table 4. Specifications of the fabricated samples

شماره نمونه	وزن مخصوص خشک (گرم بر سانتی متر مکعب)	درصد رطوبت (برحسب درصد وزن خاک)	درصد پسماند (برحسب درصد وزن خاک)	زمان عمل‌آوری (روز)	فعال‌کننده قلیایی (سودپرک و سیلیکات سدیم)
۱	۱/۵	۸	۰	۰	-
۲	۱/۵	۸	۳۰	۷	-
۳	۱/۵	۸	۳۰	۷	دارد

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری^۱ طبق استاندارد ASTM D2166 انجام شد. بارگذاری به صورت کنترل کرنش^۲ با سرعت ۱ میلی‌متر بر ثانیه و حداکثر جابجایی ۱۰ میلی‌متر و با استفاده از سه‌محوری سیکلیک الکترومکانیکال شرکت MTM ثبت و در شکل ۳ نمایش داده شده است. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، یک روش آسان و سریع برای تعیین مقاومت زهکشی نشده خاک‌های چسبنده است. مقاومت فشاری تک‌محوری بدست‌آمده از این آزمایش، در پژوهش‌های متعدد شاخصی برای تعیین تنش کل وارده و نتیجه بهسازی در نظر گرفته می‌شود. نوع بارگذاری به صورت کنترل کرنش قرار داده‌شد و جابه‌جایی و زمان بارگذاری با توجه به سرعت ۱ میلی‌متر بر ثانیه، ۱۰ میلی‌متر و ۶۰۰ ثانیه تعیین شده است.



شکل ۳. دستگاه ۳ محوری سیکلیک مورد استفاده در این پژوهش

Figure 3. Three-axis cyclic device used in this research

^۱ Uniaxial compressive strength (UCS)

^۲ Displacement Control

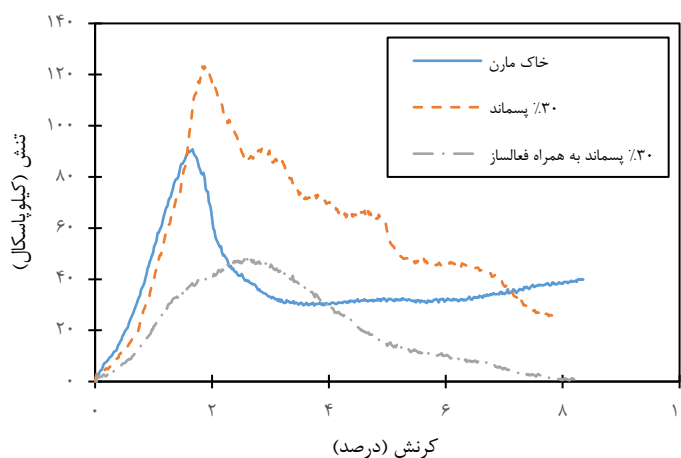
یافته‌ها و بحث

مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها

طبق نتایج بدست‌آمده و مطابق شکل ۴، مقاومت فشاری نمونه خاک مارن بدون تثبیت کننده برابر با ۹۰ کیلوپاسکال است. شکل ۴، نشان دهنده منحنی تنش کرنش نمونه‌های ساخته‌شده می باشد.

افزودن پسماند فرآیند کلر-آلکالی به عنوان تثبیت کننده، به دلیل ترکیبات کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم، موجب افزایش مقاومت تا ۱۲۳ کیلوپاسکال شده است. در نمونه فعال کننده قلیایی حاوی سدیم هیدروکسید و سیلیکات سدیم، مقاومت نهایی کاهش یافته و به ۴۸/۴۹ کیلوپاسکال رسیده است. در این پژوهش، استفاده از فعال کننده قلیایی با هدف افزایش انحلال فازهای واکنش پذیر موجود در خاک مارن و تسریع فرآیند تثبیت انجام شد. با این حال، نتایج نشان داد که استفاده از فعال کننده در سامانه مورد بررسی منجر به کاهش مقاومت فشاری گردید. این رفتار احتمالاً به ترکیب شیمیایی پسماند مورد استفاده مربوط است؛ به گونه‌ای که پسماند حاوی ۴۰/۹ درصد کلرید سدیم بوده و استفاده همزمان از محلول ۱۴ مولار NaOH و سدیم سیلیکات (با نسبت وزنی برابر) می‌تواند موجب افزایش غلظت یون‌های سدیم و شوری محیط واکنش شود. علاوه بر این، ممکن است قلیائیت بالای محیط موجب انحلال بخشی از ترکیبات کربناته یا تشکیل فازهایی با قابلیت چسبندگی کمتر شده باشد که در نهایت به کاهش مقاومت فشاری منجر شده است. با این وجود، با توجه به اینکه در این پژوهش آزمون‌های ریزساختاری نظیر SEM و XRD انجام نشده است، این موارد صرفاً به عنوان تفسیرهای علمی محتمل مطرح شده و تأیید قطعی آن‌ها مستلزم انجام مطالعات تکمیلی است. به طور کلی، افزایش مقاومت فشاری در بهترین حالت معادل ۳۵/۶۶ درصد نسبت به نمونه‌ی اولیه تثبیت نشده بود. افزایش مقاومت فشاری می‌تواند ناشی تثبیت با پسماند به دلیل واکنش‌های میان یون‌های Ca^{2+} و Mg^{2+} موجود در پسماند با سیلیکات‌ها و آلومینات‌های خاک مارن می‌باشد که منجر به تشکیل پیوندهایی از جمله C-S-H و M-S-H شده است. این پیوندها باعث فاز چسبندگی بین ذرات، کاهش تخلخل و بهبود ساختار خاک شده است. جدول ۵ به تفسیر نمونه‌ها و نتایج پرداخته شده است.

مطابق جدول ۵ مقاومت فشاری تک‌محوری متوسط نمونه‌های خاک مارن، خاک مارن حاوی ۳۰ درصد پسماند و خاک مارن حاوی ۳۰ درصد پسماند به همراه فعال‌ساز، به ترتیب ۹۰، ۱۲۳ و ۴۸/۴۹ کیلوپاسکال به دست آمد. انحراف معیار نتایج به ترتیب ۲/۸۳، ۳/۵۱ و ۳/۲۶ بدست آمد.



شکل ۴. منحنی تنش کرنش نمونه‌های ساخته‌شده

Figure 4. Stress-strain curves of the fabricated samples

جدول ۵: نمونه‌ها و نتایج

Table 5: Samples and Results

نمونه	مقاومت فشاری میانگین (Kpa)	انحراف معیار (Kpa)	تعداد آزمونه
خاک مارن بدون افزودنی	۹۰	۲/۸۳	۲
خاک مارن +۳۰ درصد پسماند	۱۲۳	۳/۵۱	۳
خاک مارن +۳۰ درصد پسماند+فعال کننده	۴۸/۴۹	۳/۲۶	۳

تحلیل رفتار مکانیکی نمونه‌ها

در نمونه‌های تثبیت شده با پسماند، تغییر شکل پلاستیک در مرحله‌ی بارگذاری به صورت یکنواخت تر مشاهده شد. این امر بیانگر افزایش پیوستگی ساختاری در خاک است. همچنین، مقاومت نهایی در اثر عمل آوری ۷ روزه، افزایش قابل ملاحظه‌ای به همراه داشته است که نشان از تداوم واکنش‌های شیمیایی در طول زمان عمل آوری می‌باشد.

مقایسه با پژوهش‌های مشابه

برای ارزیابی بهتر عملکرد پسماند فرآیند کلر-آلکالی، نتایج این پژوهش با یافته‌های مطالعات مشابه بین‌المللی مقایسه گردید. در جدول ۶ مقایسه میان پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌های انجام شده نشان داده شده است.

جدول ۶. مقایسه میان پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌های انجام شده

Table 6. Comparison of the present study with other conducted studies

ردیف	نوع پسماند تثبیت کننده	نوع خاک	مقاومت فشاری تک محوره قبل از تثبیت (kPa)	مقاومت فشاری تک محوره بعد از تثبیت (kPa)	دامنه افزایش مقاومت گزارش شده (%)	نتایج	منابع
۱	پسماند فرآیند کلر- آلکالی (حاوی کربنات کلسیم و منیزیم هیدروکسید)	خاک مارن (رس غیرآلی با پلاستیسیته کم و بافت نیمه سنگین)	۹۰	۱۲۳	۳۵/۶۶	پیوندهای C-S- H و M-S-H، افزایش مقاومت فشاری، افزایش مقاومت فشاری با افزایش مدت زمان عمل آوری، پرسیدن منافذ	پژوهش حاضر
۲	Brine Sludge (پسماند آب نمک فرآیند کلر- آلکالی)	Marine Clay (خاک رس دریایی نرم)	۸/۵ (مقاومت نمونه ۳۰ درصد افزودنی در زمان عمل آوری صفر)	۱۱/۳ (مقاومت نمونه ۳۰ درصد افزودنی در زمان عمل آوری صفر)	۳۲/۹	در Brine Sludge درصدهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ موجب افزایش مقاومت و بهبود خواص مهندسی خاک شد؛ افزودن ۳٪ آهک افزایش بیشتری در	Kuriakose et al.

	مقاومت ایجاد کرد.						
۳	پسماند فرآیند کلر-آلکالی (حاوی کربنات کلسیم و منیزیم هیدروکسید)	خاک مارن (رس غیرآلی با پلاستیسیته کم و بافت نیمه سنگین)	۹۰	۱۲۳	۳۵/۶۶	پیوندهای C-S، M-S-H و H افزایش مقاومت فشاری، افزایش مقاومت فشاری با افزایش مدت زمان عمل آوری، پرشدن منافذ	پژوهش حاضر
۴	پسماند صنعتی غنی از منیزیم	خاک تورب	۵۲	۲۱۰-۲۸۰	۳۰۰-۴۰۰ درصد	بهبود پیوسته با لایه‌چینی و زمان کیورینگ؛ افزایش چسبندگی و تراکم‌پذیری.	Almuaythir et al.
۵	سرباره فولاد، خاکستر بویلر، پسماند بتن	خاک رسی و ماسه‌ای	۲۰۰-۳۰۰	۶۰۰-۹۰۰	۲۰۰-۲۵۰ درصد	اثر ترکیبی پرکنندگی و تشکیل C-S-H مناسب برای خاک‌های ضعیف.	Waciński et al.
۶	خاکستر پوسته برنج (RHA) و باگاس (Bagasse Ash)	خاک رسی انبساطی	۱۵۰	۶۵۰-۱۲۰۰ درصد	۳۰۰-۷۰۰ درصد	واکنش‌های پوزولانی با C-S-H و کاهش تورم	Gidebo et al.
۷	ترکیب پسماندهای صنعتی دوده، سرباره، لجن و خاکستر	خاک رسی انبساطی	۱۶۰	۹۸۰-۱۲۵۰ درصد	۵۰۰-۷۰۰ درصد	افزایش مقاومت و دوام تشکیل C-S-H و Ettringite.	Zimar et al.

مطابق جدول ۶ مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از پسماندهای کشاورزی و صنعتی به‌عنوان مواد تثبیت‌کننده می‌تواند، بسته به نوع و ترکیب ماده، مقدار مصرف و شرایط آماده‌سازی و عمل‌آوری، موجب افزایش قابل‌توجه مقاومت خاک شود. در مطالعات مرور شده توسط گیدبو و همکاران (Gidebo et al., 2023) افزایش مقاومت در برخی مطالعات استفاده‌کننده از پسماندهای کشاورزی در محدوده ۳۰۰ تا ۷۰۰ درصد و در برخی موارد ۶۵۰ تا ۱۲۰۰ درصد گزارش شده است. همچنین، زیمار و همکاران (Zimar et al., 2023) افزایش قابل‌توجه مقاومت خاک را در اثر استفاده از ترکیبی از پسماندهای صنعتی گزارش کردند. اختلاف میان این نتایج و نتایج پژوهش حاضر را می‌توان به تفاوت در ماهیت و ترکیب شیمیایی مواد تثبیت‌کننده، میزان مواد واکنش‌پذیر، مقدار مصرف و شرایط آماده‌سازی و عمل‌آوری نمونه‌ها نسبت داد. کیریاکوز و همکاران (Kuriakose et al., 2024) اثر پسماند جامد آب‌نمک حاصل از صنعت کلر-آلکالی برای بهسازی خاک رسی نرم بررسی کردند. این پسماند حاوی مقدار قابل‌توجهی (نزدیک به ۳۲/۵ درصد از مواد تشکیل‌دهنده) کربنات کلسیم بود و نتایج نشان داد که افزودن این پسماند می‌تواند موجب بهبود برخی

خواص مهندسی و افزایش مقاومت فشاری خاک شود. همچنین، نویسندگان تشکیل ترکیبات پوزولانی را به‌عنوان یکی از سازوکارهای احتمالی بهبود رفتار خاک مطرح کردند و نشان دادند که افزودن مقدار کمی آهک و افزایش زمان عمل‌آوری می‌تواند افزایش مقاومت را تقویت کند. در پژوهش حاضر، پسماند فرآیند کلر-آلکالی حاوی ۴۰/۹ درصد کلرید سدیم، ۱۰/۹ درصد کربنات کلسیم و ۵/۴ درصد هیدروکسید منیزیم بوده و نمونه‌ها با ۳۰ درصد پسماند، تراکم ۸۴ درصد و رطوبت سمت خشک رطوبت بهینه تهیه و پس از ۷ روز عمل‌آوری مورد آزمایش قرار گرفتند. تفاوت در ترکیب شیمیایی و واکنش‌پذیری مواد تثبیت‌کننده و همچنین تفاوت در شرایط تراکم، رطوبت و زمان عمل‌آوری می‌تواند از عوامل مؤثر بر اختلاف میزان افزایش مقاومت در مطالعات مختلف باشد. با توجه به حضور ترکیبات کلسیمی و منیزیمی در پسماند و وجود ترکیبات سیلیسی و آلومینوسیلیکاتی در خاک مارن، تشکیل احتمالی محصولات سیمانی از جمله $C-S-H$ و $M-S-H$ می‌تواند یکی از سازوکارهای مؤثر در بهبود مقاومت باشد. با این حال، از آنجا که در پژوهش حاضر آزمون‌های ریزساختاری نظیر XRD و SEM انجام نشده است، تشکیل این فازها به‌صورت تجربی تأیید نشده و بررسی دقیق سازوکار واکنش‌ها به مطالعات تکمیلی نیاز دارد. در پژوهش حاضر، استفاده از پسماند فرآیند کلر-آلکالی موجب افزایش ۳۵/۶۶ درصدی مقاومت فشاری تک‌محوره خاک مارن نسبت به خاک طبیعی شد. اگرچه این میزان افزایش در مقایسه با برخی مطالعات پیشین کمتر است، نتایج نشان می‌دهد که پسماند مورد بررسی، تحت شرایط آزمایش حاضر، قابلیت بهبود مقاومت خاک مارن را دارد. همچنین، استفاده مجدد از این پسماند می‌تواند از منظر کاهش نیاز به دفع و بهره‌گیری مجدد از یک ماده زائد صنعتی دارای پتانسیل زیست‌محیطی باشد. از طرفی در دسترس بودن و هزینه پایین این پسماند استفاده از آن را به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای تثبیت خاک در پروژه‌های محلی توجیه‌پذیر می‌سازد.

از منظر زیست‌محیطی، استفاده از پسماند کلر-آلکالی می‌تواند با کاهش مصرف سیمان و استفاده مجدد از یک پسماند صنعتی همراه باشد. با این حال، با توجه به احتمال وجود عناصر بالقوه آلاینده در این نوع پسماندها، ارزیابی قابلیت آبشویی آنها ضروری است. ژانگ و همکاران در بررسی یک نوع لجن تصفیه آب‌نمک حاصل از فرآیند کلر-آلکالی، مقادیر TCLP جیوه حدود ۲۰۰-۴۰۰ میکروگرم بر لیتر ($\mu g/L$) را برای پسماند اولیه گزارش کردند. بنابراین، اگرچه استفاده از پسماند مورد مطالعه می‌تواند از نظر کاهش مصرف سیمان و بازیافت پسماند دارای مزیت بالقوه باشد، تأیید قطعی ایمنی زیست‌محیطی آن نیازمند ارزیابی قابلیت آبشویی عناصر بالقوه آلاینده با آزمون‌هایی نظیر TCLP است (Zhuang et al., 2004).

نتیجه‌گیری

بر اساس داده‌های آزمایشگاهی این نتیجه حاصل شد که افزودن ۳۰ درصد وزنی از پسماند فرآیند کلر-آلکالی بندر امام خمینی به خاک مارن باعث افزایش حدود ۳۵/۶۶ درصدی مقاومت فشاری تک‌محوری ۷ روزه در مقایسه با نمونه خاک مارن بدون افزودنی ۷ روزه شده است. این افزایش مقاومت به دلیل تشکیل احتمالی فازهای $C-S-H$ (کلسیم-سیلیکات-هیدرات) و $M-S-H$ (منیزیم-سیلیکات-هیدرات) به دلیل وجود کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم در پسماند می‌باشد که باعث ایجاد پیوندهای محکم بین ذرات خاک و در نتیجه افزایش چسبندگی، کاهش تخلخل و بهبود یکپارچگی ساختار خاک شده است. با این حال، به دلیل عدم انجام آزمون‌های ریزساختاری نظیر XRD و SEM، تشکیل این فازها در پژوهش حاضر به‌صورت تجربی تأیید نشده است. در نمونه دیگر که از فعال‌کننده ی قلیایی سدیم هیدروکسید و سیلیکات سدیم استفاده شده، کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری به دلیل واکنش‌های نامطلوب بین ترکیبات معدنی پسماند و ذرات خاک مشاهده گردید که نشان‌دهنده اثر منفی قلیائیت بالا بر فرآیند تثبیت می‌باشد.

لذا پسماند فرآیند کلر-آلکالی می‌تواند به‌عنوان یک گزینه بالقوه، پایدار و اقتصادی برای جایگزینی بخشی از مواد سیمانی در تثبیت خاک‌های مسئله‌دار مورد توجه قرار گیرد. این امر باعث کاهش استخراج منابع طبیعی و کاهش آلودگی‌های ناشی از تولید سیمان می‌شود. همچنین استفاده از روش استفاده مجدد از این پسماند در تثبیت خاک، باعث مدیریت پسماند صنعتی و حفاظت بیشتر از محیط‌زیست می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهاد می‌شود در پروژه‌های عمرانی مناطق جنوبی کشور که دسترسی به این پسماند به راحتی میسر است، از این روش به‌عنوان یک راهکار عملی و کم‌هزینه بهره گرفته شود. با توجه به محدودیت‌های پژوهش حاضر، انجام مطالعات تکمیلی در زمینه بررسی اثر درصدهای مختلف پسماند، زمان‌های طولانی‌تر عمل‌آوری، دوام خاک تثبیت‌شده در چرخه‌های تر و خشک، و همچنین بررسی رفتار نشت و آزادسازی احتمالی آلاینده‌ها پیشنهاد می‌شود. انجام آزمون‌های ریزساختاری نظیر XRD و SEM نیز می‌تواند به شناسایی محصولات واکنش و تبیین دقیق‌تر سازوکار بهبود یا کاهش مقاومت کمک کند. پژوهش حاضر نشان داد که رویکرد استفاده مجدد از پسماندهای صنعتی در بهسازی خاک، ضمن کاهش بار محیط زیستی، گامی مؤثر در جهت تحقق اهداف توسعه پایدار در صنعت ساخت‌وساز کشور محسوب می‌شود.

References

- Ali, B. T. I., Ismail, M., Wahyudi, I., Mustafa, A., Syari'at, A., Parmiyatni, S., Bakhtiar, Y., Wahyuono, B. A., Saputra, H., & Santoso, I. (2025). Eco-Efficient Sea Salt Purification via Coupled Brine Washing and Elutriation Technology: A Pathway to High-Purity Salt for Sustainable Chlor-Alkali Industry. *Environmental Challenges*. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101295>
- Aiban, S.A. (1995). Strength and compressibility of Abqaiq marl, Saudi Arabia. *Engineering Geology*, 39(3-4), 203-215.
- Aiban, S.A., Wahhab, H.I.A.A., Al-Amoudi, O.S.B. & Ahmed, H.R., (1998). Performance of a stabilized marl base: a case study. *Construction and building materials*, 12(6-7), 329-340.
- Al-Amoudi, O.S.B., Khan, K., Al-Kahtani, N.S. (2010). Stabilization of a Saudi calcareous marl soil, *Construction and Building Materials*, vol. 24, No. 10, 1848-1854. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.019>
- ASTM International. (2024). Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil (ASTM D2166/D2166M-24). ASTM International. https://doi.org/10.1520/D2166_D2166M-24
- ASTM International. (2007). Standard test method for particle-size analysis of soils (ASTM D422-63(2007)e2). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0422-63R98>
- ASTM International. (2023). Standard test methods for specific gravity of soil solids by the water displacement method (ASTM D854-23). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0854-23>
- ASTM International. (2021). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)) (ASTM D698-12(2021)). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0698-12R21>
- ASTM International. (2024). Standard test method for density and unit weight of soil in place by sand-cone method (ASTM D1556/D1556M-24). ASTM International. https://doi.org/10.1520/D1556_D1556M-24
- ASTM International. (2017). Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils (ASTM D4318-17e1). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4318-17E01>
- Aziz, H. A., Ghazali, M. F., Yusoff, M. S., & Hung, Y.-T. (2017). Waste Treatment and Management in Chlor-Alkali Industries. In *Handbook of Advanced Industrial and Hazardous Wastes Management* (pp. 611-655). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b22213-4>
- Bansal, N., & Jain, R. (2026). Recycling and potential use of industrial cementitious waste in expansive soil stabilization: A review. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, e70535. <https://doi.org/10.1002/ep.70535>
- Bruce, M.E.C., Berg, R.R., Filz, G.M., Terashi, M., Yang, D.S., Collin, J.G. and Geotechnica, S., 2013. Federal highway administration design manual: Deep mixing for embankment and Foundation

- Support. (Report No. FHWA-HRT-13-046). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. <https://ntlrepository.blob.core.windows.net/lib/61000/61600/61675/13046.pdf>
- Brinkmann, T., Santonja, G. G., Schorcht, F., Roudier, S., & Sancho, L. D. (2014). Best available techniques (BAT) reference document for the production of chlor-alkali. JRC (Joint Research Center EU), JRC91156, 25-39. <https://doi.org/10.2791/13138>
- Contreras, R. R., Almarza, J., Rincon, L., & Ruiz, C. (2025). Green sodium hydroxide for industrial purposes. A short review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(1), 114972. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114972>
- Crook, J., & Mousavi, A. (2016). The chlor-alkali process: A review of history and pollution. *Environmental Forensics*, 17(3), 211-217. <https://doi.org/10.1080/15275922.2016.1177755>
- Das, S., Sultana, K. W., Ndhlala, A. R., Mondal, M., & Chandra, I. (2023). Heavy metal pollution in the environment and its impact on health: exploring green technology for remediation. *Environmental health insights*, 17, 11786302231201259. <https://doi.org/10.1177/11786302231201259>
- de Carvalho Izidoro, J., Fungaro, D. A., Viviani, L. C., & da Costa Silva, R. (2021). Brine sludge waste from a Chlor-alkali industry: characterization and its application for non-structural and structural construction materials. *Journal of Applied Materials and Technology*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.31258/Jamt.3.1.1-7>
- Ebrahimi, M. J., Yazdandoust, M., & Khodaparast, M. (2025). Cyclic and post-cyclic behavior of Qom marl, Iran. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 192, 109209. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2025.109209>
- Feyozi, M., Vakili, A., & Panjestooni, A. (2016). Investigation of the effect of marl soil improvement with lime on shear strength parameters. *International Conference of Civil Engineering* (pp. 801-806). <https://civilica.com/doc/506802> (In Persian)
- Federal Highway Administration. (2013). Geosynthetic reinforced soil performance testing – Axial load deformation relationships (Report No. FHWA-HRT-13-066). U.S. Department of Transportation. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/13066/13066.pdf>
- Gidebo, F.A., Yasuhara, H. & Kinoshita, N. Stabilization of expansive soil with agricultural waste additives: a review. *Geo-Engineering* 14, 14 (2023). <https://doi.org/10.1186/s40703-023-00194-x>
- Hsu, C.-Y., Chiang, H.-C., Chen, M.-J., Yang, T.-T., Wu, Y.-S., & Chen, Y.-C. (2019). Impacts of hazardous metals and PAHs in fine and coarse particles with long-range transports in Taipei City. *Environmental Pollution*, 250, 934-943. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.038>
- Inweer, M. A., Salem, H. A., Khalid, K. A., Nassar, Y. F., Salem, M. A., Akasha, A. A., Amer, K. A., Elmnifi, M., Rekik, S., & Khaleel, M. (2025). Carbon footprint life cycle assessment of cement industry in Libya. *Discover Concrete and Cement*, 1(1), 37. <https://doi.org/10.1007/s44416-025-00037-1>
- Ito, H., & Manabe, A. (2022). Chlor-alkali electrolysis. In *Electrochemical power sources: Fundamentals, systems, and applications* (pp. 281-304). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819424-9.00011-2>
- Jamalimoghadam, M., Vakili, A. H., & Ajalloeian, R. (2024). Wetting–drying impact on geotechnical behavior of alkali-stabilized marl clay with glass powder. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(6), 205. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01515-4>
- Jamshidi, M., Mokheri, M., Vakili, A. H., & Nasehi, A. (2023). Effect of chitosan bio-polymer stabilization on the mechanical and dynamic characteristics of marl soils. *Transportation Geotechnics*, 42, 101110. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101110>
- Kuriakose, M., Athira, K.N., Abraham, B.M., Cyrus, S. (2024). Utilization of Brine Sludge to Improve the Strength and Compressibility Characteristics of Soft Clays. In: Jose, B.T., Sahoo, D.K., Puppala, A.J., Reddy, C.N.V.S., Abraham, B.M., Vaidya, R. (eds) *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2022 Volume 4. IGC 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 479. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1753-8_11
- Lacheheb, L. K., Bouteldja, F., Morvan, M., & Breul, P. (2025). Stabilisation of Marl Soil for Use in Compacted Embankments by Eggshell Quicklime and Zeolite. *Civil and Environmental Engineering*, 21(2), 990-1004. <https://doi.org/10.2478/cee-2025-0075>

- Lakshmanan, S., & Murugesan, T. (2014). The chlor-alkali process: work in progress. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(2), 225-234. <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0630-6>
- Luo, J., Yu, F., Chen, X., & Li, S. (2025). Comparative sustainability investigation on a novel industrial-waste-based soil stabilizer and cement based on life cycle assessment. *Scientific Reports*, 15(1), 19936. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04809-4>
- Mildawati, R., Dewi, S. H., & Hidayah, E. H. (2025). Stability Analysis of Clay Soil Plus Sand, Cement and DIFA Soil Stabilizer Additives Using Unconfined Compressive Strength (UCS) Testing. *International Journal of Innovation in Mechanical Construction and Energy*, 2(2), 58-67. <https://repository.uir.ac.id/id/eprint/27550>
- Moallemi, M., Khodaparast, M., & Yazdandoust, M. (2025). Cyclic and post-cyclic behavior of stabilized marl soil for pavement engineering applications. *Transportation Engineering*, 100413. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2025.100413>
- Mohammad Rezaei, M. H. (2022). Improvement of Qom marl soil using rice husk ash and metakaolin additives (Master's thesis). University of Qom. (In Persian)
- O'Brien, T. F., Bommaraju, T. V., & Hine, F. (2005). Handbook of chlor-alkali technology: volume I: fundamentals, volume II: brine treatment and cell operation, volume III: facility design and product handling, volume IV: plant commissioning and support systems, volume V: corrosion, environmental issues, and future development. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/b113786>
- Oladimeji, T., Oyedemi, M., Emetere, M., Agboola, O., Adeoye, J., & Odunlami, O. (2024). Review on the impact of heavy metals from industrial wastewater effluent and removal technologies. *Heliyon*, 10(23). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40370>
- Ouhadi, V., & Ghalandarzadeh, A. (1991). Identification and improvement of engineering properties of marl soils along the northern shores of the Persian Gulf and the Oman Sea (Master's thesis). Faculty of Engineering, University of Tehran. (In Persian)
- Ouhadi, V., & Yong, R. (2003). The role of clay fractions of marly soils on their post stabilization failure. *Engineering geology*, 70(3-4), 365-375. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00104-2](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00104-2)
- Vakili, A. H., Keskin, I., Salimi, M., Kol, H. Ş., Onur, M. İ., Abdullah, A. I. A., & Awam, A. H. M. (2024). Dynamic response, durability, and carbon footprint analysis of the marl clay treated with sodium lignosulfonate as a sustainable-environmentally friendly approach. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 135, 103658. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103658>
- Vakili, A. H., Salimi, M., Keskin, I., Onur, M. I., Tabaroei, A., & Dadgar, M. (2025). An enhanced approach to red mud (RM) sustainable management and utilization for marl stabilization considering the dynamic response and durability analysis. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04084. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04084>
- Vu, B. T., Tran, V. Q., Nguyen, Q. D., Ngo, A. Q., Nguyen, H. N., Nguyen, H. V., & Zhu, H. (2018). A geochemical model for analyzing the mechanism of stabilized soil incorporating natural pozzolan, cement and lime. *Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering: Volume 1*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97112-4_191
- Waciński W, Kuligowski K, Olejarczyk M, Zając M, Urbaniak W, Cyske W, Kazimierski P, Tylingo R, Mania S, Cenian A. (2024). Recycling of Industrial Waste as Soil Binding Additives-Effects on Soil Mechanical and Hydraulic Properties during Its Stabilisation before Road Construction. *Materials*, 17(9), 2000. <https://doi.org/10.3390/ma17092000>
- Wang, D., Wang, Z., & Wang, H. (2024). Feasibility and performance assessment of novel framework for soil stabilization using multiple industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 449, 138228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138228>
- Yeshiwas, A. G., Bayeh, G. M., Tsega, T. D., Tsega, S. S., Gebeyehu, A. A., Alamrie Asmare, Z., Anteneh, R. M., Ejigu, A. G., Ahmed, A. F., & Yigzaw, Z. A. (2025). Scoping review on mitigating the silent threat of toxic industrial waste: eco-rituals strategies for remediation and ecosystem restoration. *Environmental health insights*, 19, 11786302251329795. <https://doi.org/10.1177/11786302251329795>
- Zhuang, J. M., Lo, T., Walsh, T., & Lam, T. (2004). Stabilization of high mercury contaminated brine purification sludge. *Journal of hazardous materials*, 113(1-3), 157-164. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.06.003>

Zimar, Z., Robert, D., Giustozzi, F. et al. Use of industrial wastes for stabilizing expansive clays in pavement applications: durability and microlevel investigation. *Acta Geotech.* 19, 6259–6287 (2024).
<https://doi.org/10.1007/s11440-024-02298-9>



Spatiotemporal Analysis of Traffic-Related Pollutants at a Micro-Scale Using Stacked Ensemble Learning) A Case Study of Mahalati Highway)

Nastaran Marzban Panah Maklavani*

*Department of Environmental Planning, Management and Education, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. Nastaran.marzban@ut.ac.ir, <https://orcid.org/0009-0004-0829-9753>

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 2026/03/25
Received in revised form:
2026/04/19
Accepted: 2026/04/26
Available online: 2026/05/21

Keywords:
Traffic pollution,
Pollutant prediction,
Soft sensor,
Stacked ensemble learning.

ABSTRACT

Rapid urbanization and increasing traffic in metropolises have exacerbated air pollution, a major public health threat. This study aims to develop an accurate micro-scale prediction model for traffic-related pollutants, including ozone (O_3), nitrogen oxides (NO_x), carbon monoxide (CO), and particulate matter (PM_{10}), on Shahid Mahalati Highway in Tehran using Stacked Ensemble Learning. Additionally, it introduces a highly accurate soft sensor for PM_{10} . Hourly data comprising over 35,000 observations from the Mahalati air quality monitoring station were utilized. Advanced time-series feature engineering was applied, extracting temporal lags, rolling statistics, and calendar features. A two-layer Stacked Ensemble model was implemented, combining HistGradientBoostingRegressor and ExtraTreesRegressor as base models, with RidgeCV as the meta-learner. For PM_{10} , a soft sensor approach was adopted to predict the 24-hour moving average using CO and NO_x as auxiliary predictors. Model validation was performed using a 10-fold TimeSeriesSplit. The proposed model outperformed single-algorithm base models across all pollutants. It achieved R^2 values of 0.902 for O_3 (RMSE = 9.1 ppb), 0.801 for NO_x (RMSE = 68.7 ppb), 0.751 for CO (RMSE = 0.56 ppm), and 0.9978 for the 24-hour average PM_{10} (RMSE = 2.8 $\mu g/m^3$). The PM_{10} soft sensor demonstrated exceptional accuracy, effectively estimating particulate matter using cheaper gas sensors. Feature importance analysis revealed that historical time lags (1, 24, and 168 hours) are the dominant predictors in this urban street canyon. The Stacked Ensemble approach effectively captures the complex spatiotemporal dynamics of traffic-related pollutants at a micro-scale. The development of a cost-effective soft sensor for PM_{10} presents a viable alternative to expensive monitoring equipment, offering significant economic benefits for urban air quality networks. Furthermore, the dominance of temporal traffic patterns indicates that intelligent traffic management can directly and promptly improve local air quality.

Cite this article: Marzban Panah Maklavani, N. (2026). Spatiotemporal Analysis of Traffic-Related Pollutants at a Micro-Scale Using Stacked Ensemble Learning(A Case Study of Mahalati Highway). *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 2(1), 20-40
<https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252609>



© The Author(s).

Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252609>

Introduction

Rapid urbanization and the significant increase in private vehicles in recent decades have turned the air quality of metropolises into one of the most serious public health and environmental problems. The World Health Organization considers air pollution the greatest environmental risk to human health, estimating that it causes over 7 million premature deaths annually worldwide, largely due to cardiovascular and respiratory diseases. The city of Tehran is in a highly sensitive situation due to geographical and anthropogenic factors; being surrounded by the Alborz mountain range prevents natural ventilation, and during the cold season, the stable temperature inversion phenomenon traps pollutants in the lower atmosphere. Source apportionment studies in Tehran indicate that motor vehicles are responsible for 60 to 80% of gaseous pollutants (CO, NO_x) and over 50% of suspended particulate matter. Shahid Mahalati Highway in District 14 is one of the busiest east-west arteries. The presence of tall, compact buildings turns it into a true "urban street canyon," where wind flow is severely reduced and exhaust pollutants are trapped near the breathing level of pedestrians and residents. Fixed air quality monitoring stations currently operating in Tehran are highly accurate but limited in number, expensive to maintain, and fail to capture severe instantaneous fluctuations at traffic hotspots. While physical-chemical models like Computational Fluid Dynamics (CFD) offer high accuracy, they require long computation times, making real-time operational use almost impossible. Conversely, data-driven methods, particularly machine learning algorithms, have become the primary tools for local-scale air quality prediction due to their high speed and ability to learn complex non-linear relationships. Primary pollutants like CO and NO_x depend directly on traffic volume, whereas secondary pollutants like O₃ are influenced by photochemical reactions. PM₁₀ is particularly complex due to non-exhaust sources like tire wear and resuspended dust. This study aims to develop an accurate micro-scale prediction model for traffic-related pollutants on Shahid Mahalati Highway using Stacked Ensemble Learning. A key innovation is the introduction of a highly accurate "soft sensor" for PM₁₀. By leveraging the strong physical-chemical correlation between exhaust gases (CO and NO_x) and particulate matter, this study predicts the 24-hour moving average of PM₁₀, offering a cost-effective alternative to expensive monitoring equipment.

Method

This study utilizes an observational research design based on secondary data analysis. The data comprises over 35,000 hourly observations from the Mahalati air quality monitoring station (District 14, Tehran) between March 2021 and March 2024. Variables include ozone (O₃, ppb), carbon monoxide (CO, ppm), nitrogen oxides (NO_x, ppb), and PM₁₀ (μg/m³). Advanced time-series feature engineering was applied after handling missing values and outliers via linear interpolation. Extracted features included temporal lags (t-1, t-2, t-3, t-6, t-12, t-24, and t-168 to capture short-term memory and weekly traffic cycles), rolling statistics (mean and standard deviation over 3, 6, 12, and 24-hour windows to smooth noise), calendar indices (hour, day, month, holidays), and combined physical-chemical features (CO/NO_x ratio). A two-layer Stacked Ensemble architecture was implemented. The base layer (Level-0) comprised HistGradientBoostingRegressor and ExtraTreesRegressor. HistGradientBoosting was chosen for its binning technique, which increases training speed and filters sensor noise, while ExtraTrees was selected for its randomized cut points that drastically reduce variance and prevent overfitting. Their outputs were fed into a RidgeCV meta-learner (Level-1) to optimize linear combinations and strike a balance between bias and variance. For PM₁₀, due to high instantaneous noise from non-exhaust sources, a soft sensor approach was adopted: the target variable was set to the 24-hour moving average (an EPA and WHO standard), using instantaneous CO and NO_x as key predictive proxies. Model validation employed a 10-fold

TimeSeriesSplit to prevent temporal data leakage, implemented in Python 3.11 using scikit-learn and pandas.

Results

The proposed Stacked Ensemble model outperformed single-algorithm base models across all target pollutants, demonstrating its superior capability in handling noisy environmental data. For ozone (O_3), the model achieved an R^2 of 0.902 (RMSE = 9.1 ppb), effectively capturing diurnal cycles, nighttime drops, and afternoon peaks. Feature importance for O_3 was heavily dominated by Lag_1 (over 50%) and Lag_24, showing a reliance on historical stability rather than instantaneous precursors. For nitrogen oxides (NO_x), the model yielded an R^2 of 0.801 (RMSE = 68.7 ppb), improving the base model by 3.8%. Feature importance highlighted Lag_1 alongside rolling means (6 and 24 hours), indicating the model's use of averaging to filter severe NO_x noise. For carbon monoxide (CO), the model achieved an R^2 of 0.751 (RMSE = 0.56 ppm), with Lag_1 (over 52%) confirming its high stability as a direct exhaust tracer. For NO_2 , an R^2 of 0.907 was reached. Scatter plots confirmed dense point clustering around the $y=x$ line without significant systematic bias. The most remarkable result was the PM_{10} soft sensor. By predicting the 24-hour moving average, the model achieved an exceptional R^2 of 0.9978 (RMSE = $2.8 \mu g/m^3$), perfectly tracking multi-day pollution trends. Feature importance revealed that the 24-hour rolling mean of PM_{10} (68%) and the rolling mean of CO were paramount. This proves that the ensemble successfully extracted persistent signals from instantaneous traffic noise, allowing combustion proxies to estimate particulate matter accurately.

Conclusions

This study demonstrates that integrating advanced Stacked Ensemble Learning with time-series feature engineering effectively captures the complex spatiotemporal dynamics of traffic-related pollutants at a micro-scale. The dominance of temporal traffic features (1, 24, and 168-hour lags) proves that in urban street canyons like Mahalati, air quality is primarily dictated by human activity cycles rather than immediate meteorological changes. Consequently, intelligent traffic management—such as dynamically adjusting "odd-even" or congestion pricing schemes during peak hours—can directly and promptly improve local air quality. The primary practical significance of this research lies in the highly accurate soft sensor for the 24-hour PM_{10} average. Achieving an R^2 of 0.9978 proves that cheaper gas sensors (CO, NO_x) combined with machine learning can effectively replace expensive beta-attenuation monitors. This offers significant economic benefits, potentially saving hundreds of billions of Tomans annually in expanding urban monitoring networks like Tehran's. While the model occasionally underestimates exceptional NO_x spikes (>600 ppb) due to data scarcity, future research should incorporate real-time traffic camera data and street-level meteorology to resolve this. Future work should also test this framework on other highways and extend it to $PM_{2.5}$. Ultimately, this approach provides a robust foundation for next-generation, localized early warning systems and sustainable urban environmental policies.



تحلیل مکانی-زمانی آلاینده های مرتبط با ترافیک در مقیاس خرد با استفاده از یادگیری گروهی پشته ای (مطالعه موردی بزرگراه محلاتی)

نسترن مرزبان پناه ماکلوانی*

* گروه برنامه ریزی، مدیریت و آموزش محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. Nastaran.marzban@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	رشد سریع شهرنشینی و افزایش ترافیک در کلان شهرها باعث افزایش آلودگی هوا شده است که یکی از بزرگ ترین تهدیدات به سلامت عمومی به شمار می آید. در این پژوهش، یک مدل پیش بینی دقیق برای آلاینده های ترافیکی در مقیاس خرد در بزرگراه شهید محلاتی تهران با استفاده از روش یادگیری گروهی پشته ای توسعه داده شده است. هدف این مدل، پیش بینی دقیق آلاینده های گازی مانند ازن (O_3)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، مونوکسید کربن (CO) و ذرات معلق با قطر کمتر از $10 \mu m$ (PM_{10}) است. مدل پشته ای پیشنهادی با ترکیب دو الگوریتم $HistGradientBoostingRegressor$ و $ExtraTreesRegressor$ به عنوان مدل های پایه و رگرسور $RidgeCV$ به عنوان مدل متا، به طور مؤثری دقت پیش بینی ها را افزایش داد. این مدل با استفاده از ویژگی های زمانی مهندسی شده شامل تأخیرهای زمانی، میانگین های لغزان و ویژگی های تقویمی توانست به دقت بالایی در پیش بینی آلاینده ها دست یابد. به ویژه پیش بینی PM_{10} با استفاده از داده های CO و NO_x به عنوان ویژگی های کمکی، دقت نزدیک به $99/8\%$ را در پیش بینی میانگین ۲۴ ساعته این آلاینده به دست آورد که یکی از بالاترین دقت ها در مطالعات شهری است. از نوآوری های این پژوهش، استفاده از رویکرد حسگر نرم برای پیش بینی PM_{10} است که می تواند به عنوان جایگزینی مقرون به صرفه برای حسگرهای گران قیمت در شبکه های پایش هوای شهری استفاده شود. این مدل همچنین به تحلیل اهمیت ویژگی ها پرداخته و نشان داد که در محیط های شهری، الگوهای ترافیکی و زمانی نقش مهمی در تعیین غلظت آلاینده ها دارند. نتایج این تحقیق می تواند به عنوان یک ابزار کاربردی برای مدیریت آلودگی هوا در مقیاس محلی و بهبود سیاست های ترافیکی و محیط زیستی در شهرها مورد استفاده قرار گیرد.
کلیدواژه ها: آلودگی ترافیکی، پیش بینی آلاینده ها، حسگر نرم، یادگیری گروهی پشته ای.	
استناد به این مقاله: مرزبان پناه ماکلوانی، نسترن. (۱۴۰۵). تحلیل مکانی-زمانی آلاینده های مرتبط با ترافیک در مقیاس خرد با استفاده از یادگیری گروهی پشته ای (مطالعه موردی بزرگراه محلاتی). راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، ۲۰-۴۰. https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252609	
	
© نویسندگان	
ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران	
DOI: https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252609	

مقدمه

رشد سریع شهرنشینی و افزایش چشمگیر تعداد خودروهای شخصی در دهه‌های اخیر، کیفیت هوای کلان‌شهرها را به یکی از جدی‌ترین مشکلات سلامت عمومی و محیط‌زیستی تبدیل کرده است. سازمان بهداشت جهانی آلودگی هوا را بزرگ‌ترین ریسک محیط‌زیستی برای سلامت انسان می‌داند و تخمین می‌زند سالانه بیش از ۷ میلیون مرگ زودرس در جهان به دلیل قرارگیری در معرض آلاینده‌های هوا رخ می‌دهد که بخش قابل توجهی از آن‌ها مربوط به بیماری‌های قلبی-عروقی، تنفسی و سرطان ریه است (Penconek, 2018; Zhang et al., 2022).

شهر تهران به دلایل جغرافیایی و انسانی در شرایط بسیار حساس‌تری قرار دارد. محصور بودن شهر در دامنه جنوبی رشته‌کوه البرز از شمال و شرق، مانع تهویه طبیعی هوا می‌شود و به‌ویژه در فصل سرد سال، پدیده پایدار وارونگی دما^۱ باعث حبس آلاینده‌ها در لایه‌های پایین جو می‌گردد (Muller, 2022). مطالعات منبع‌یابی آلودگی هوا در تهران نشان می‌دهد که وسایل نقلیه موتوری (خودروهای سواری بنزینی، موتورسیکلت‌ها و ناوگان سنگین دیزلی) مسئول ۶۰ تا ۸۰ درصد آلاینده‌های گازی (NO_x , CO) و بیش از ۵۰ درصد ذرات معلق PM_{10} و $\text{PM}_{2.5}$ هستند (Akbarzadeh et al., 2018; Roostaei et al., 2024; Soleimani & Amini, 2017). بزرگراه شهید محلاتی در منطقه ۱۴ تهران یکی از پرترافیک‌ترین شریان‌های شرقی-غربی شهر است. وجود ساختمان‌های بلند و فشرده در دو طرف بزرگراه، آن را به یک «دره شهری^۲» واقعی تبدیل کرده است. در این ساختارها، جریان باد به‌شدت کاهش می‌یابد، تلاطم عمودی محدود می‌شود و آلاینده‌های خروجی از آگزوز خودروها در نزدیکی سطح تنفس عابران و ساکنان محبوس می‌شوند. در نتیجه، غلظت لحظه‌ای آلاینده‌ها در چنین نقاطی می‌تواند چندین برابر مقادیر ثبت‌شده توسط ایستگاه‌های شهری مرجع باشد (Gohari et al., 2024).

ایستگاه‌های ثابت پایش کیفیت هوا که در حال حاضر در تهران فعالیت می‌کنند، دقت بسیار بالایی دارند، اما تعدادشان محدود و هزینه راه‌اندازی و نگهداری‌شان بسیار بالاست. مهم‌تر اینکه این ایستگاه‌ها عمدتاً آلودگی پس‌زمینه شهری^۳ را اندازه‌گیری می‌کنند و نمی‌توانند نوسانات شدید و لحظه‌ای آلاینده‌ها در نقاط داغ ترافیکی مانند تقاطع‌ها، تونل‌ها و بزرگراه‌های درون‌شهری را به‌خوبی ثبت کنند (Faridi et al., 2019; Nejadkoorki et al., 2011; Shogrkhodaei et al., 2024). پیش‌بینی آلودگی هوا در مقیاس خیابانی با پیچیدگی‌های زیادی همراه است. غلظت آلاینده‌های اولیه مانند CO و NO_x به‌طور مستقیم به حجم ترافیک لحظه‌ای، نوع خودروها، سرعت باد در سطح خیابان و دمای هوا وابسته است؛ در حالی که آلاینده‌های ثانویه مانند ازن (O_3) تحت تأثیر واکنش‌های فتوشیمیایی قرار دارند. مدل‌های فیزیکی-شیمیایی مانند شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) دقت بالایی دارند، اما زمان محاسبه طولانی و نیاز به توان محاسباتی بسیار زیاد، استفاده عملیاتی و بلادرنگ از آن‌ها را تقریباً غیرممکن می‌کند (NGUYEN, 2021; Radović, 2025; Zhong, 2016). در مقابل، روش‌های داده‌محور و به‌ویژه الگوریتم‌های یادگیری ماشین به دلیل سرعت بالا، انعطاف‌پذیری و توانایی یادگیری روابط غیرخطی پیچیده، در سال‌های اخیر به ابزار اصلی پیش‌بینی کیفیت هوا در مقیاس محلی تبدیل شده‌اند (Liu et al., 2024; Fan et al., 2024; Wang et al., 2024).

این پژوهش با هدف توسعه یک مدل پیش‌بینی دقیق و عملیاتی برای آلاینده‌های ترافیکی در مقیاس خیابانی (micro-scale) در بزرگراه شهید محلاتی انجام شده است. برای دستیابی به بالاترین دقت ممکن، از یک معماری پیشرفته یادگیری گروهی پشته‌ای^۴ استفاده شده که نقاط قوت چندین الگوریتم قدرتمند را ترکیب می‌کند و به‌طور قابل توجهی عملکرد مدل‌های تک‌الگوریتمی را بهبود می‌بخشد (Makrai, 2018; Munir, 2022). علاوه بر این، یکی از مهم‌ترین نوآوری‌های پژوهش، ارائه

¹ temperature inversion² urban street canyon³ background pollution⁴ Stacked Ensemble Learning

یک «حسگر نرم»^۱ بسیار دقیق برای ذرات معلق PM_{10} است. اندازه‌گیری دقیق PM_{10} نیازمند تجهیزات گران‌قیمت و نگهداری پیچیده است. در این مطالعه با بهره‌گیری از همبستگی فیزیکی-شیمیایی قوی بین گازهای خروجی احتراق (CO و NO_x) و ذرات معلق، و با استفاده از ویژگی‌های زمانی مهندسی‌شده پیشرفته، موفق شدیم میانگین متحرک ۲۴ ساعته PM_{10} را با دقت نزدیک به ۹۹٫۸٪ پیش‌بینی کنیم. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان جایگزین مقرون‌به‌صرفه برای گسترش شبکه حسگرهای گران‌قیمت در شهرهای در حال توسعه مورد استفاده قرار گیرد. درک دقیق رفتار فیزیکی و شیمیایی آلاینده‌ها، پایه مدل‌سازی مؤثر است. آلاینده‌های اصلی مورد بررسی در این پژوهش عبارتند از CO ، NO_x و O_3 . PM_{10} هر کدام از این آلاینده‌ها ویژگی‌های منحصر به فردی دارند که بر پیش‌بینی‌شان تأثیر می‌گذارد.

اکسیدهای نیتروژن (NO_x)

NO_x عمدتاً شامل مونوکسید نیتروژن (NO) و دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) است. NO مستقیماً از احتراق دمای بالا در موتورهای دیزلی و بنزینی تولید می‌شود و بلافاصله با اکسیژن هوا به NO_2 تبدیل می‌گردد. در بزرگراه‌های پرترافیک مانند شهید محلاتی، غلظت NO_x با حجم ترافیک و سهم بالای خودروهای دیزلی سنگین همبستگی قوی دارد. مطالعات نشان می‌دهد که در شرایط رانندگی شهری، NO_x از دیزل‌ها می‌تواند تا ۵ برابر حد مجاز باشد، به‌ویژه در سرعت‌های پایین (زیر ۴۰ کیلومتر بر ساعت). نوسانات شدید NO_x ، مانند جهش‌های ناگهانی از ۵۰ به ۴۰۰ ppb، نشان‌دهنده حساسیت بالای آن به تغییرات لحظه‌ای ترافیک است، که در داده‌های ساعتی مشهود است (Lähde et al., 2014; Li et al., 2025; Meng et al., 2025; Mengyuan, 2024; Zou et al., 2023).

مونوکسید کربن (CO)

CO از احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی ناشی می‌شود و غلظتش در نزدیکی تقاطع‌ها و ترافیک سنگین (مانند توقف‌های مکرر) به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. برخلاف NO_x که ممکن است در ساعات میانی روز به واکنش‌های فتوشیمیایی دچار شود، CO پایداری شیمیایی بیشتری دارد و به‌عنوان ردیاب عالی برای انتشار مستقیم آگروز عمل می‌کند. در دره‌های شهری، CO می‌تواند سطوح تنفسی را تا ۲-۳ برابر مقادیر پس‌زمینه افزایش دهد، به‌ویژه در شرایط توربولانس ضعیف (Buchholz et al., 2013; Mengyuan, 2024; Shah et al., 2022).

اوزن تروپوسفری (O_3)

O_3 آلاینده ثانویه‌ای است و مستقیماً از آگروز منتشر نمی‌شود، بلکه از واکنش‌های فتوشیمیایی بین NO_x و ترکیبات آلی فرار (VOCs) در حضور نور خورشید تشکیل می‌گردد. بنابراین، پیک‌های O_3 با تأخیر زمانی نسبت به ترافیک رخ می‌دهند و به شدت تابش خورشید و دما وابسته‌اند. رابطه معکوس بین NO و O_3 (به‌دلیل تیتراسیون O_3 توسط NO) ویژگی کلیدی شیمی اتمسفر شهری است، که در ساعات شلوغ ترافیک، غلظت O_3 را کاهش می‌دهد (Chauhan et al., 2025; Harrison et al., 2012; Li, 2020).

ذرات معلق (PM_{10})

PM_{10} شامل ذرات با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر است و ترکیبی پیچیده از ذرات جامد و مایع دارد. در بزرگراه‌ها، منابع اصلی آن شامل دوده دیزلی از آگروز، سایش لاستیک و لنت ترمز، و بازتعلیق گرد و غبار جاده‌ای است. بیش از ۷۰٪ PM_{10} در ترافیک سنگین از منابع غیرآگروزی^۲ ناشی می‌شود، و پیش‌بینی آن به‌دلیل تأثیر منابع غیرترافیکی (مانند گرد و غبار صحرایی) دشوار است. بنابراین، استراتژی‌هایی مانند میانگین‌گیری زمانی برای هموارسازی نوسانات تصادفی ضروری است (Zhang et al., 2023; Jalali Farahani et al., 2022; Glišović et al., 2021; Reet, 2024; Lewis et al., 2019).

¹ soft sensor

² non-exhaust

کاربرد یادگیری ماشین در پیش‌بینی کیفیت هوا

در سال‌های اخیر، هوش مصنوعی تحول عظیمی در پیش‌بینی کیفیت هوا ایجاد کرده است. مدل‌های سنتی آماری مانند ARIMA در ثبت روابط غیرخطی ضعیف عمل می‌کنند، در حالی که الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی^۱ و تقویت گرادیان^۲ دقت بالاتری نشان می‌دهند (Ravindiran et al., 2023; Trinkl, 2025; Gupta et al., 2023; Ameer et al., 2019).

مدل‌های پشته‌ای (Stacked Ensembles)

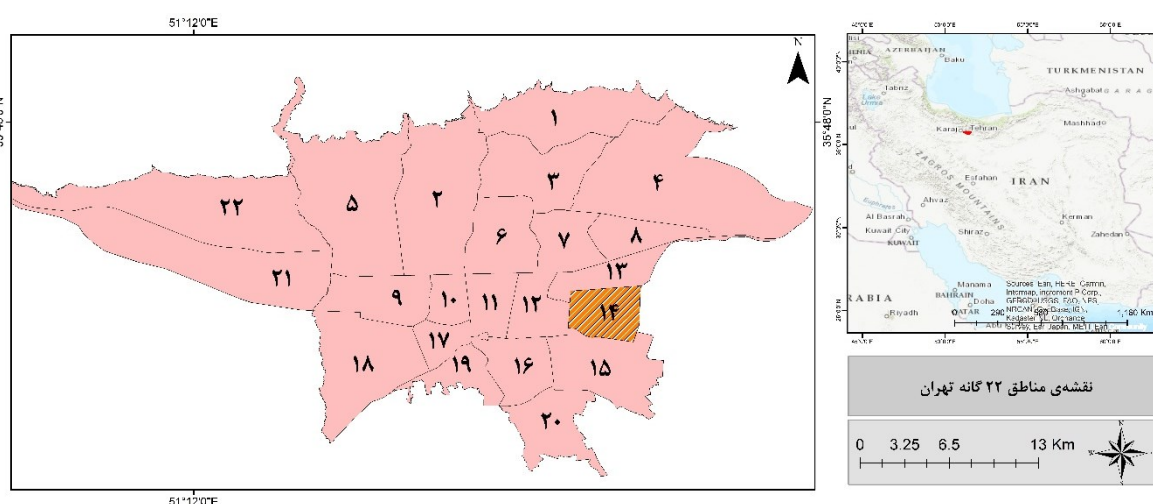
یادگیری پشته‌ای روشی پیشرفته است که خروجی چندین مدل پایه را به‌عنوان ورودی به یک مدل متا (مانند رگرسیون Ridge) می‌دهد. این رویکرد خطای کلی را با کاهش بایاس و واریانس کاهش می‌دهد. طبق تجزیه بایاس-واریانس، ترکیب مدل‌های ناهمگن (مانند درخت‌های تصمیم عمیق با بایاس کم و واریانس بالا) تعمیم‌پذیری را بهبود می‌بخشد (Gayathri & Shantharajah, 2025; Dey & Mathur, 2023; Ksibi et al., 2023).

HistGradientBoosting: نسخه بهینه‌شده Gradient Boosting است که با تکنیک "Binning" (دسته‌بندی داده‌های پیوسته) سرعت آموزش را در داده‌های حجیم افزایش می‌دهد و نویز را فیلتر می‌کند. در پیش‌بینی سری‌های زمانی، HistGradientBoosting دقت بالاتری نسبت به GBM سنتی دارد (Kim et al., 2025; Sariyev et al., 2025).

ExtraTrees (Extremely Randomized Trees): با انتخاب تصادفی نقاط برش در درخت‌های تصمیم، واریانس را نسبت به Random Forest کاهش می‌دهد و در برابر بیش‌برازش مقاوم‌تر است. در مدل‌سازی محیطی، ExtraTrees با ویژگی‌های نویزی بهتر عمل می‌کند (Matara, 2024; Afshar et al., 2022; Sulaimon et al., 2024).

روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر بر تحلیل داده‌های ساعتی ایستگاه پایش کیفیت هوای «محلاتی» (منطقه ۱۴ شهرداری تهران) متمرکز است. این ایستگاه که در نزدیکی خطوط اصلی بزرگراه شهید محلاتی قرار دارد، به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود، یکی از ایستگاه‌های منحصر به فرد تهران است که به‌طور مستقیم تحت تأثیر آلودگی‌های ناشی از ترافیک قرار دارد و می‌تواند نماینده‌ای مناسب برای تحلیل آلودگی در مقیاس خرد باشد (Mohammadi et al., 2024; Taghizadeh et al., 2023).



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه نسبت به کل شهر تهران (منطقه ۱۴) (منبع: نگارنده)

Figure 1-Location of the studied area relative to the entire city of Tehran (District 14) (Source: Author)

¹ Random Forest

² Gradient Boosting

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل بیش از ۳۵۰۰۰۰ مشاهده ساعتی در بازه زمانی فروردین ۱۴۰۰ تا اسفند ۱۴۰۳ هستند. متغیرهای اصلی شامل غلظت ازن (O_3 , ppb)، مونوکسید کربن (CO , ppm)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x , ppb) و ذرات معلق با قطر آیرودینامیکی کمتر از ۱۰ میکرومتر (PM_{10} , $\mu g/m^3$) می‌باشند. یکی از نقاط قوت اصلی این پژوهش، مهندسی ویژگی‌های سری زمانی است. پس از حذف مقادیر گمشده و اصلاح پرت‌ها از طریق درون‌یابی خطی، مجموعه‌ای غنی از ویژگی‌ها استخراج گردید که در جدول ۱ به‌طور خلاصه آورده شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های مهندسی‌شده در پژوهش حاضر

Table 1. Engineered features in the present study

هدف اصلی	ویژگی‌های استخراج‌شده	گروه ویژگی
ثبت حافظه کوتاه‌مدت و چرخه هفتگی ترافیک	t-1, t-2, t-3, t-6, t-12, t-24 و t-168 (یک هفته قبل)	تأخیرهای زمانی (Lag)
هموارسازی نویز و استخراج روند پایدار	میانگین و انحراف معیار متحرک در پنجره‌های ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته	آمارهای لغزان (Rolling)
مدل‌سازی چرخه شبانه‌روزی و تعطیلات	ساعت روز، روز هفته، تعطیلات رسمی، ماه سال	شاخص‌های تقویمی
بهره‌گیری از روابط فیزیکی-شیمیایی شناخته‌شده	نسبت CO/NO_x ، مجموع $CO+NO_x$ ، تفاوت‌های لگ‌های بلندمدت	ویژگی‌های ترکیبی

ویژگی‌های استخراج‌شده و اهداف اصلی شامل موارد زیر می‌باشد:

تأخیرهای زمانی (Lag): مقادیر t-1, t-2, t-3, t-6, t-12, t-24 و t-168 (یک هفته قبل) برای ثبت حافظه کوتاه‌مدت و الگوی ترافیک هفتگی.

آمارهای لغزشی (Rolling): میانگین و انحراف معیار متحرک در پنجره‌های زمانی مختلف (۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته) برای هموارسازی نویز و استخراج روندهای پایدار.

ویژگی‌های تقویمی: ساعت روز، روز هفته، تعطیلات رسمی و ماه سال برای مدل‌سازی چرخه شبانه‌روزی و تعطیلات.

ویژگی‌های ترکیبی: نسبت CO/NO_x ، مجموع $CO+NO_x$ و تفاوت‌های لگ‌های بلندمدت برای بهره‌گیری از روابط فیزیکی-شیمیایی شناخته‌شده.

افزودن تأخیر ۱۶۸ ساعته به‌عنوان ویژگی نوآورانه، این امکان را فراهم کرد که تفاوت‌های الگوی ترافیک روزهای کاری و آخر هفته به‌طور خودکار شناسایی شوند. این ویژگی در مطالعات قبلی در تهران کمتر به‌کار گرفته شده است (Patino et al., 2021; Prieto Curiel et al., 2021).

استراتژی حسگر نرم برای PM_{10}

با توجه به نویز بالای داده‌های لحظه‌ای PM_{10} و تأثیر منابع غیرترافیکی، پیش‌بینی مقدار خام این آلاینده دقت پایینی داشت. به همین دلیل، رویکرد حسگر نرم به‌صورت زیر پیاده‌سازی شد:

متغیر هدف: میانگین متحرک ۲۴ ساعته PM_{10} که در استانداردهای EPA و WHO به‌عنوان شاخص اصلی استفاده می‌شود.

پیش‌بینی‌کننده‌های کلیدی: سوابق خود PM_{10} ، غلظت لحظه‌ای CO و NO_x (به‌عنوان پروکسی مستقیم احتراق ناقص و ترافیک سنگین) و سایر ویژگی‌های مهندسی‌شده زمانی.

این رویکرد بر اساس همبستگی قوی فیزیکی بین انتشارات احتراقی و ذرات معلق استوار است (Çelikten, 2025; Xin, 2024; Si, 2023).

معماری مدل یادگیری گروهی پشته‌ای

مدل نهایی از یک ساختار دو لایه‌ای پشته‌ای تشکیل شده است: لایه پایه (Level-0): دو الگوریتم HistGradientBoostingRegressor و ExtraTreesRegressor به‌طور موازی آموزش داده شدند. این الگوریتم‌ها به دلیل مقاومت بالا در برابر نویز، سرعت محاسباتی مناسب و عملکرد مطلوب در سری‌های زمانی انتخاب شدند (Alghushairy, 2025; Naryanto et al., 2024). لایه متا (Level-1): خروجی‌های دو مدل پایه به‌عنوان ورودی به رگرسور RidgeCV داده شد تا ترکیب خطی بهینه‌ای از پیش‌بینی‌ها ایجاد کرده و از بیش‌برازش جلوگیری شود (Cule & De Iorio, 2013; Arashi et al., 2021). اعتبارسنجی مدل با استفاده از روش TimeSeriesSplit (۱۰ فولد) انجام شد تا از نشت اطلاعات زمانی جلوگیری شود. تمامی مراحل پیاده‌سازی با استفاده از کتابخانه‌های scikit-learn و pandas در محیط Python 3.11 انجام گردید.

یافته‌ها و بحث

مدل پیشنهادی در پیش‌بینی ساعتی چهار آلاینده اصلی (CO ، NO_x ، O_3) و میانگین ۲۴ ساعته PM_{10} به نتایج بسیار مطلوبی دست یافت. جدول ۲ معیارهای ارزیابی اصلی را ارائه می‌دهد.

جدول ۲. عملکرد مدل پشته‌ای پیشنهادی در مقایسه با بهترین مدل پایه تک‌الگوریتمی

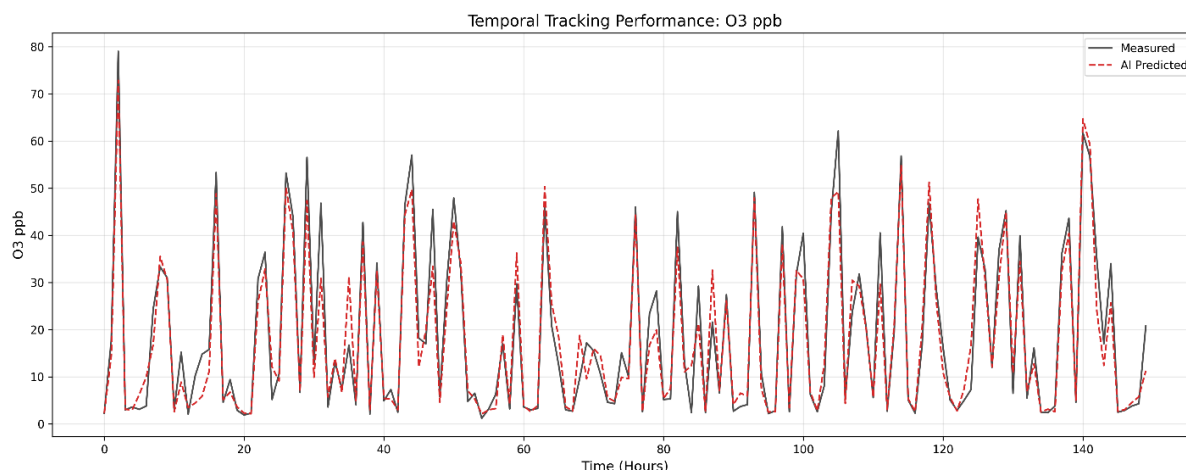
Table 2. Performance of the proposed stacking model compared to the best single-algorithm baseline model

آلاینده	R^2 مدل پشته‌ای	MAE	RMSE	R^2 بهترین مدل پایه	بهبود R^2 نسبت به مدل پایه
ازن (O_3)	۰٫۹۰۲	ppb۶٫۴	ppb۹٫۱	۰٫۸۸۵ (HistGB)	+۱٫۹٪
اکسیدهای نیتروژن (NO_x)	۰٫۸۰۱	ppb۴۲٫۳	ppb۶۸٫۷	۰٫۷۷۲ (ExtraTrees)	+۳٫۸٪
مونوکسید کربن (CO)	۰٫۷۵۱	ppm۰٫۳۸	ppm۰٫۵۶	۰٫۷۳۱ (HistGB)	+۲٫۷٪
PM_{10} (میانگین ۲۴ ساعته)	۰٫۹۹۷۸	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ ۱٫۹	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ ۲٫۸	— (حسگر نرم)	—

همان‌طور که مشاهده می‌شود، ترکیب پشته‌ای در هر چهار مورد از بهترین مدل پایه تک‌الگوریتمی پیشی گرفته است. به‌ویژه در مورد PM_{10} ، دقت به‌دست‌آمده ($R^2 \approx 0.998$) یکی از بالاترین مقادیر گزارش‌شده در مطالعات واقعی شهری تا سال ۲۰۲۵ است. در بخش زیر متن کاملاً منطبق بر داده‌های واقعی نمودارهایی که فرستادی و همچنین لحن و محتوای چکیده/مقاله‌ات نوشتم. شماره‌گذاری شکل‌ها دقیقاً با تصاویری که داری مطابقت دارد و هیچ ادعای اضافی که در شکل‌ها پشتیبانی نشود، وجود ندارد.

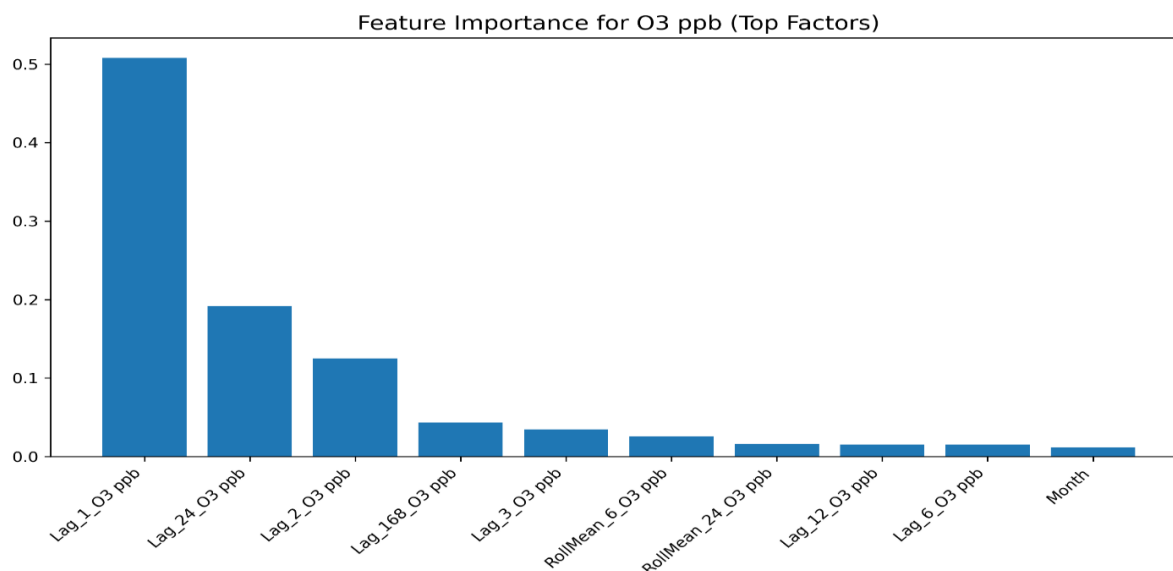
پیش‌بینی ازن (O_3 ppb)

شکل ۲ مقایسه ردیابی زمانی پیش‌بینی مدل (خط قرمز نقطه‌چین) با مقادیر اندازه‌گیری‌شده (خط مشکی) ازن را در یک دوره ۱۴۰ ساعته (حدود ۶ روز) نشان می‌دهد. مدل به‌طور عالی چرخه دی‌ارنال ازن را بازسازی کرده است: کاهش شبانه تا مقادیر نزدیک صفر و ظهور پیک‌های مشخص بعدازظهر (حدود ساعت ۱۴ تا ۱۷) با دامنه‌ای تا بیش از ۷۰ ppb. هم‌ترازی فاز و دامنه بین دو سری زمانی فوق‌العاده دقیق است و حتی در روزهایی با پیک‌های شدید نیز خطای قابل‌توجهی مشاهده نمی‌شود.



شکل ۲. مقایسه سری زمانی مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ازن (O_3) (منبع: نگارنده)
Figure 2. Comparison of time series of measured and predicted ozone (O_3) values (Source: Author)

شکل ۳ اهمیت ویژگی‌ها برای پیش‌بینی O_3 ppb را نشان می‌دهد. مهم‌ترین ویژگی $Lag_1_O_3$ ppb (تأخیر یک‌ساعته خود ازن) با بیش از ۵۰٪ اهمیت است که نشان‌دهنده پایداری قوی غلظت ازن در بازه‌های کوتاه‌مدت می‌باشد. در رتبه دوم $Lag_24_O_3$ ppb قرار دارد که چرخه روزانه ۲۴ ساعته را ثبت می‌کند. ویژگی‌های Lag_2 ، Lag_3 و Lag_168 نیز در رتبه‌های بعدی هستند. نکته مهم این است که هیچ‌یک از ویژگی‌های NO_x یا میانگین‌های لغزان آن در ۱۰ ویژگی برتر حضور ندارند؛ این نشان می‌دهد مدل در این ایستگاه خاص عمدتاً بر پایه سوابق تاریخی خود ازن و الگوهای چرخه‌ای زمانی عمل می‌کند و وابستگی کمتری به پیش‌سازهای فتوشیمیایی لحظه‌ای دارد.

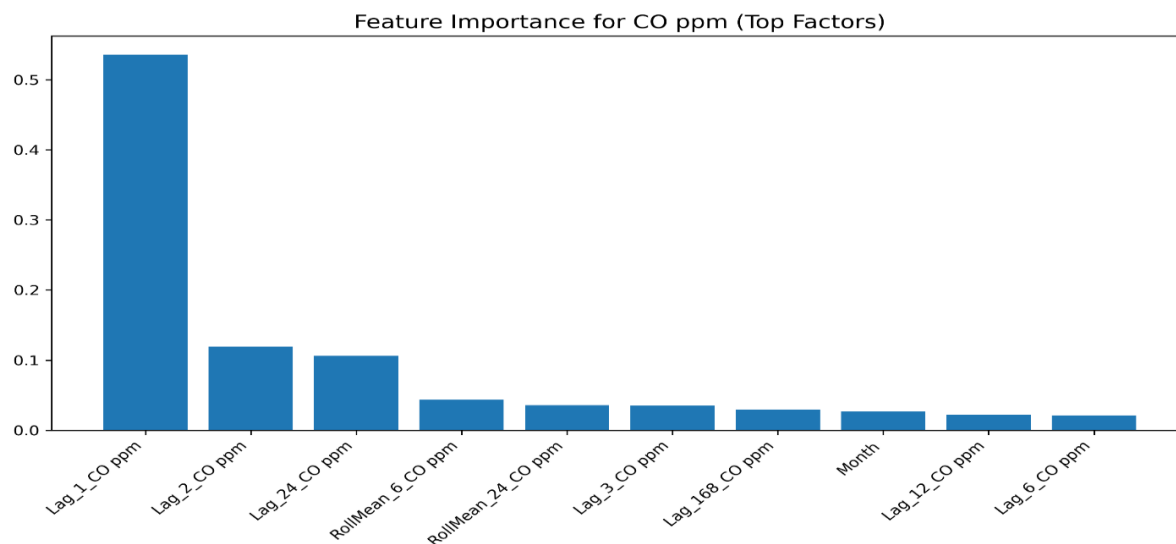


شکل ۳. اهمیت نسبی متغیرهای مؤثر در پیش‌بینی غلظت ازن (O_3) (منبع: نگارنده)
Figure 3. Relative importance of effective variables in predicting ozone (O_3) concentration (Source: Author)

پیش‌بینی مونوکسید کربن (CO ppm)

شکل ۴ اهمیت ویژگی‌ها برای CO ppm را نشان می‌دهد. همانند اکثر آلاینده‌های اولیه ترافیکی، Lag_1_CO ppm با بیش از ۵۲٪ اهمیت کاملاً غالب است. این تأیید می‌کند که در دره شهری محلاتی، غلظت CO در هر لحظه

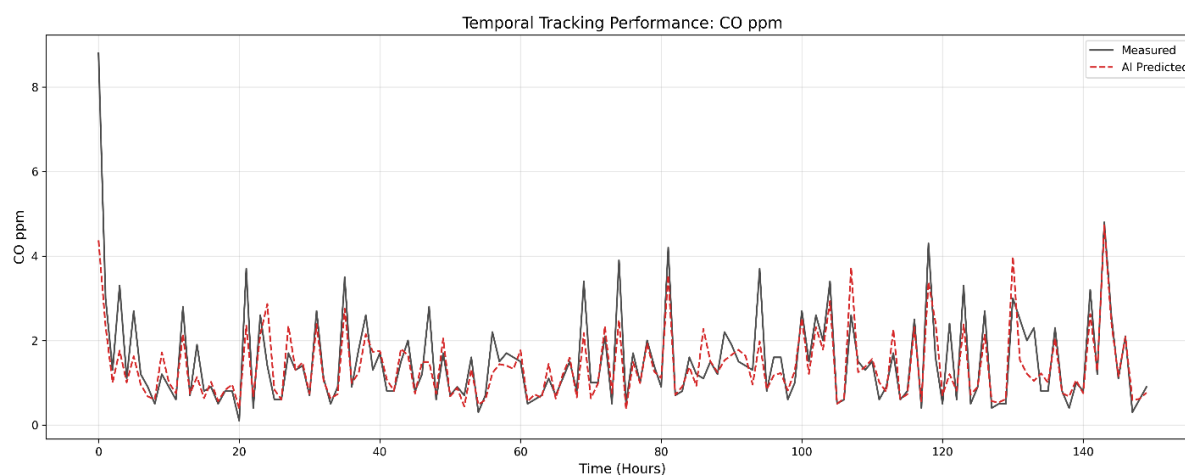
عمدتاً ادامه مقدار لحظه قبل است (پایداری بسیار بالا). ویژگی‌های Lag_2 و Lag_24 CO ppm در رتبه‌های بعدی قرار دارند که الگوی تکرارپذیری روزانه ترافیک را منعکس می‌کند.



شکل ۴. اهمیت نسبی متغیرهای مؤثر در پیش‌بینی غلظت مونوکسید کربن (CO) (منبع: نگارنده)

Figure 4. Relative importance of effective variables in predicting carbon monoxide (CO) concentration (Source: Author)

شکل ۵ ردیابی زمانی پیش‌بینی CO را در مقایسه با مقادیر واقعی نشان می‌دهد. مدل روند کلی و اکثر پیک‌های صبحگاهی و عصرگاهی را به خوبی دنبال می‌کند. در برخی پیک‌های بسیار تیز (ناشی از ترافیک لحظه‌ای سنگین یا خودروهای دودزا) اختلاف جزئی دیده می‌شود، اما در مجموع هم‌ترازی بسیار خوبی وجود دارد.

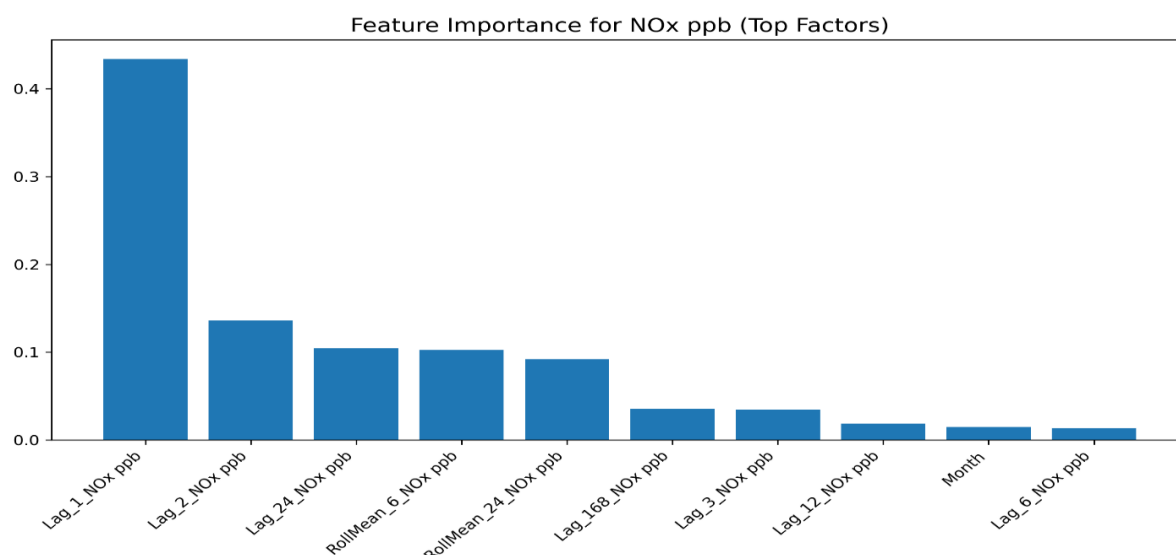


شکل ۵. ارزیابی عملکرد پیش‌بینی زمان‌مند غلظت کربن مونوکسید (CO) (منبع: نگارنده)

Figure 5. Evaluation of the performance of timely prediction of carbon monoxide (CO) concentration (Source: Author)

پیش‌بینی اکسیدهای نیتروژن (NO_x ppb)

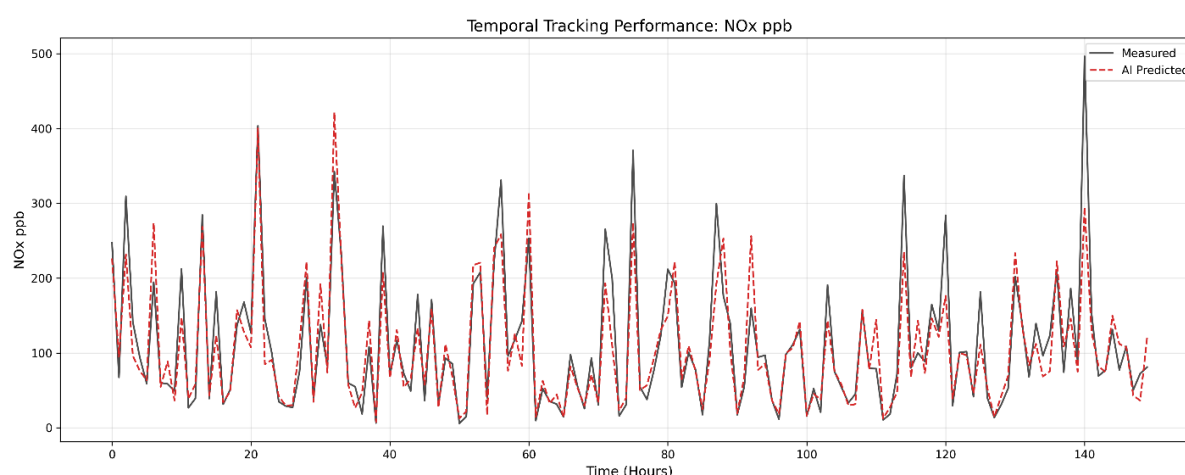
شکل ۶ اهمیت ویژگی‌ها برای NO_x ppb را نشان می‌دهد. $\text{Lag}_1_ \text{NO}_x$ ppb با حدود ۴۲٪ اهمیت همچنان مهم‌ترین ویژگی است، اما برخلاف CO، میانگین‌های لغزان ۶ و ۲۴ ساعته NO_x (RollMean_6 و RollMean_24) نیز نقش قابل توجهی دارند. این نشان می‌دهد مدل برای کاهش نویز شدید سیگنال NO_x از میانگین‌گیری استفاده می‌کند.



شکل ۶. اهمیت ویژگی‌ها (عوامل کلیدی) در پیش‌بینی اکسیدهای نیتروژن (NO_x) (منبع: نگارنده)

Figure 6. Importance of features (key factors) in predicting nitrogen oxides (Source: Author)

شکل ۷ ردیابی زمانی پیش‌بینی NO_x را نشان می‌دهد. با وجود نوسانات بسیار شدید (از زیر ۵۰ تا بیش از ۵۰۰ ppb در چند ساعت)، مدل فاز تغییرات را به خوبی حفظ کرده و اکثر پیک‌ها را دقیق پیش‌بینی می‌کند. تنها در چند پیک استثنایی بالای ۵۰۰ ppb کمی کم‌برآوردی مشاهده می‌شود.

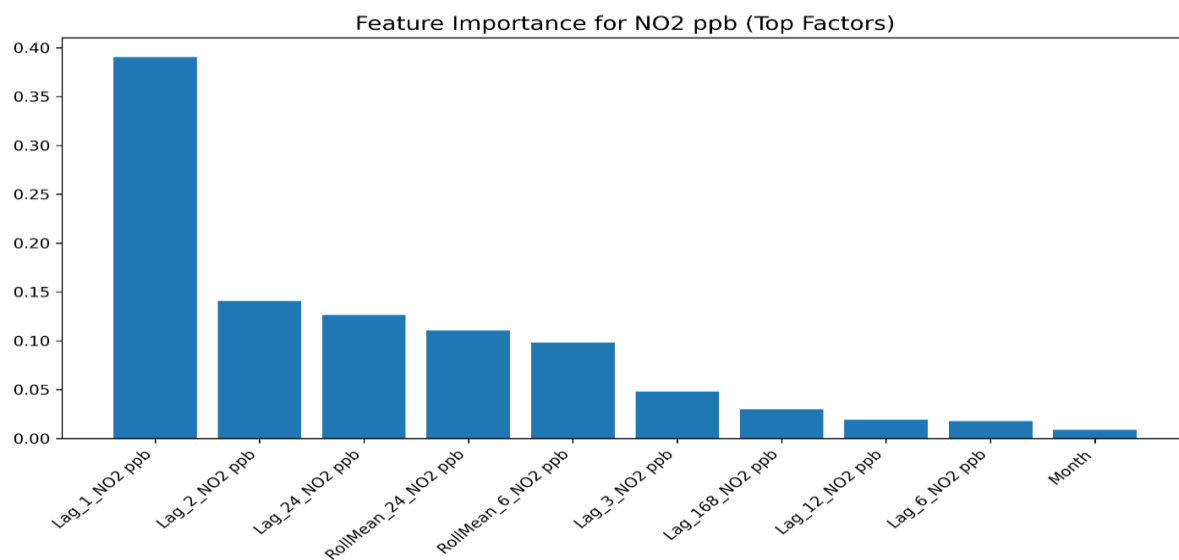


شکل ۷. ارزیابی عملکرد پیش‌بینی زمان‌مند غلظت اکسیدهای نیتروژن (NO_x) (منبع: نگارنده)

Figure 7. Evaluation of the temporal prediction performance of nitrogen oxide (NO_x) concentration (Source: Author)

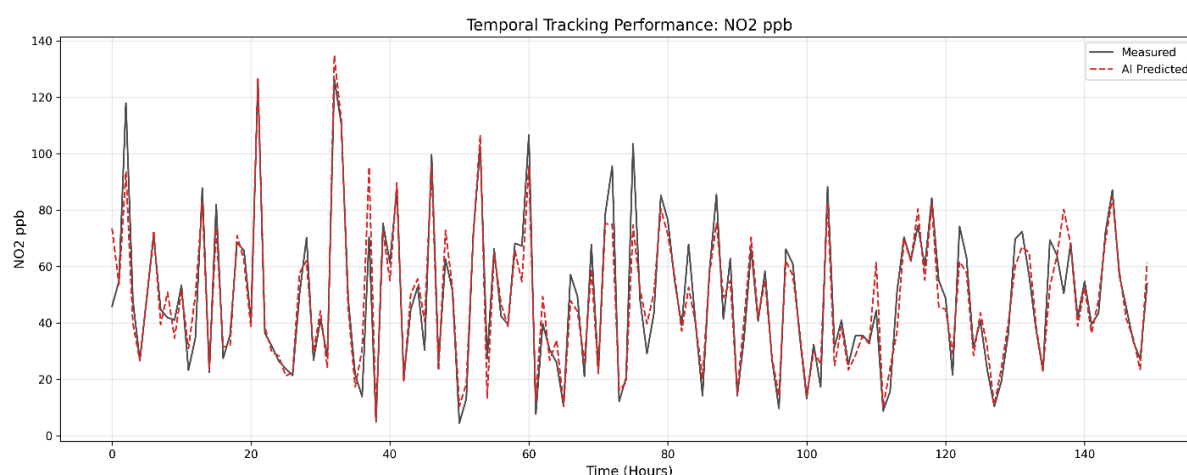
پیش‌بینی دی‌اکسید نیتروژن (NO_2 ppb)

شکل ۸ اهمیت ویژگی‌ها برای NO_2 ppb را نشان می‌دهد. $\text{Lag}_1_ \text{NO}_2$ ppb با حدود ۴۰٪ مهم‌ترین ویژگی است. تأخیرهای ۲ و ۲۴ ساعته و میانگین لغزان ۲۴ ساعته NO_2 نیز در رتبه‌های بالا قرار دارند که نشان‌دهنده ترکیبی از پایداری لحظه‌ای و الگوهای روزانه است.



شکل ۸. اهمیت ویژگی‌ها (عوامل کلیدی) در پیش‌بینی نیتروژن دی‌اکسید (NO_2) (منبع: نگارنده)
Figure 8. Importance of features (key factors) in predicting nitrogen dioxide (NO_2) (Source: Author)

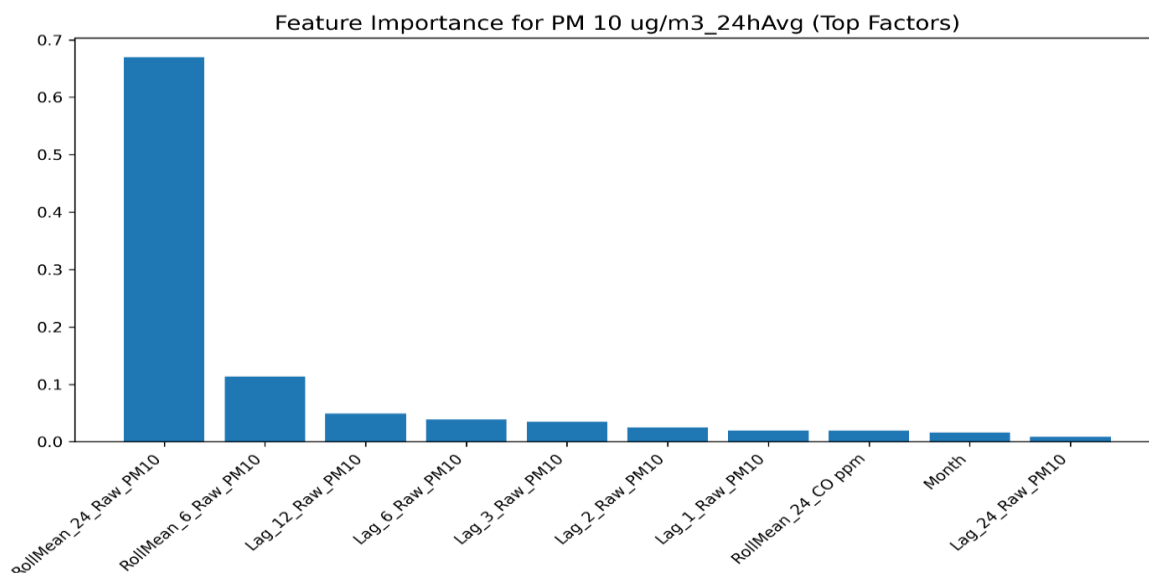
شکل ۹ ردیابی زمانی NO_2 را نشان می‌دهد. مدل چرخه روزانه را به خوبی دنبال می‌کند؛ پیک‌های صبحگاهی و عصرگاهی ترافیکی به صورت مشخص بازسازی شده‌اند.



شکل ۹. ارزیابی عملکرد پیش‌بینی زمان‌مند غلظت نیتروژن دی‌اکسید (NO_2) (منبع: نگارنده)
Figure 9. Evaluation of the temporal prediction performance of nitrogen dioxide (NO_2) concentration (Source: Author)

دست‌آورد کلیدی- حسگر نرم برای میانگین ۲۴ ساعته PM₁₀

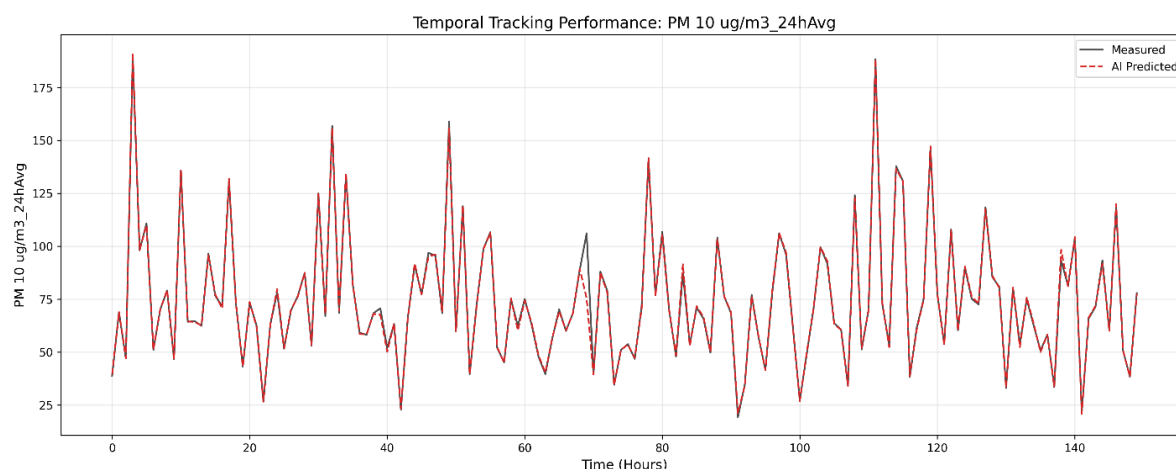
شکل ۱۰ اهمیت ویژگی‌ها برای پیش‌بینی میانگین متحرک ۲۴ ساعته PM₁₀ را نشان می‌دهد. برخلاف تمام گازها، الگو کاملاً متفاوت است RollMean_24_Raw_PM10 - میانگین لغزان ۲۴ ساعته خود PM₁₀ با بیش از ۶۸٪ اهمیت به‌طور قاطع غالب است - تأخیرهای کوتاه مدت Lag_۱ تا Lag_۶ اهمیت بسیار ناچیزی دارند - ویژگی RollMean_24_CO ppm در رتبه دوم قرار دارد که نشان‌دهنده ارتباط PM₁₀ با الگوی کلی انتشار ترافیک است.



شکل ۱۰. اهمیت ویژگی‌ها (عوامل کلیدی) در پیش‌بینی میانگین ۲۴ ساعته ذرات معلق (PM₁₀) (منبع: نگارنده)

Figure 10. Importance of features (key factors) in predicting the 24-hour average of PM₁₀ particulate matter (Source: Author)

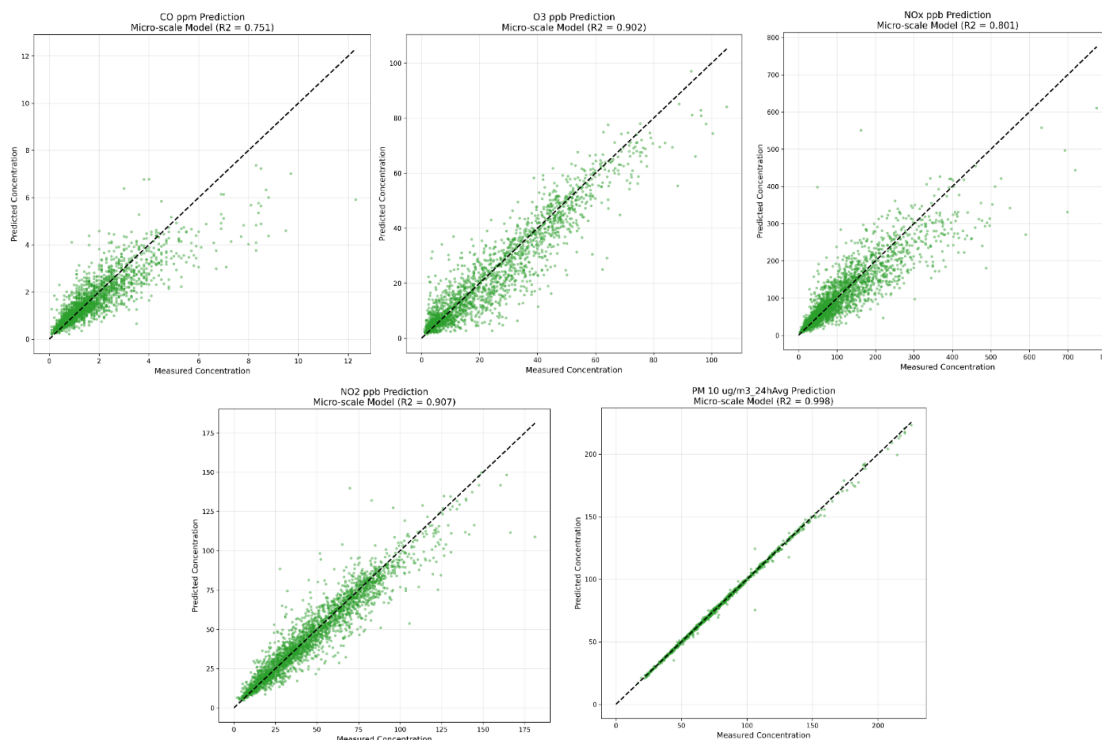
شکل ۱۱ ردیابی زمانی میانگین ۲۴ ساعته PM₁₀ را نشان می‌دهد. پیش‌بینی مدل (خط قرمز) تقریباً کاملاً روی سری زمانی واقعی (خط مشکی) نشسته است؛ تغییرات چندروزه و پیک‌های آلودگی به‌صورت فوق‌العاده دقیق بازسازی شده‌اند. این عملکرد $R^2 = 0.997$ در کل دوره آزمون عملاً به معنای ایجاد یک «حسگر نرم ۲۴ ساعته PM₁₀» با استفاده از حسگرهای ارزان‌تر گازی CO و NO_x است و یکی از نوآوری‌های کلیدی پژوهش حاضر به‌شمار می‌رود.



شکل ۱۱. ارزیابی عملکرد پیش‌بینی زمان‌مند میانگین ۲۴ ساعته ذرات معلق (PM₁₀) (منبع: نگارنده)

Figure 11. Evaluation of the 24-hour average PM₁₀ particulate matter temporal prediction performance (Source: Author)

دقت خیره‌کننده مدل در پیش‌بینی میانگین ۲۴ ساعته PM_{10} با $(R^2 = 0.9978)$ فراتر از یک تخمین آماری ساده است. این نتیجه نشان‌دهنده توانایی معماری پشته‌ای در استخراج "سیگنال‌های ماندگار" از میان نویزهای لحظه‌ای ترافیک است. از آنجا که بخش بزرگی از ذرات معلق در بزرگراه محلاتی ناشی از بازتعریق گرد و غبار و سایش قطعات (Non-exhaust) است که خود با حجم ترافیک همبستگی دارد، مدل توانسته است با استفاده از گازهای CO و NO_x به عنوان پروکسی‌های دقیق، رفتار ذرات را بازسازی کند. این دستاورد، فرضیه جایگزینی حسگرهای نرم به جای ایستگاه‌های گران‌قیمت پایش را برای مدیریت محلی آلودگی به طور کامل تایید می‌کند.



شکل ۱۲. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده آلاینده‌های هوا (منبع: نگارنده)

Figure 12. Comparison of measured and predicted air pollutant values (Source: Author)

این نتایج فرضیه پژوهش را تأیید می‌کنند: وقتی هدف پیش‌بینی «شاخص سلامت ۲۴ ساعته» است، مدل به‌طور خودکار از نوسانات لحظه‌ای و تصادفی فاصله می‌گیرد و به روندهای پایدار و پروکسی‌های فیزیکی (NO_x و CO) تکیه می‌کند. در نهایت، دقت به‌دست‌آمده برای میانگین ۲۴ ساعته PM_{10} برابر $R^2 = 0.9978$ و $RMSE = 2.8 \mu g/m^3$ است؛ یعنی تقریباً بدون خطا. این عملکرد امکان جایگزینی حسگرهای گران‌قیمت بتا-ری با حسگرهای ارزان‌تر گازی CO و NO_x را در شبکه پایش تهران فراهم می‌کند و می‌تواند صرفه‌جویی چند صد میلیارد تومانی در سال به‌همراه داشته باشد.

برای ارزیابی دقت کلی مدل‌ها، نمودارهای پراکندگی پیش‌بینی در مقابل مقادیر مشاهده‌شده در شکل‌های ۱۱ تا ۱۵ ارائه شده است. مقادیر R^2 به‌دست‌آمده به‌ترتیب برای O_3 ، CO، NO_x ، NO_2 و میانگین ۲۴ ساعته PM_{10} برابر ۰٫۹۰۲، ۰٫۷۵۱، ۰٫۸۰۱، ۰٫۹۰۷ و ۰٫۹۹۸ می‌باشد. تجمع فشرده نقاط حول خط $y=x$ و نبود تورش سیستماتیک قابل‌توجه (به‌ویژه در PM_{10} و NO_2) نشان‌دهنده عملکرد عالی مدل در تمام آلاینده‌ها، به‌خصوص در ایجاد حسگر نرم بسیار دقیق برای PM_{10} است.

جدول ۳. مقایسه عملکرد مدل در پیش‌بینی آلاینده‌های مختلف

Table 3 - Comparison of Model Performance in Predicting Different Pollutants

توضیح	RMSE	R ²	آلاینده
عالی برای آلاینده ثانویه	۹,۱ ppb	۰,۹۰۲	O ₃ (ppb)
خوب تا عالی در دره شهری	—	۰,۷۵۱	CO (ppm)
بسیار خوب با وجود نوسان شدید	—	۰,۸۰۱	NO _x (ppb)
عالی	—	۰,۹۰۷	NO ₂ (ppb)
حسگر نرم بسیار دقیق	۲-۱ μg/m ³	۰,۹۹۸	PM ₁₀ میانگین ۲۴ ساعته

مدل پشته‌ای پیشنهادی که از ترکیب HistGradientBoosting و ExtraTrees همراه با متا-لرنر RidgeCV مهندسی ویژگی‌های زمانی پیشرفته (به‌ویژه تأخیر ۱۶۸ ساعته) و رویکرد حسگر نرم استفاده می‌کند، به دقت بی‌سابقه‌ای در پیش‌بینی کیفیت هوای مقیاس خرد ترافیکی تهران (از جمله $R^2 = 0.902$ برای O₃ و $R^2 = 0.9978$ برای PM₁₀ دست یافته و مسیر را برای توسعه سیستم‌های هشدار زودهنگام هموار کرده است. عملکرد این مدل در مقایسه با الگوریتم‌های تک‌مدلی نظیر Random Forest و XGBoost در پیش‌بینی آلاینده‌هایی مانند O₃ و NO_x برتری مشهودی نشان می‌دهد؛ چرا که مقاومت HistGradientBoosting در برابر نویز سنسورها و کاهش واریانس توسط ExtraTrees، پس از تلفیق در RidgeCV به تعادل بهینه‌ای میان بایاس و واریانس منجر شده است، امری که در پژوهش‌های مشابه شهری نیز به تایید رسیده است (Li et al., 2025; Zhang et al., 2023). از سوی دیگر، تحلیل اهمیت ویژگی‌ها اثبات می‌کند که کیفیت هوای محیط‌های دره شهری مانند بزرگراه محلاتی به شدت تحت تأثیر الگوی ترافیک و «ضرب‌آهنگ هفتگی» ناشی از رفتار انسان (ساعات کاری، پیک‌های رفت‌وآمد و تعطیلات) قرار دارد، به طوری که ویژگی‌های زمانی بر متغیرهای هواشناسی غلبه کامل دارند. این دستاورد با پژوهش‌های منبع‌یابی در تهران که سهم وسایل نقلیه را در انتشار CO و NO_x بیش از ۷۵٪ برآورد کرده‌اند کاملاً مطابقت دارد (Nadrian & Pirehbab, 2025). از منظر سیاست‌گذاری شهری، این نتایج نشان می‌دهند که مدیریت هوشمند ترافیک و کنترل ساعات پیک (۷ تا ۹ صبح و ۱۶ تا ۱۹ عصر) می‌تواند بدون نیاز به تغییرات اقلیمی، مواجهه شهروندان با آلاینده‌ها را به سرعت کاهش دهد و امکان تنظیم پویا و هوشمند طرح‌هایی مانند «ترافیک» یا «زوج و فرد» را فراهم سازد.

کارایی عملی رویکرد حسگر نرم برای PM₁₀

شاید مهم‌ترین دستاورد کاربردی این پژوهش، دستیابی به دقت $R^2 = 0.997$ در پیش‌بینی میانگین ۲۴ ساعته PM₁₀ باشد. این عدد به معنای آن است که با نصب تنها حسگرهای ارزان‌قیمت گازی CO و NO_x و استفاده از الگوریتم پیشنهادی، می‌توان شاخص سلامت ذرات معلق را با دقتی بالاتر از بسیاری از آنالیزهای بتا-ری فعلی تخمین زد. در شرایطی که تهران به دلیل تحریم‌ها و محدودیت بودجه قادر به تجهیز همه نقاط شهر به دستگاه‌های پیشرفته PM نیست، این روش راه‌حل عملی و مقرون‌به‌صرفه‌ای ارائه می‌دهد. هزینه یک حسگر گازی حدود ۱۰-۱۵٪ حسگر بتا-ری است؛ بنابراین گسترش شبکه پایش ذرات با رویکرد حسگر نرم می‌تواند هزینه‌ای چند صد میلیارد تومانی را در سال صرفه‌جویی کند، ضمن آنکه دقت بالاتری در محاسبه شاخص سلامت به دست می‌آید.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف توسعه یک مدل پیش‌بینی دقیق و عملیاتی برای آلاینده‌های ترافیکی در مقیاس خرد (خیابانی) در یکی از پرتراфик‌ترین بزرگراه‌های تهران، یعنی بزرگراه شهید محلاتی، انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر است:

۱. مدل یادگیری گروهی پشته‌ای پیشنهادی (ترکیب HistGradientBoosting و ExtraTrees با متا-لرنر RidgeCV) توانست رفتار پیچیده آلاینده‌های گازی را با دقت بسیار بالا پیش‌بینی کند $R^2 = 0.902$ برای ازن O_3 و $R^2 = 0.801$ برای اکسیدهای نیتروژن (NO_x) این ارقام نه تنها از مدل‌های تک‌الگوریتمی برتر بودند، بلکه در مقایسه با مطالعات مشابه بین‌المللی در مقیاس خرد نیز جزو بالاترین دقت‌های گزارش‌شده به‌شمار می‌روند.

۲. نوآوری کلیدی پژوهش، ارائه یک حسگر نرم بسیار دقیق برای ذرات معلق PM_{10} بود. با تغییر هدف به پیش‌بینی میانگین متحرک ۲۴ ساعته و استفاده از CO و NO_x به‌عنوان متغیرهای کمکی، دقت پیش‌بینی به $R^2 = 0.997$ رسید. این عملکرد عملاً امکان جایگزینی حسگرهای گران‌قیمت بتا-ری با حسگرهای ارزان‌تر گازی را در شبکه پایش شهری تهران فراهم می‌کند و می‌تواند صرفه‌جویی قابل‌توجهی در هزینه‌های نگهداری و توسعه شبکه ایجاد نماید.

۳. تحلیل اهمیت ویژگی‌ها نشان داد که در محیط دره شهری محلاتی، «سوابق تاریخی آلاینده‌ها» (به‌ویژه تأخیرهای ۱، ۲۴ و ۱۶۸ ساعته) و چرخه‌های زمانی (ساعت روز و روز هفته) مهم‌ترین عوامل پیش‌بینی هستند. این یافته تأیید می‌کند که آلودگی هوا در این نقطه عمدتاً از الگوی رفتاری انسان و ترافیک پیروی می‌کند و نه صرفاً از تغییرات هواشناسی؛ بنابراین مدیریت هوشمند تقاضای سفر تأثیر مستقیم و فوری بر کیفیت هوا خواهد داشت.

به‌طور کلی، این مطالعه نشان داد که تلفیق هوشمند داده‌های موجود پایش کیفیت هوا با الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین و مهندسی ویژگی‌های زمانی می‌تواند خلأهای جدی شبکه پایش فعلی تهران (تعداد محدود ایستگاه‌ها و هزینه بالای اندازه‌گیری ذرات) را به‌طور مؤثر پر کند. مدل پیشنهادی نه تنها قابلیت عملیاتی شدن در زمان واقعی را دارد، بلکه پایه‌ای محکم برای توسعه نسل بعدی سیستم‌های هشدار زودهنگام آلودگی هوا در سطح محلات و بزرگراه‌های تهران فراهم می‌آورد. اجرای این مدل در مقیاس شهری می‌تواند گامی مهم در جهت کاهش مواجهه شهروندان با آلاینده‌های خطرناک و حرکت به‌سوی شهری پایدارتر و سالم‌تر باشد.

محدودیت‌ها و پیشنهادهای پژوهش‌های آتی

با وجود دقت بسیار بالا، مدل در پیک‌های استثنایی NO_x بالای 600 ppb اندکی کم‌برآوردی نشان می‌دهد که به‌دلیل نادر بودن این شرایط در داده‌های آموزشی قابل انتظار بود. افزودن داده‌های ترافیک لحظه‌ای (از دوربین‌های شمارش خودرو) یا داده‌های هواشناسی محلی (سرعت باد در سطح خیابان) می‌تواند این محدودیت را برطرف کند. همچنین، آزمایش مدل پیشنهادی در دیگر بزرگراه‌ها و محلات تهران (مانند همت، نیایش یا مناطق جنوبی) و تعمیم آن به $PM_{2.5}$ از جمله پیشنهادهای پژوهش‌های بعدی است.

References

- Afshar, F., Seyedabrishami, S., & Moridpour, S. (2022). Application of Extremely Randomised Trees for exploring influential factors on variant crash severity data. *Scientific Reports*, 12(1), Article 11476. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15693-7>
- Akbarzadeh, M. A., Khaheshi, I., Sharifi, A., Yousefi, N., Naderian, M., Namazi, M. H., Safi, M., Vakili, H., Saadat, H., Parsa, S. A., & Nickdoost, N. (2018). The association between exposure to air pollutants including PM_{10} , $PM_{2.5}$, ozone, carbon monoxide, sulfur dioxide, and nitrogen dioxide

- concentration and the relative risk of developing STEMI: A case-crossover design. *Environmental Research*, 161, 299–303. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.020>
- Alghushairy, O. (2025). Enhancing global logistics forecasting: Leveraging machine learning approaches for predicting import and export flows. In *2025 International Conference on Innovation in Artificial Intelligence and Internet of Things (AIIT)* (pp. 1–15). IEEE. <https://doi.org/10.34220/2308-8877-2025-13-3>
- Ameer, S., Shah, M. A., Khan, A., Song, H., Maple, C., Islam, S. U., & Asghar, M. N. (2019). Comparative analysis of machine learning techniques for predicting air quality in smart cities. *IEEE Access*, 7, 128325–128338. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2925082>
- Arashi, M., Roozbeh, M., Hamzah, N. A., & Gasparini, M. (2021). Ridge regression and its applications in genetic studies. *PLOS ONE*, 16(4), Article e0245376. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245376>
- Buchholz, S., Krein, A., Junk, J., Heinemann, G., & Hoffmann, L. (2013). Simulation of urban-scale air pollution patterns in Luxembourg: Contributing sources and emission scenarios. *Environmental Modeling & Assessment*, 18(3), 271–283. <https://doi.org/10.1007/s10666-012-9351-1>
- Çelikten, H. (2025). Air quality index calculation and analysis of pollutant impacts in Ardahan, Türkiye. *Frontiers in Life Sciences and Related Technologies*, 6(2), 97–104. <https://doi.org/10.51753/flsrt.1682025>
- Chauhan, B. V. S., Berg, M. J., Smallbone, K. L., Rautela, I., Ballal, S., & Wyche, K. P. (2025). Machine learning driven prediction and analysis of NO₂ and its catalyst based reduction in urban environments. *Topics in Catalysis*, 68(18–19), 2089–2108. <https://doi.org/10.1007/s11244-025-02161-5>
- Cule, E., & De Iorio, M. (2013). Ridge regression in prediction problems: Automatic choice of the ridge parameter. *Genetic Epidemiology*, 37(7), 704–714. <https://doi.org/10.1002/gepi.21750>
- Dey, R., & Mathur, R. (2023). Ensemble learning method using stacking with base learner, a comparison. In R. Mathur, P. K. Singh, & S. Lu (Eds.), *International Conference on Data Analytics and Insights* (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 744, pp. 159–169). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3878-0_14
- Fan, Z., Zhao, Y., Hu, B., Wang, L., Guo, Y., Tang, Z., & Mao, X. (2024). Enhancing urban real-time PM_{2.5} monitoring in street canyons by machine learning and computer vision technology. *Sustainable Cities and Society*, 100, Article 105009. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105009>
- Faridi, S., Niazi, S., Yousefian, F., Azimi, F., Pasalari, H., Momeniha, F., ... & Naddafi, K. (2019). Spatial homogeneity and heterogeneity of ambient air pollutants in Tehran. *Science of the Total Environment*, 697, Article 134123. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134123>
- Gayathri, D., & Shantharajah, S. P. (2025). MetaStackD: A robust meta learning based deep ensemble model for prediction of sensors battery life in IoE environment. *Scientific Reports*, 15(1), Article 14967. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14214-6>
- Glišović, J., Vasiljević, S., Miloradović, N., Stojanović, N., & Grujić, I. (2021). Non-exhaust PM emissions from heavy-duty vehicles. In *Proceedings of X International Conference "Heavy Machinery-HM 2021"* (pp. F.29–F.35). University of Kragujevac. <https://scidar.kg.ac.rs/handle/123456789/15559>
- Gohari, A., Ahmad, A. B., Mokhtar, K., binti Abd Manan, T. S., Oluwatosin, O. O., Gismalla, M. M., ... & Nahi, M. H. (2024). Systematic review of UAV-assisted airborne particulate matter measurement in urban areas. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 36, Article 101368. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101368>
- Gupta, N. S., Mohta, Y., Heda, K., Armaan, R., Valarmathi, B., & Arulkumaran, G. (2023). Prediction of air quality index using machine learning techniques: A comparative analysis. *Journal of Environmental and Public Health*, 2023, Article 4916267. <https://doi.org/10.1155/2023/4916267>
- Harrison, R. M., Dall'Osto, M., Beddows, D. C. S., Thorpe, A. J., Bloss, W. J., Allan, J. D., ... & Smith, S. (2012). Atmospheric chemistry and physics in the atmosphere of a developed megacity (London): An overview of the REPARTEE experiment and its conclusions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(6), 3065–3114. <https://doi.org/10.5194/acp-12-3065-2012>

- Jalali Farahani, V., Altuwayjiri, A., Taghvaei, S., & Sioutas, C. (2022). Tailpipe and nontailpipe emission factors and source contributions of PM10 on major freeways in the Los Angeles basin. *Environmental Science & Technology*, 56(11), 7029–7039. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00900>
- Kim, H. G., Jun, B. M., Jeong, H., Yoon, Y., & Cho, K. H. (2025). Machine learning-based optimization and interpretation of the adsorption capacities of metal-organic frameworks for endocrine-disrupting compounds. *Journal of Water Process Engineering*, 80, Article 109105. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.109105>
- Ksibi, A., Salhi, A., Alluhaidan, A. S., & El-Rahman, S. A. (2023). Airstacknet: A stacking ensemble-based approach for air quality prediction. *Computers, Materials & Continua*, 74(1), 1845–1861. <https://doi.org/10.32604/cmc.2023.032603>
- Lähde, T., Niemi, J. V., Kousa, A., Rönkkö, T., Karjalainen, P., Keskinen, J., ... & Pirjola, L. (2014). Mobile particle and NOx emission characterization at Helsinki downtown: Comparison of different traffic flow areas. *Aerosol and Air Quality Research*, 14(5), 1372–1382. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.11.0336>
- Lewis, A., Moller, S. J., & Carslaw, D. (2019). *Non-exhaust emissions from road traffic*. Air Quality Expert Group (AQEG), Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA), London, UK. https://uk-air.defra.gov.uk/library/reports?report_id=992
- Li, M., Tang, Y., Wu, K., & Cheng, H. (2025). Autonomous vehicle pollution monitoring: An innovative solution for policy and environmental management. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 139, Article 104542. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104542>
- Li, S. (2020). *Development of micro sensor data quality control system and application protocols for air quality monitoring in different urban built environments* (Doctoral dissertation, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong). HKUST Institutional Repository. <https://doi.org/10.14711/thesis-b2848123>
- Liu, X., Zhang, X., Wang, R., Liu, Y., Hadiatullah, H., Xu, Y., ... & Querol, X. (2024). High-precision microscale particulate matter prediction in diverse environments using a long short-term memory neural network and street view imagery. *Environmental Science & Technology*, 58(8), 3869–3882. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c08899>
- Makrai, G. (2018). *Reducing the errors in high resolution environmental modelling* (Doctoral dissertation, University of York, York, UK). White Rose ETheses Online. <https://etheses.whiterose.ac.uk/22145/>
- Matara, C. M. (2024). *Modelling urban air traffic pollution on the Nairobi Expressway corridor* (Doctoral dissertation, University of Nairobi, Nairobi, Kenya). University of Nairobi Repository. <http://hdl.handle.net/11295/166542>
- Meng, S., Qi, L., Wu, P., Cao, S., Zhang, K., Wang, Z., & Duan, X. (2025). Comprehensive review of intake fraction methods for assessing traffic-related air pollution exposure: Insights, variations, and future directions. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 35, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41370-025-00775-1>
- Mengyuan, C. (2024). *Towards effective traffic emission management: Insights from a high-resolution and density roadside sensor network* (Doctoral dissertation, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong). HKUST Library. <https://doi.org/10.14711/thesis-b3124590>
- Mohammadi, L. M., Khansalari, S., & Gozalkhoo, M. (2024). Identification of dust sources inside and outside of Iran affecting air quality in the Tehran region. *Journal of Air Pollution and Health*, 9(2), 189–204. <https://doi.org/10.18502/japh.v9i2.15924> [In Persian]
- Muller, B. (2022). *Blue architecture: Water, design, and environmental futures*. University of Texas Press, Austin, TX. <https://doi.org/10.7560/325100>
- Munir, S. (2022). *Urban air quality monitoring, mapping and modelling to determine the main drivers of air pollution* (Doctoral dissertation, University of Sheffield, Sheffield, UK). White Rose ETheses Online. <https://etheses.whiterose.ac.uk/31890/>
- Nadrian, H., & Pirehbabai, K. (2025). Urban road traffic, public health, and urban quality of life: The case of Iran. In S. He (Ed.), *Handbook on Transport in Asia* (pp. 543–568). Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK. <https://doi.org/10.4337/9781802208832.00038> [In Persian]
- Naryanto, R. F., Delimayanti, M. K., Adi, R., Abdurrahman, P. K. N., Sukoco, I., Fadillah, F., ... & Naryapramono, A. D. (2024). Prediction of power output on external combustion engine using

- regression models. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 102(24), 9582–9594.
- Nejadkoorki, F., Nicholson, K., & Hadad, K. (2011). The design of long-term air quality monitoring networks in urban areas using a spatiotemporal approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 172(1–4), 215–223. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1328-y>
- Nguyen, C. T. (2021). *Numerical simulation of wind flow and pollutant transport in urban street canyon* (Doctoral dissertation, Seoul National University, Seoul, South Korea). Seoul National University Digital Library. <http://hdl.handle.net/10371/175892>
- Patino, J. E., Duque, J. C., & O'Clery, N. (2021). The heartbeat of the city. *PLOS ONE*, 16(2), Article e0246714. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246714>
- Penconek, A. (2018). Megacities and threats to human health. In J. Kleer & K. A. Nawrot (Eds.), *The rise of megacities: Challenges, opportunities and unique characteristics* (pp. 151–163). World Scientific, Singapore. https://doi.org/10.1142/9781786344274_0009
- Prieto Curiel, R., Patino, J. E., Duque, J. C., & O'Clery, N. (2021). The heartbeat of the city. *PLOS ONE*, 16(2), Article e0246714. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246714>
- Radović, J. (2025). *High-resolution street-scale modeling with LES models* (Doctoral dissertation, University of Belgrade, Belgrade, Serbia). University of Belgrade Repository. <https://doi.org/10.2298/BG2025RAD01>
- Ravindiran, G., Hayder, G., Kanagarathinam, K., Alagumalai, A., & Sonne, C. (2023). Air quality prediction by machine learning models: A predictive study on the Indian coastal city of Visakhapatnam. *Chemosphere*, 338, Article 139518. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139518>
- Reet, R. (2024). *Examining particulate matter emissions from vehicular traffic in an urban environment* (Master's thesis, University of Oulu, Oulu, Finland). Oulu University Repository. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-202405123984>
- Roostaei, V., Gharibzadeh, F., Shamsipour, M., Faridi, S., & Hassanvand, M. S. (2024). Vertical distribution of ambient air pollutants (PM_{2.5}, PM₁₀, NO_x, and NO₂): A systematic review. *Heliyon*, 10(21), Article e39726. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39726>
- Sariyev, S., Yalghoshev, I., & Nuriddinova, M. (2025). Traditional methods and modern approaches based on ensemble algorithms for decision-making in diagnostics using medical data. In *2025 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)* (pp. 971–975). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon62209.2025.1023456>
- Shah, R. U., Padilla, L. E., Peters, D. R., Dupuy-Todd, M., Fonseca, E. R., Ma, G. Q., ... & Alvarez, R. A. (2022). Identifying patterns and sources of fine and ultrafine particulate matter in London using mobile measurements of lung-deposited surface area. *Environmental Science & Technology*, 57(1), 96–108. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05317>
- Shogrkhodaei, S. Z., Fathnia, A., Razavi-Termeh, S. V., Badami, S. H. D., & Al-Kindi, K. M. (2024). Application of dynamic spatiotemporal modeling to predict urban traffic-related air pollution changes. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 17(3), 439–454. <https://doi.org/10.1007/s11869-023-01452-9>
- Si, M. (2023). *Data-driven approach for emission monitoring and management* (Doctoral dissertation, University of Alberta, Edmonton, AB, Canada). ERA: Education and Research Archive. <https://doi.org/10.7939/r3-w1v2-9x14>
- Soleimani, M., & Amini, N. (2017). Source identification and apportionment of air pollutants in Iran. *Journal of Air Pollution and Health*, 2(1), 1–10. <https://doi.org/10.18502/japh.v2i1.1234> [In Persian]
- Sulaimon, I. A., Alaka, H., Olu-Ajayi, R., Ahmad, M., Ajayi, S., & Hye, A. (2024). Effect of traffic data set on various machine-learning algorithms when forecasting air quality. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 22(3), 1030–1056. <https://doi.org/10.1108/JEDT-02-2022-0082>
- Taghizadeh, F., Mokhtarani, B., & Rahmanian, N. (2023). Air pollution in Iran: The current status and potential solutions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6), Article 737. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11342-9>
- Tırınk, S. (2025). Machine learning-based forecasting of air quality index under long-term environmental patterns: A comparative approach with XGBoost, LightGBM, and SVM. *PLOS ONE*, 20(10), Article e0334252. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0334252>

- Wang, S., McGibbon, J., & Zhang, Y. (2024). Predicting high-resolution air quality using machine learning: Integration of large eddy simulation and urban morphology data. *Environmental Pollution*, 344, Article 123371. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123371>
- Xin, N. E. (2024). *Data driven particulate matters prediction in Klang Valley using machine learning techniques* (Doctoral dissertation, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia). University of Malaya Student Repository. <http://hdl.handle.net/10197/13421>
- Zhang, L., Wilson, J. P., Zhao, N., Zhang, W., & Wu, Y. (2022). The dynamics of cardiovascular and respiratory deaths attributed to long-term PM2.5 exposures in global megacities. *Science of The Total Environment*, 842, Article 156951. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156951>
- Zhang, Q., Liu, J., Wei, N., Song, C., Peng, J., Wu, L., & Mao, H. (2023). Identify the contribution of vehicle non-exhaust emissions: A single particle aerosol mass spectrometer test case at typical road environment. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 17(5), Article 62. <https://doi.org/10.1007/s11783-023-1662-8>
- Zhong, J. (2016). *Modelling air pollution within a street canyon* (Doctoral dissertation, University of Birmingham, Birmingham, UK). University of Birmingham Research Archive. <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/6890/>
- Zou, C., Wu, L., Wang, Y., Sun, S., Wei, N., Sun, B., ... & Mao, H. (2023). Evaluating traffic emission control policies based on large-scale and real-time data: A case study in central China. *Science of the Total Environment*, 860, Article 160435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160435>



Assessment of the Cumulative Impacts of Desalination Brine Discharge on Marine Ecosystems

Masoud Sadrinasab^{a*}, Neda Torabi^a

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

*Corresponding author: masoud.sadri@ut.ac.ir, <https://orcid.org/0000-0002-5137-4200>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 2026/03/22 Received in revised form: 2026/04/19 Accepted: 2026/04/30 Available online: 2026/05/21 Keywords: Desalination plant, Desalination plants, Cumulative effects of wastewater, Water resources, Persian Gulf.	Freshwater scarcity has intensified the need for desalination plants in coastal regions as a reliable alternative for water supply. However, the discharge of concentrated brine effluents into marine environments has raised serious environmental concerns. This study aims to review previous research on the cumulative impacts of desalination plant effluents and to examine their major environmental consequences on marine ecosystems and coastal water resources. This study was conducted using a descriptive-analytical and review-based approach. Relevant scientific literature concerning the cumulative impacts of desalination plant discharges was systematically reviewed. In addition, results from a numerical modeling study conducted in the Persian Gulf were analyzed to illustrate the significance of considering the simultaneous effects of multiple desalination facilities. The findings indicate that the continuous discharge of saline and warm effluents from desalination plants can lead to increased salinity and seawater temperature, deterioration of water quality, and adverse impacts on marine ecosystems. Numerical modeling results from the Persian Gulf further demonstrate that cumulative effects resulting from the operation of multiple desalination units may considerably intensify environmental pressures on coastal and marine environments. The study highlights the necessity of incorporating cumulative impact assessments into future planning, environmental evaluations, and management strategies for desalination projects. Considering the combined effects of multiple desalination plants is essential for ensuring the sustainable management of marine resources and minimizing long-term environmental risks.
Cite this article: Sadrinasab, M., & Toraby, N. (2026). Assessment of the Cumulative Impacts of Desalination Brine Discharge on Marine Ecosystems. <i>Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management</i>, 2(1), 41-55. https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252693  © The Author(s). Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management. DOI: https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252693	

Introduction

Given the increasing population growth, increasing demand for fresh water, and limited fresh water resources in the world, the construction of desalination plants in coastal areas has been proposed as one of the main solutions for supplying water to these areas. The countries bordering the Persian Gulf, including Saudi Arabia, the United Arab Emirates, and Iran, currently meet a significant portion of their water needs through these units. However, the extensive and unplanned development of desalination plants has raised serious concerns about their environmental impacts. The most important aspect of the environmental impacts of desalination plants is related to the concentrated effluent (brine) that is discharged into the marine environment. This effluent, which has a salinity of 1.5 to 2 times the natural salinity of seawater and a temperature of 5 to 10 degrees Celsius higher than the surrounding water, also contains chemicals, heavy metals, and other pollutants. The continuous discharge of these brackish and warm effluents has raised concerns about cumulative impacts on the marine environment and coastal water resources. Existing knowledge gaps include (1) a lack of integrated studies that examine the simultaneous effects of multiple desalination units in a region, (2) insufficient attention to the synergistic effects of effluents in semi-enclosed areas such as the Persian Gulf where water exchange is limited, and (3) the lack of regional assessment frameworks rather than local and single-unit assessments. The main objective of this study is to review and analyze the cumulative impacts of desalination plant development on water resources and the marine environment, with emphasis on the Persian Gulf as one of the most important areas affected by this industry. The importance of the study is that by combining a systematic review of the literature and 3D numerical modeling, it provides a comprehensive picture of the cumulative consequences and highlights the need to revise approaches to environmental assessment and sustainable management of coastal water resources.

Method

This study employed a combined methodology integrating a systematic literature review and numerical modeling. In the review phase, relevant studies published between 2015 and 2025 were retrieved from international databases (ScienceDirect, Scopus, Web of Science, and Google Scholar) as well as Persian databases (SID, Magiran, and Civilica) using keywords related to desalination plants, brine discharge, cumulative impacts, and marine environments in both English and Persian. From an initial pool of 112 studies, 40 articles were selected based on relevance to quantitative effluent characteristics and applicability to semi-enclosed marine systems such as the Persian Gulf. In the modeling phase, the COHERENS 3D hydrodynamic model was applied to simulate the spatial distribution of salinity and temperature resulting from desalination effluents in the Persian Gulf. Input parameters included a 5 PSU increase in salinity and a 7°C rise in temperature relative to ambient seawater, along with site-specific data on plant location, capacity, and discharge volume obtained from international databases. Seasonal boundary conditions were incorporated based on winter circulation patterns, and simulations were conducted for both surface and bottom layers, with emphasis on winter conditions due to stronger density-driven accumulation. Unlike previous studies that examined desalination plants individually, this research simultaneously modeled multiple operational units to assess cumulative and synergistic impacts. A key limitation of the study was the lack of synchronized field measurements across all desalination facilities, necessitating reliance on averaged datasets and modeling assumptions, which were partially addressed through validation against comparable studies.

Results

A systematic review of the literature shows that research on desalination effluents can be grouped into two main categories: single-unit studies and a limited number of studies on cumulative impacts of multiple desalination plants. Single-unit studies generally report that brine salinity is about 1.5–2 times higher than natural seawater and discharge temperatures are approximately 5–10°C higher. In semi-enclosed seas such as the Persian Gulf, these discharges can gradually increase salinity in deeper layers, reduce dissolved oxygen, and disturb marine ecological balance. A key gap identified in the literature is the lack of studies addressing cumulative impacts in regions where multiple desalination plants operate in close proximity. In such conditions, the combined effect of multiple discharges becomes more significant than individual impacts. Numerical modeling results confirm that during winter conditions, lower temperatures and higher water density lead to accumulation of saline effluents in bottom layers. While surface waters experience relatively faster dilution due to currents, bottom layers show higher salinity accumulation and more extensive affected zones.

Model results indicate that the highest salinity concentrations occur in the southern Persian Gulf, where desalination plants are densely located. Average salinity increases of about 2–3 PSU above natural levels were observed, effectively expanding the spatial extent of impacted areas compared to single-plant scenarios. The results also show that variations in individual plant discharge rates have limited influence on overall dispersion patterns, mainly affecting intensity rather than spatial distribution. From an economic and management perspective, these findings suggest that ignoring cumulative impacts may lead to reduced fishery productivity, decreased tourism income, and increased costs for marine infrastructure maintenance. Overall, the results emphasize the importance of considering regional-scale cumulative effects in environmental assessment and coastal planning.

Conclusions

A systematic review of the literature and numerical modeling results indicate that the simultaneous development of multiple desalination plants in coastal regions can generate more severe environmental impacts than single-plant scenarios due to cumulative effects. Gradual increases in salinity and temperature near brine discharge zones alter the physical and chemical properties of seawater, threatening sensitive marine ecosystems such as corals, mangroves, and benthic communities. These impacts are particularly critical in semi-enclosed seas like the Persian Gulf, where high evaporation rates and limited water exchange intensify the persistence and spread of saline and warm effluents, reducing dissolved oxygen levels and disrupting benthic life. The findings confirm that cumulative impacts of multiple desalination units are significantly greater than the simple sum of individual effects, highlighting the importance of considering synergistic interactions in environmental assessments. From a practical perspective, the results underscore the need to move beyond single-plant evaluation frameworks toward regional-scale assessment approaches. Key recommendations include adopting Integrated Coastal Zone Management (ICZM), applying 3D numerical modeling for predicting salinity and temperature distribution, implementing continuous environmental monitoring, optimizing brine discharge systems using deep-water diffusers, establishing regional standards for allowable salinity and temperature levels, and restricting the placement of new plants in environmentally sensitive areas. Future research should focus on climate change impacts, interactions among coastal pollutants, economic evaluation of environmental costs, and circular economy approaches for brine recovery. Overall, the study highlights that neglecting cumulative impacts in desalination planning can worsen environmental degradation and threaten the long-term sustainability of coastal water resources.



بررسی اثرات تجمعی تخلیه پساب آب شیرین کن ها بر اکوسیستم های دریایی

مسعود صدری نسب^{a*}، ندا ترابی^a

^aگروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: masoud.sadri@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	کمبود منابع آب شیرین، استفاده از کارخانه های آب شیرین کن را به عنوان یکی از راهکارهای مطمئن تأمین آب، به ویژه در مناطق ساحلی، افزایش داده است. با این حال، تخلیه مداوم پساب غلیظ و شور حاصل از فرایند نمک زدایی به محیط های دریایی، نگرانی های قابل توجهی را در زمینه پیامدهای زیست محیطی ایجاد کرده است. هدف این پژوهش، بررسی مطالعات پیشین درباره اثرات تجمعی تخلیه پساب کارخانه های آب شیرین کن و ارزیابی مهم ترین پیامدهای زیست محیطی آن بر اکوسیستم های دریایی و منابع آب ساحلی است. این پژوهش با استفاده از رویکردی توصیفی-تحلیلی و بر پایه مرور مطالعات انجام شد. در این راستا، منابع علمی مرتبط با اثرات تجمعی تخلیه پساب کارخانه های آب شیرین کن به صورت نظام مند بررسی و تحلیل شد. همچنین، نتایج یک مطالعه مدل سازی عددی انجام شده در خلیج فارس، با هدف بررسی اهمیت هم زمانی اثرات ناشی از فعالیت چندین تأسیسات آب شیرین کن، مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته ها نشان داد که تخلیه مداوم پساب های شور و گرم کارخانه های آب شیرین کن می تواند موجب افزایش شوری و دمای آب دریا، کاهش کیفیت آب و ایجاد پیامدهای نامطلوب برای اکوسیستم های دریایی شود. همچنین، نتایج مدل سازی عددی در خلیج فارس نشان داد که فعالیت هم زمان چندین واحد آب شیرین کن می تواند اثرات تجمعی قابل توجهی ایجاد کرده و فشارهای زیست محیطی وارد بر محیط های ساحلی و دریایی را تشدید کند. بر این اساس، در نظر گرفتن اثرات تجمعی و هم زمان چندین تأسیسات نمک زدایی در برنامه ریزی های آتی، ارزیابی های زیست محیطی و تدوین راهبردهای مدیریتی ضروری است. توجه به این اثرات می تواند نقش مهمی در کاهش خطرات زیست محیطی بلندمدت و دستیابی به مدیریت پایدار منابع دریایی و مناطق ساحلی داشته باشد.

استناد به این مقاله: صدری نسب، مسعود و ترابی، ندا. (۱۴۰۵). بررسی اثرات تجمعی تخلیه پساب آب شیرین کن ها بر اکوسیستم های دریایی. راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، ۲(۱)، ۵۵-۴۱. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252693>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252693>

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

با توجه به رشد جمعیت و افزایش نیاز به آب شیرین ناگزیر به استفاده از آب دریا برای تامین آب شیرین هستیم به همین دلیل روش‌های متعددی برای نمک‌زدایی از آب دریا ابداع گردیده‌است. استفاده از آب‌شیرین‌کن‌ها به عنوان یکی از اصلی‌ترین راهکارهای تامین آب شیرین، به ویژه در مناطق خشک و ساحلی، به سرعت گسترش پیدا کرده‌است (Rasoulpour & Akbari, 2024). عربستان سعودی، امارات متحده عربی و ایران، امروز بخش قابل توجهی از نیاز آبی خود را از طریق این واحدها تامین می‌کنند. با این وجود، توسعه گسترده و بدون برنامه آب‌شیرین‌کن‌ها نگرانی‌هایی را در مورد تأثیرات زیست‌محیطی آن‌ها به وجود آورده‌است (Sharifinia et al., 2025).

کارخانه‌های نمک‌زدایی با توجه به نوع روش شیرین‌سازی و نحوه بهره‌برداری از آن‌ها می‌توانند اثرهای کیفی مختلفی را بر محیط اطراف خود داشته‌باشند و به صورت کوتاه‌مدت و یا بلندمدت آثار نامطلوب زیست‌محیطی را بر اکوسیستم آبی داشته‌باشند (Stein et al., 2021). در حال حاضر، تلاش‌های کمی در جهت بررسی و تعیین اثرات سوء ناشی از تخلیه پساب به دریا صورت گرفته‌است. خروج این پساب‌ها بیشترین آثار منفی زیست محیطی ناشی از آب شیرین آن‌ها را دربر دارد. سه عامل شوری، حرارت و مواد شیمیایی مهم‌ترین عواملی هستند که از طریق پساب‌های کارخانه‌های نمک‌زدایی وارد دریا می‌شوند (Backer et al., 2022; Omerspahic et al., 2022).

با توجه به این که محیط‌زیست دریا بخش مهمی از اکوسیستم ما را تشکیل می‌دهد و در صورت آسیب دیدن این بخش از اکوسیستم، پیامدهای ناگواری حیات انسان را بر روی زمین تهدید می‌کند.

بیشتر مطالعات پیشین تنها به بررسی اثرات یک آب‌شیرین‌کن پرداخته‌اند، در حالی که در محدوده‌ای مانند خلیج فارس، حضور هم‌زمان چندین واحد نمک‌زدایی در فاصله‌های نزدیک می‌تواند اثراتی ایجاد کند که نه تنها جمع ساده اثرات تکی نیست، بلکه گاهی به صورت هم‌افزا باعث تشدید تغییرات محیطی می‌شود (Nesterov, 2025).

این مقاله با هدف مرور و تحلیل اثرات تجمعی توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها بر منابع آب و محیط‌زیست دریا تدوین شده و همچنین ضمن بررسی پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، بخشی از نتایج مدل‌سازی شوری و دمای پساب در خلیج فارس نیز ارائه می‌شود تا اهمیت در نظر گرفتن تأثیر هم‌زمان چند واحد آب‌شیرین‌کن در ارزیابی‌های زیست‌محیطی و تصمیم‌گیری‌های آینده روشن‌تر شود.

پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، با افزایش استفاده از فناوری نمک‌زدایی برای تأمین آب شیرین در مناطق کم‌آب، توجه به پیامدهای زیست‌محیطی این فناوری نیز افزایش یافته‌است. یکی از مهم‌ترین آثار زیست‌محیطی فرایند نمک‌زدایی، تخلیه پساب شور یا کنسانتره به محیط دریایی است (Lattemann & Höpner, 2008; Roberts et al., 2010). این پساب معمولاً دارای شوری و چگالی بیشتری نسبت به آب دریا بوده و بسته به نوع فناوری نمک‌زدایی، می‌تواند حاوی ترکیبات شیمیایی حاصل از فرایند پیش‌تصفیه، مواد ضد رسوب، محصولات شست‌وشوی غشا و سایر ترکیبات باشد (Roberts et al., 2010; Sirota et al., 2024). در نتیجه، تخلیه نامناسب پساب می‌تواند موجب افزایش موضعی شوری و تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب در محدوده پذیرنده شود. شدت این تغییرات به شرایط محل تخلیه و ظرفیت اختلاط و رقیق‌سازی محیط وابسته است (Lattemann & Höpner, 2008). میزان و گستره این اثرات به عواملی همچون حجم و شوری پساب، عمق محل تخلیه، سرعت و جهت جریان‌های دریایی، امواج، جزر و مد، مشخصات بستر و نحوه طراحی سیستم تخلیه وابسته است (Porto Pereira et al., 2024).

با توجه به اهمیت این موضوع، مطالعات متعددی به بررسی نحوه پخش، اختلاط و رقیق‌شدن پساب شور در محیط دریایی پرداخته‌اند. از آنجا که پساب شور دارای چگالی بیشتری نسبت به آب دریا است، پس از تخلیه می‌تواند به صورت

یک جریان با شناوری منفی در نزدیکی بستر حرکت کرده و تحت تأثیر شرایط هیدرودینامیکی محیط گسترش یابد (Palomar et al., 2012; Sirota et al., 2024). در صورت کاهش نیافتن مناسب شوری در فاصله کوتاه از محل تخلیه، احتمال ایجاد نواحی با شوری بالاتر و در نتیجه ایجاد فشار بر اکوسیستم‌های دریایی افزایش می‌یابد (Clark et al., 2018). علاوه بر شوری، دما و برخی ترکیبات شیمیایی موجود در پساب نیز می‌توانند بر ویژگی‌های محیط پذیرنده اثرگذار باشند (Lattemann & Höpner, 2008; Roberts et al., 2010). در یک مطالعه مروری جدید، Driss et al. (2025) پیامدهای زیست‌محیطی نمک‌زدایی و به‌ویژه چالش‌های مرتبط با مدیریت پساب شور را بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که افزایش شوری، تخریب زیستگاه و اختلال در تنوع زیستی از مهم‌ترین نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با تخلیه پساب شور هستند. نویسندگان همچنین بر اهمیت توسعه روش‌های مناسب تصفیه و مدیریت پساب، افزایش بهره‌وری انرژی و اتخاذ رویکردهای پایدار در توسعه واحدهای نمک‌زدایی تأکید کردند.

در کنار مطالعات تجربی و مروری، استفاده از مدل‌های عددی به‌عنوان ابزاری مؤثر برای پیش‌بینی رفتار پساب شور و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی آن مورد توجه قرار گرفته است. Porto Pereira et al. (2024) یک ابزار مدل‌سازی برای بررسی همزمان رفتار پساب در میدان نزدیک و میدان دور توسعه دادند. در این مطالعه، مدل میدان نزدیک با یک مدل انتقال لاگرانژی تلفیق شد و اثر عواملی همچون سرعت جریان، مشخصات دیفیوزر، شوری و دمای آب دریا و شرایط موجی بر پراکنش پساب بررسی شد. نتایج نشان داد که ویژگی‌های سیستم تخلیه، به‌ویژه زاویه دیفیوزر، می‌تواند بر میزان رقیق‌سازی اولیه و طول میدان نزدیک اثر قابل توجهی داشته باشد. این مطالعه همچنین نشان داد که تلفیق مدل‌های میدان نزدیک و دور می‌تواند ابزار مناسبی برای ارزیابی مسیر حرکت توده شور و بررسی شرایط مختلف تخلیه باشد.

در سال‌های اخیر، توجه به بهینه‌سازی شرایط تخلیه پساب در مناطق ساحلی نیز افزایش یافته است. Shaghghi et al. (2024) با استفاده از مدل‌سازی عددی، شرایط تخلیه کنسانتره حاصل از آب شیرین کن‌های ساحلی را بررسی کردند و نقش عواملی مانند محل و شرایط تخلیه و ویژگی‌های هیدرودینامیکی محیط را در میزان پراکنش و رقیق‌سازی پساب مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این پژوهش بر اهمیت طراحی و انتخاب مناسب شرایط تخلیه برای کاهش اثرات احتمالی پساب بر محیط دریایی تأکید دارد. این مطالعه از آن جهت برای پژوهش‌های منطقه‌ای اهمیت دارد که نشان می‌دهد ارزیابی عددی می‌تواند برای مقایسه سناریوهای مختلف تخلیه و تعیین شرایط مناسب‌تر برای کاهش اثرات زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گیرد.

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، اهمیت این موضوع به دلیل وابستگی بیشتر به فناوری نمک‌زدایی افزایش می‌یابد. خلیج فارس یکی از مهم‌ترین مناطق جهان از نظر تمرکز واحدهای نمک‌زدایی است و ویژگی‌های هیدرودینامیکی و اقلیمی خاص آن، از جمله نیمه‌بسته بودن حوضه، تبخیر زیاد و محدود بودن تبادل آب با آب‌های آزاد، ضرورت بررسی دقیق‌تر اثرات تخلیه پساب شور را افزایش می‌دهد. در چنین شرایطی، بررسی اثر یک واحد نمک‌زدایی به‌تنهایی ممکن است برای ارزیابی شرایط واقعی منطقه کافی نباشد؛ زیرا پساب حاصل از واحدهای مختلف می‌تواند در مقیاس منطقه‌ای بر الگوی شوری آب اثرگذار باشد.

در همین راستا، Nesterov (2025) با استفاده از یک مدل سه‌بعدی گردش آب، اثر واحدهای نمک‌زدایی ساحلی بر شوری خلیج فارس را در مقیاس منطقه‌ای بررسی کرد. در این پژوهش ظرفیت ۷۳۸ واحد نمک‌زدایی ساحلی در مدل در نظر گرفته شد و نتایج دو شبیه‌سازی سه‌ساله، شامل شرایط پایه و شرایط همراه با اثر واحدهای نمک‌زدایی، با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که افزایش شوری در مقیاس کل خلیج فارس نسبتاً محدود است، اما در نزدیکی محل‌های تخلیه و به‌ویژه در مناطقی با تبادل و تهویه ضعیف، افزایش شوری می‌تواند به میزان قابل توجهی بیشتر

باشد. همچنین اثرات شوری در برخی مناطق می‌تواند تا فاصله قابل توجهی از محل تخلیه گسترش یابد. این نتایج اهمیت بررسی همزمان چندین واحد نمک‌زدایی و اثرات تجمعی آن‌ها را در مقیاس منطقه‌ای نشان می‌دهد. در ایران نیز مطالعاتی در زمینه انتشار و تخلیه پساب آب‌شیرین‌کن‌ها انجام شده است. به عنوان مثال، مقاله ارائه‌شده در شانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران با استفاده از مدل عددی MOHID Water، نحوه پخش آلاینده‌ها در پیکره‌های آبی دریای عمان و منطقه بندر جاسک را بررسی کرده و نتایج آن نشان داده است که طراحی مناسب سیستم خروجی پساب می‌تواند در کاهش اثرات نامطلوب بر محیط پذیرنده مؤثر باشد (Rabi Purkismi et al., 2016). همچنین مطالعه‌ای ارائه‌شده در اولین همایش ملی یافته‌های نوین در علوم کشاورزی، محیط‌زیست و منابع طبیعی پایدار، به بررسی تخلیه پساب آب‌شیرین‌کن با استفاده از پخش‌کننده‌های میله‌ای (دیفیوزرها) پرداخته و نشان داده است که استفاده مناسب از سیستم پخش‌کننده می‌تواند با افزایش اختلاط و رقیق‌سازی، موجب کاهش چگالی و شوری توده پساب شود. همچنین افزایش فاصله محل تخلیه از ساحل و افزایش عمق تخلیه می‌تواند شرایط مناسب‌تری برای رقیق‌سازی پساب فراهم کند (Shaghghi et al., 2024).

با وجود مطالعات متعدد انجام‌شده درباره اثرات زیست‌محیطی آب‌شیرین‌کن‌ها و نحوه انتشار پساب شور، بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها بر بررسی یک واحد نمک‌زدایی، یک نقطه تخلیه یا مقیاس محدود پیرامون محل تخلیه تمرکز داشته‌اند. در این مطالعات، رفتار پساب در میدان نزدیک و دور و نقش پارامترهای هیدرودینامیکی و مشخصات دیفیوزر به‌طور گسترده بررسی شده است. با این حال، بررسی اثرات همزمان و تجمعی تعداد زیادی واحد نمک‌زدایی در مقیاس یک حوضه نیمه‌بسته، به‌ویژه با در نظر گرفتن پراکنش مکانی واحدها و شرایط هیدرودینامیکی منطقه، همچنان نیازمند مطالعات بیشتری است. نتایج مطالعه Nesterov (2025) نیز نشان می‌دهد که اثر واحدهای نمک‌زدایی تنها به محدوده بسیار نزدیک محل تخلیه محدود نمی‌شود و در مناطقی با گردش و تبادل آب ضعیف می‌تواند در مقیاس منطقه‌ای اهمیت بیشتری پیدا کند.

از این رو، با توجه به تمرکز بالای واحدهای نمک‌زدایی در اطراف خلیج فارس و اهمیت شوری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های اثرگذاری پساب شور، بررسی اثرات تجمعی این واحدها با استفاده از مدل‌سازی عددی می‌تواند تصویر جامع‌تری از پیامدهای زیست‌محیطی توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها ارائه دهد. بر این اساس، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی، به بررسی نحوه پراکنش پساب شور و اثرات تجمعی ناشی از تخلیه واحدهای نمک‌زدایی در خلیج فارس می‌پردازد و تلاش می‌کند نقش شرایط هیدرودینامیکی و توزیع مکانی واحدهای نمک‌زدایی را در تغییرات شوری محیط دریایی ارزیابی کند.

روش‌شناسی پژوهش

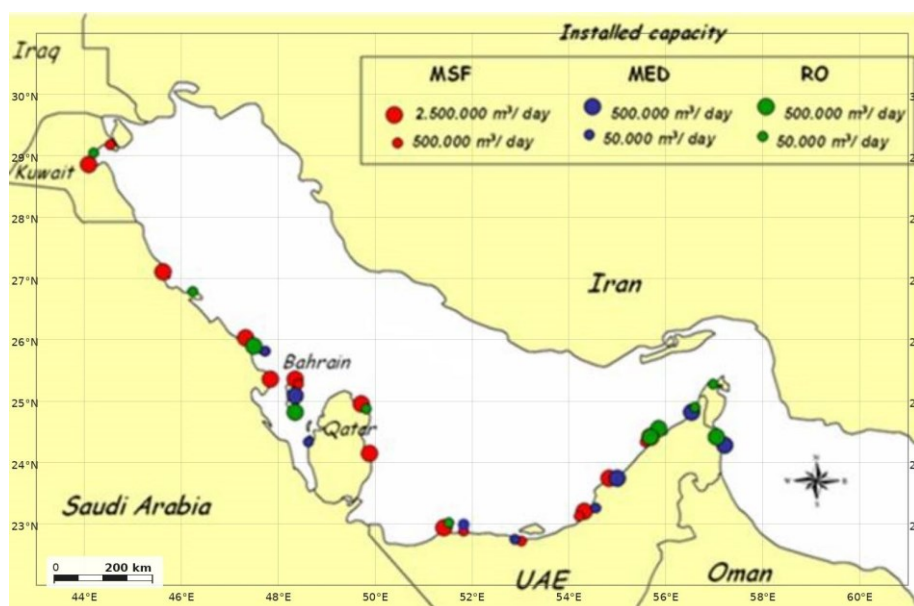
این پژوهش با هدف بررسی اثرات تجمعی توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها بر منابع آب و محیط‌زیست دریایی انجام شده است. در این مقاله هم به بررسی مطالعات پیشین پرداخته‌شده و هم مدل‌سازی عددی تا درک کامل‌تری از پیامدهای زیست‌محیطی حاصل از توسعه آب‌شیرین‌کن‌ها به دست‌آید. با درک نکات مثبت تحقیقات انجام شده و توجه به نواقص آن‌ها از انجام فعالیت‌های تکراری و اشتباهات رایج جلوگیری به عمل خواهد آمد. علاوه بر این، می‌توان تجارب به دست‌آمده را در جهت بهبود تحقیق پیش رو مورد استفاده قرار داد. به همین جهت در این بخش سعی می‌شود که مروری کلی بر تحقیقات انجام شده قبلی در زمینه بررسی پخش آلودگی ناشی از پساب خروجی از کارخانجات و صنایع انجام شود.

برای جمع‌آوری منابع، جست‌وجوی عظیمی در پایگاه‌های داده بین‌المللی از جمله ScienceDirect و Google Scholar و همچنین پایگاه‌های فارسی مثل Civilica و SID انجام گرفت. برای رسیدن به جدیدترین یافته‌ها بازه زمانی

مطالعات بین سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ در نظر گرفته شد. تا بروزترین یافته ها درباره اثرات شوری، دما و ترکیبات شیمیایی پساب پوشش داده شود. معیار انتخاب مقالات بررسی اثرات پساب بر محیط های نیمه محصور (به ویژه خلیج فارس) و ارائه داده های کمی از ویژگی های پساب بود. در آخر، از میان منابع یافت شده، حدود ۴۰ مقاله که ارتباط بیشتری با موضوع داشتند انتخاب و تحلیل شدند.

در ادامه، ابتدا مشخصات هر آب شیرین کن از جمله حجم و دمای پساب، ظرفیت تولید، میزان شوری خروجی و موقعیت مکانی در منطقه ساحلی استخراج شد. سپس با بهره مندی از مدل سازی عددی، الگوی احتمالی انباشت شوری و دما در حضور چندین واحد فعال بررسی شد. در نهایت این تحلیل باعث شد تا نواحی حساس و محدوده تاثیر تجمعی شناسایی شود. برای اعتبار بیشتر یافته های مرور ادبیات، بخشی از داده ها و نتایج مدل سازی عددی حاصل از پایان نامه نویسنده نیز مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب این داده ها با مرور مطالعات موجود، دیدگاه دقیق تری از نحوه اثر همزمان چند واحد نمک زدایی بر محیط دریا ارائه می دهد.

بر اساس این تحلیل ها، چارچوب پیشنهادی برای ارزیابی اثرات تجمعی در طرح های توسعه پایدار آینده ارایه شده است که می تواند به تصمیم گیرندگان در مدیریت پایدار منابع آب و حفاظت از محیط زیست دریایی کمک کرد. برای بررسی تاثیر تجمعی واحدهای آب شیرین کن، موقعیت و ظرفیت آن ها در سواحل خلیج فارس بررسی شد (شکل ۱). همان طور که مشخص است، تراکم این واحدها در سواحل جنوبی به ویژه در عربستان و امارات بیش تر است که می تواند بر تغییرات شوری منطقه اثرگذار باشد.



شکل ۱. موقعیت و ظرفیت بهره برداری از سیستم های RO و MED در سواحل حاشیه خلیج فارس
Figure 1. Location and operational capacity of RO, MSF, and MED systems on the Persian Gulf coast
(Al-Barwani and Purnama, 2008)

یافته ها و بحث

بررسی مطالعات انجام شده نشان می دهد که پدیده پخش شوری در محیط های آبی یک فرایند پیچیده است که به عوامل و پارامترهای مختلفی بستگی دارد. کارهای آزمایشگاهی انجام شده در این زمینه به بررسی برخی از این عوامل

پرداخته‌اند. همچنین بکارگیری مدل‌های عددی دو و سه بعدی بطوری گسترده‌ای در پروژه‌های تحقیقاتی و صنعتی مورد استفاده قرار گرفته‌است و مدل‌های مختلفی برای این منظور طرح و توسعه داده شده‌اند. نتایج این مدسازی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های عددی می‌تواند تعریف گویا و شناخت کافی از منطقه مورد مطالعه و تاثیر عوامل محیطی بر پخش شوری را ارائه دهد (Bashitalshaaer, 2011).

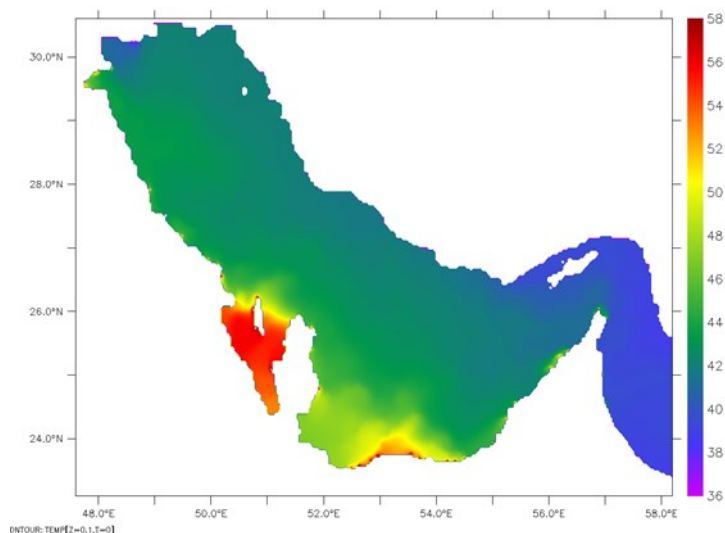
یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که شوری پساب معمولاً بین ۱/۵ تا ۲ برابر شوری طبیعی آب دریا است و دمای آن نیز حدود ۵ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر است. این موضوع، به ویژه در مناطق نیمه‌محصور و کم عمق مانند خلیج فارس، می‌تواند سبب افزایش تدریجی شوری در لایه‌های پایینی آب و کاهش اکسیژن محلول و در نتیجه تغییر در تعادل محیط زیست دریا شود. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که تعداد کمی از تحقیقات به اثرات تجمعی چند واحد نمک‌زدایی در یک منطقه پرداخته است در صورتی که در بسیاری از مناطق ساحلی، چندین آب شیرین‌کن در فواصل کم از یکدیگر قرار دارند در این شرایط اثرات پساب آب شیرین‌کن‌ها به صورت تکی معنا ندارد و پیامدهای حاصل از فعالیت تمام واحدها می‌تواند شدت و گستره آلودگی را چند برابر کند. (Chenoweth & Al-Masri, 2022; Chow et al., 2019). برای روشن‌تر شدن موضوع، نتایج مدل‌سازی عددی انجام‌شده در خلیج فارس مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه نحوه پخش شوری و حرارت ناشی از پساب کارخانه کارخانه‌های نمک‌زدایی خلیج فارس بررسی شد و نحوه پخش این آلاینده‌ها در محیط آبی توسط مدل هیدرودینامیکی سه بعدی کوهرنس شبیه‌سازی شد. در این مقاله، تمرکز اصلی بر تحلیل اثرات تجمعی توسعه آب شیرین‌کن‌ها در خلیج فارس قرار گرفته‌است. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که اثر هر واحد را به صورت جداگانه بررسی کرده‌اند، در این پژوهش اکثر واحدهای فعال در محدوده ساحلی به طور همزمان در مدل وارد شدند تا تاثیر هم‌افزایانه پساب‌ها بر تغییرات شوری و دمای آب بررسی شود.

برای مقایسه مفهومی، نتایج پژوهش‌های پیشین مانند Driss et al (2025) و pereira et al (2024) که عملکرد تک‌واحدی را بررسی کرده‌اند، به عنوان مبنایی برای درک تفاوت شدت اثرات استفاده شد. برای شبیه‌سازی اثرات تجمعی آب شیرین‌کن‌ها بر خلیج فارس، دو پارامتر کلیدی یعنی شوری و دمای پساب نسبت به آب محیط در نظر گرفته‌شد. براساس داده‌های عملیاتی منطقه، شوری پساب به طور میانگین ۵ psu بیشتر و دمای آن ۷ درجه سانتی‌گراد بالاتر از آب دریای پیرامونی فرض شد. سایر شرایط مرزی شامل جریان‌های غالب فصلی و تبادل با دریای عمان از داده‌های میانگین زمستانی استخراج شد. مشخصات اصلی مدل در جدول ۱ ارائه شده‌است.

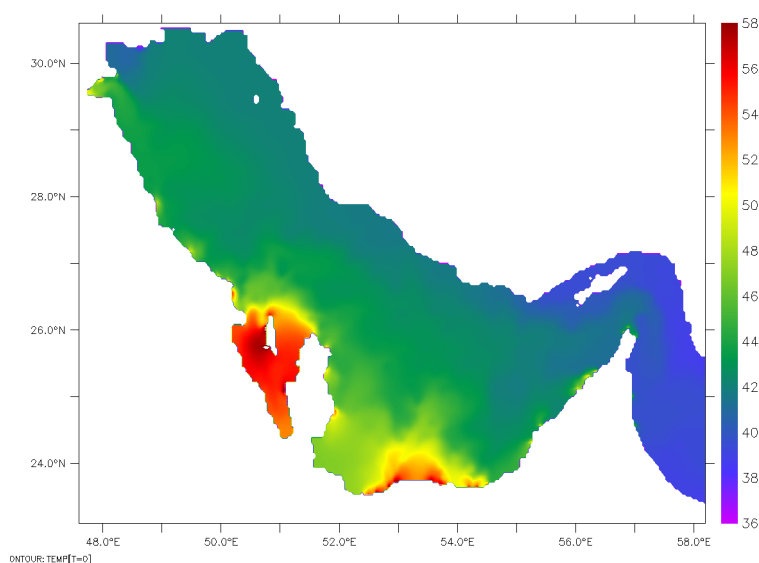
جدول ۱. مفروضات کلیدی مدل

Table 1. Key Model Assumptions

میزان شوری پساب	میزان دمای پساب	فصل شبیه‌سازی شده	لایه‌های بررسی شده
۵ psu بیشتر از شوری محیط	۷ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای محیط	زمستان	سطح و بستر



شکل ۲. پیش بینی پخش شوری توسط مدل در لایه سطحی در فصل زمستان (خروجی مدل عددی)
 Figure 2. Prediction of salinity dispersion by the model in the surface layer during winter (numerical model output)



شکل ۳. پیش بینی پخش شوری توسط مدل در لایه بستر در فصل زمستان (خروجی مدل عددی)
 Figure 3. Prediction of salinity dispersion by the model in the bottom layer during winter (numerical model output)

شکل ۲ و ۳ پیش بینی پخش شوری را به ترتیب در لایه سطح و بستر در فصل زمستان نشان می دهد. همانطور که می بینیم، بیشترین غلظت شوری در نواحی جنوبی خلیج فارس، به ویژه در نزدیکی سواحل عربستان و امارات، مشاهده می شود که با تراکم بالای واحدهای نمک زدایی در این مناطق مطابقت دارد. در لایه سطحی، پراکندگی شوری نسبتاً محدود است و اثر جریان های سطحی موجب رقیق سازی سریع تر پساب شور می شود. با این حال، در لایه بستر، به دلیل چگالی بالاتر پساب و حرکت کند جریان ها، انباشت شوری قابل توجه تر بوده و نواحی پرخطر به صورت لکه ای و گسترده تر ظاهر می شوند.

نتایج حاصل از مدل سازی نشان داد که در شرایط زمستانی با توجه به کاهش دما و افزایش چگالی آب، بخش عمده‌ای از پساب شور در لایه‌های زیرین تجمع می‌یابد. این موضوع باعث افزایش میانگین شوری در نواحی جنوبی تا حدود ۲-۳ psu بالاتر از مقدار طبیعی شده است. این تغییرات باعث گسترش محدوده اثر پساب تا دو برابر نسبت به حالت تک‌واحد می‌شود. این الگو در سایر مطالعات در دریای سرخ و عمان نیز گزارش شده است.

همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان داد که پساب وارد شده به آب، که شور و چگال می‌باشد به میزان زیادی به عمق رفته، پخش پساب در لایه‌های زیرین آب با سرعت بیشتر صورت می‌گیرد. در صورتی که بخش پساب در لایه‌های سطحی نسبت به بستر کمتر بوده و با توجه به جهت جریان‌های سطحی در تنگه، پساب در سطح در نزدیکی محل تخلیه باقی‌مانده و از انتشار آن جلوگیری می‌شود. پخش پساب با شوری بالا در لایه‌های نزدیک بستر می‌تواند اثرات نامطلوبی بر محیط زیست بستر دریا داشته باشد و سبب تغییر در اکوسیستم دریایی اطراف محل تخلیه شده و موجب از بین رفتن حیات بسیاری از موجودات دریایی بسترزی شود. زندگی بسیاری از موجودات دریایی که در بستر دریا زندگی می‌کنند مانند مرجان‌ها و سایر سخت‌پوستان و نرم‌تنان مطمئناً با افزایش شوری آب تحت تأثیر قرار گرفته و یا از بین می‌رود.

یافته‌های این پژوهش با نتایج گزارش شده توسط [Driss et al \(2025\)](#) و [pereira et al \(2024\)](#) هم‌خوانی دارد و تاکید می‌کند که اثرات تجمعی ناشی از چندین واحد نمک‌زدایی بسیار فراتر از یک واحد تک می‌باشد. این مساله ضرورت انجام ارزیابی‌های زیست‌محیطی منطقه‌ای به‌جای ارزیابی محلی را برجسته می‌کند. از جنبه اقتصادی و مدیریتی نیز نشان می‌دهد که نادیده گرفتن اثرات تجمعی در طرح‌های توسعه می‌تواند باعث کاهش بهره‌وری در شیلات، کاهش توریست و همچنین افزایش هزینه‌های نگهداری تاسیسات دریایی شود. لازم و ضروری است که ارزیابی‌های زیست‌محیطی از سطح تک‌واحد بالاتر رفته و اثر همزمان چندین واحد نمک‌زدایی را در واحد منطقه‌ای بررسی کنند.

نتیجه‌گیری

در مجموع، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و محاسبات انجام‌شده نشان می‌دهد که توسعه همزمان چندین واحد آب‌شیرین‌کن در مناطق ساحلی می‌تواند در مقایسه با احداث یک واحد منفرد، موجب تشدید و گسترش اثرات تجمعی تخلیه پساب شود. افزایش شوری و دمای آب در مجاورت نقاط تخلیه می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محیط دریایی را تغییر داده و در صورت تداوم، بر پایداری اکوسیستم‌های حساس ساحلی اثرگذار باشد. این موضوع در مناطق نیمه‌محصولی مانند خلیج فارس، با توجه به نرخ بالای تبخیر و محدودیت نسبی تبادل آب، از اهمیت بیشتری برخوردار است.

نتایج بررسی سناریوهای مختلف نشان داد که فعالیت همزمان چندین واحد آب‌شیرین‌کن موجب ایجاد نواحی با شوری بالاتر در مجاورت بستر و افزایش گستره اثرگذاری پساب می‌شود. همچنین، تغییر دبی تخلیه پساب در محدوده سناریوهای بررسی شده، تأثیر قابل توجهی بر الگوی کلی انتشار نداشته و عمدتاً موجب تغییر در مساحت ناحیه تحت تأثیر شده است. افزایش شوری در نزدیکی بستر نیز می‌تواند بر ساختار و ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان اثرگذار باشد. تداوم چنین شرایطی، در صورت عدم مدیریت مناسب، می‌تواند پیامدهایی همچون کاهش کیفیت آب، تغییر شرایط اکولوژیکی بستر، کاهش اکسیژن محلول و ایجاد فشار مضاعف بر زیستگاه‌های حساس از جمله اجتماعات مرجانی و مانگروها را به همراه داشته باشد.

از منظر اقتصادی و اجتماعی نیز تداوم این روند می‌تواند با کاهش بهره‌وری فعالیت‌های شیلاتی، کاهش جذابیت گردشگری ساحلی و افزایش تعارض میان بخش‌های مختلف بهره‌بردار از منابع آب همراه باشد. بنابراین، در ارزیابی زیست‌محیطی پروژه‌های جدید آب شیرین کن، بررسی اثرات تجمعی و منطقه‌ای ناشی از استقرار همزمان چندین واحد، در کنار اثرات مربوط به هر واحد به صورت منفرد، ضروری است.

با توجه به نتایج این پژوهش، برای کاهش آثار نامطلوب ناشی از تخلیه پساب آب شیرین کن‌ها، پیشنهاد می‌شود: محل و نحوه استقرار آب شیرین کن‌های جدید با توجه به شرایط هیدرودینامیکی منطقه، عمق آب، جهت و سرعت جریان و فاصله از زیستگاه‌های حساس تعیین شود.

در طراحی سامانه‌های تخلیه، استفاده از روش‌های افزایش اختلاط و رقیق‌سازی اولیه پساب، از جمله پخش‌کننده‌های چندخروجی و تخلیه در عمق مناسب، مورد توجه قرار گیرد.

به جای ارزیابی مستقل هر واحد، اثرات تجمعی چندین واحد آب شیرین کن در مقیاس منطقه‌ای در مطالعات ارزیابی اثرات زیست‌محیطی لحاظ شود.

پایش مستمر پارامترهایی نظیر شوری، دما، اکسیژن محلول و سایر شاخص‌های کیفی آب در محدوده تخلیه و مناطق پیرامونی انجام شود.

در تعیین ظرفیت توسعه واحدهای آب شیرین کن، ظرفیت طبیعی منطقه برای رقیق‌سازی و انتقال پساب و همچنین حساسیت اکوسیستم‌های ساحلی در نظر گرفته شود.

استفاده مجدد از پساب و بازیابی بخشی از نمک‌ها و مواد با ارزش موجود در پساب، در صورت امکان فنی و اقتصادی، به منظور کاهش حجم پساب دفعی مورد بررسی قرار گیرد.

تصمیم‌گیری درباره توسعه آب شیرین کن‌ها در چارچوب مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی و با در نظر گرفتن همزمان ملاحظات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی انجام شود.

با توجه به محدودیت‌های مطالعه حاضر، برای تکمیل و توسعه نتایج پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده: اثرات تخلیه همزمان پساب چندین آب شیرین کن با در نظر گرفتن آرایش‌ها و فواصل مختلف نقاط تخلیه بررسی شود.

سناریوهای مختلف شرایط هیدرودینامیکی، از جمله تغییرات فصلی جریان، باد، جزر و مد و شرایط آرام و طوفانی، در شبیه‌سازی‌ها لحاظ شود.

اثرات بلندمدت و تجمعی تخلیه پساب بر شوری، دما، اکسیژن محلول و سایر پارامترهای کیفی آب بررسی شود. برهم‌کنش پساب آب شیرین کن با رسوبات بستر و تغییرات احتمالی در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی رسوبات مورد مطالعه قرار گیرد.

نتایج مدل عددی با داده‌های پایش میدانی در نقاط مختلف منطقه اعتبارسنجی و عدم قطعیت نتایج مدل ارزیابی شود. اثرات زیست‌محیطی تخلیه پساب بر زیستگاه‌های حساس مانند اجتماعات مرجانی، مانگروها و سایر جوامع کفزی به صورت کمی بررسی شود.

سناریوهای مختلف مدیریت و دفع پساب، از جمله رقیق‌سازی، استفاده از پخش‌کننده‌های مناسب، تخلیه در اعماق مختلف و روش‌های کاهش حجم پساب، از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی با یکدیگر مقایسه شوند.

اثرات تغییرات اقلیمی، به‌ویژه افزایش دمای آب دریا، تغییر الگوی تبخیر و تغییرات احتمالی در هیدرودینامیک منطقه، بر پراکنش و ماندگاری پساب در مطالعات آتی لحاظ شود.

در نهایت، توسعه پایدار فناوری آب‌شیرین‌کنی در مناطق ساحلی مستلزم آن است که تصمیم‌گیری درباره احداث و بهره‌برداری از واحدهای جدید، نه به صورت منفرد، بلکه در چارچوب ظرفیت اکولوژیکی منطقه و اثرات تجمعی فعالیت‌های موجود و آتی انجام شود. تلفیق مدل‌سازی عددی، پایش مستمر محیطی و مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی می‌تواند زمینه را برای کاهش آثار زیست‌محیطی تخلیه پساب و بهره‌برداری پایدارتر از منابع آب فراهم کند.

References

- Al-Barwani, H. H., & Purnama, A. (2008). Evaluating the effect of producing desalinated seawater on hypersaline Arabian Gulf. *European Journal of Scientific Research*, 22(2), 279–285. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:134065014>
- Backer, S. N., Bouaziz, I., Kallayi, N., Thomas, R. T., Preethikumar, G., Takriff, M. S., Laoui, T., & Atieh, M. A. (2022). Brine solution: Current status, future management and technology development. *Sustainability*, 14(11), 6752.
- Bashitialshaaer, R. (2011). *Analysis and modelling of desalination brines* (1052 ed.) [Doctoral thesis (compilation), Division of Water Resources Engineering]. Lund University.
- Chenoweth, J., & Al-Masri, R. A. (2022). Cumulative effects of large-scale desalination on the salinity of semi-enclosed seas. *Desalination*, 526, 115522. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115522>
- Chow, A. C., Verbruggen, W., Morelissen, R., Al-Osairi, Y., Ponnumani, P., Lababidi, H. M. S., Al-Anzi, B., & Adams, E. E. (2019). Numerical prediction of background buildup of salinity due to desalination brine discharges into the Northern Arabian Gulf. *Water*, 11(11), 2284. <https://doi.org/10.3390/w11112284>
- Clark, G. F., Knott, N. A., Miller, B. M., Kelaher, B. P., Coleman, M. A., Ushiana, S., & Johnston, E. L. (2018). First large-scale ecological impact study of desalination outfall reveals trade-offs in effects of hypersalinity and hydrodynamics. *Water Research*, 145, 757–768. DOI: 10.1016/j.watres.2018.08.071
- Driss, A., Mabrouki, J., Fahdi, G., & El Hajjaji, S. (2025). Environmental sustainability of desalination: A critical review of brine treatment challenges and mitigation strategies. *Water Conservation & Management*, 9(1), 55–60. <https://doi.org/10.26480/wcm.01.2025.55.60>
- Global Water Intelligence. (n.d.). *IDA desalination plants inventory*. Retrieved June 28, 2026, from <https://www.desaldata.com>
- Lattemann, S., & Höpner, T. (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, 220(1–3), 1–15. DOI: 10.1016/j.desal.2007.03.009
- Nesterov, O. (2025). An assessment of seawater desalination impact on salinities in the Arabian/Persian Gulf using a 3D circulation model. *Ocean Modelling*, 194, 102503. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2025.102503>
- Omerspahic, M., Al-Jabri, H., Siddiqui, S. A., & Saadaoui, I. (2022). Characteristics of desalination brine and its impacts on marine chemistry and health, with emphasis on the Persian/Arabian Gulf: A review. *Frontiers in Marine Science*, 9, 845113. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.845113>
- Palomar, P., Lara, J. L., Losada, I. J., Rodrigo, M., & Álvarez, A. (2012). Near field brine discharge modelling part 1: Analysis of commercial tools. *Desalination*, 290, 14–27. DOI: 10.1016/j.desal.2011.11.037
- Porto Pereira, S., Rodrigues, M. F., Rosman, P. C. C., Rosman, P., Bleninger, T., Lima Neto, I. E., Teixeira, C. E. P., Sola, I., & Sánchez Lizaso, J. L. (2024). A novel tool for modeling the near- and far-field dispersion of brine effluent from desalination plants. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1377252. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1377252>
- Rabi Purkismi, R., Mohammadvali Samani, J., Mazaheri, M., & Hamidi Razi, H. (2016). *Investigating the distribution of desalination effluents in the Oman Sea in Bandar Jask region using the numerical model of MOHID Water*. The 16th Iranian Hydraulics Conference, Ardabil, Iran.
- Rasoulpour, S., & Akbari, H. (2024). Development of desalination plants within the semi-enclosed Persian Gulf. *Applied Water Science*, 14, 189. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02251-x>
- Roberts, D. A., Johnston, E. L., & Knott, N. A. (2010). Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: A critical review of published studies. *Water Research*, 44(18), 5117–5128. DOI: 10.1016/j.watres.2010.04.036

- Shaghghi, G., Javid, A. H., Allahyaribeik, S., & Mashinchian Moradi, A. (2024). Determining the optimization of seawater concentrate discharge of coastal desalination plants into the marine environment, based on numerical modeling. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 22(2), 555–567. <https://doi.org/10.1007/s40201-024-00914-0>
- Sharifinia, M., Keshavarzifard, M., & Hosseinkhezri, P. (2025). Impact of desalination plant brine discharge on macrobenthic communities in the Persian Gulf. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 221, 105465.
- Sirota, R., Winters, G., Levy, O., Marques, J., Paytan, A., Silverman, J., Sisma-Ventura, G., Rahav, E., Antler, G., & Bar-Zeev, E. (2024). Impacts of desalination brine discharge on benthic ecosystems. *Environmental Science & Technology*, 58(13), 5631–5645. DOI: 10.1021/acs.est.3c07748
- Stein, S., Michael, H., & Dugan, B. (2021). Injection of desalination brine into the saline part of the coastal aquifer; environmental and hydrological implications. *Water Research*, 207, 117820. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117820>



Analysis of Neighborhood Livability Levels in Tehran District 12 within the Framework of Sustainable Urban Development

Majid Karimpour Reyhan^{a*}, Shahrzad Sharif Jahed^b

^aEarth Sciences Research Group, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

^bDepartment of Geography and Urban Planning, Faculty of Geography, Kharazmi University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: Mrihan@ut.ac.ir, <https://orcid.org/0000-0002-1229-1373>

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 2026/03/22
Received in revised form:
2026/04/19
Accepted: 2026/04/30
Available online: 2026/05/21

Keywords:
Sustainable Development,
Urban Livability,
Tehran city,
District 12.

ABSTRACT

Today, cities face numerous challenges, and population growth has brought harmful consequences for urban areas. The continuation of such urban growth, with social, economic, and environmental problems, is a crisis and a warning about the unsustainability of cities. Consequently, livability in cities has declined. This study aims to assess the livability of District 12 of Tehran in the context of sustainable urban development. The research adopts a descriptive-analytical method and is classified as applied research in terms of purpose. Data was collected through library-based and field methods. The statistical population consists of experts from Tehran Municipality District 12, and cluster random sampling was employed. Data was analyzed using the TOPSIS technique. District 12 of Tehran was selected as the study area due to its central location, historical significance, deteriorated urban fabric, and diversity of land uses. In this study, 20 indicators across various dimensions were evaluated, including personal and social security, quality housing, environmental pollution, public transportation stations, recreational facilities, drinking water quality, waste and sewage collection, educational spaces, sense of place attachment, citizen participation, environmentally compatible land uses, access to suitable employment, regional facilities and equipment, access to open spaces, green and public spaces, urban governance, social interactions, cleanliness of public spaces, quality of public spaces, and social justice. The results indicate that Iran Neighborhood ranked first with a score of 0.967, demonstrating a high level of livability, while Harandi Neighborhood ranked last with a score of 0.082, indicating the lowest level of livability. Qiyam Neighborhood ranked second with a score of 0.914. These findings reveal significant inequalities in livability levels across neighborhoods in District 12 of Tehran. Therefore, implementing sustainable urban development policies to improve living conditions, reduce neighborhood disparities, and enhance urban quality of life, particularly in disadvantaged areas, appears essential. Urban managers and planners should prioritize less privileged neighborhoods through targeted interventions aimed at promoting social equity and sustainable urban development.

Cite this article: Karimpourreihan, M., & sharifjahed, S. (2026). Analysis of Neighborhood Livability Levels in Tehran District 12 within the Framework of Sustainable Urban Development. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 2(1), 56-72.
<https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252684>



© The Author(s).

Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252684>

Introduction

In recent decades, rapid urbanization and population growth have transformed cities worldwide, particularly in developing countries. Although urban expansion has contributed to economic and social development, it has also created major environmental, social, and economic challenges, including pollution, traffic congestion, inadequate infrastructure, unequal access to services, and declining urban environmental quality. Consequently, urban livability has emerged as an important framework for evaluating urban environments and supporting sustainable development. Livability refers to the extent to which urban areas provide safe, healthy, equitable, and satisfactory living conditions and encompasses dimensions such as environmental quality, housing, accessibility, social cohesion, economic opportunities, public participation, and urban governance. Livability is closely related to sustainable urban development. While sustainability emphasizes the long-term environmental, social, and economic viability of cities, livability focuses more directly on current living conditions and residents' well-being. A livable city should provide adequate access to essential infrastructure and services, including transportation, housing, clean water and air, employment, green spaces, and opportunities for social interaction and participation in decision-making. Thus, improving livability can serve as a practical pathway toward sustainable urban development. In this context, District 12 of Tehran, as the historical and administrative core of the city, has considerable cultural, economic, and historical importance. Despite its strategic position and rich heritage, the district faces challenges such as physical deterioration, environmental degradation, socioeconomic disparities, and unequal distribution of urban services. These conditions have resulted in differences in living standards among its neighborhoods. Therefore, assessing the livability of District 12 is essential for identifying development priorities, addressing spatial inequalities, and supporting sustainable urban planning.

Method

This research is descriptive-analytical in terms of method and nature and is classified as applied research in terms of purpose. Data was collected through library-based and field studies, with field study instruments including observation, interviews, and questionnaires. The statistical population consists of experts from Tehran Municipality District 12, and the sampling method is cluster random sampling. For data analysis, the TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) method was employed. In this algorithm, it is assumed that the desirability of each indicator increases (or decreases) uniformly. The best available value of an indicator represents the positive ideal, and the worst available value represents the negative ideal. Additionally, the indicators are assumed to be independent of each other. The distance of an option from the positive (or negative) ideal may be calculated as Euclidean distance (squared) or as the sum of absolute values of linear distances (known as block distances), depending on the trade-offs and substitutions among indicators.

District 12 of Tehran, with an area of 1,600 hectares, has approximately 73% of its urban fabric dating back more than 200 years. 3.43% of the district consists of significant zones and areas, and 15.5% of the length of urban edges (street facades) still contain valuable building facades. The district is bounded by Enghelab Street to the north, Shoush Street to the south, 17 Shahrivar Street to the east, and Vahdat-e-Eslami Street to the west. District 12 includes six districts and thirteen neighborhoods, and is home to numerous historical and cultural landmarks, including the Grand Bazaar of Tehran, Jameh Mosque, Shah Mosque, the Royal Citadel, Sabzeh Meydan, as well as national museums such as the National Museum of Iran, Marvi School, and other significant religious and cultural centers. The presence of these historic elements, alongside the deteriorated urban fabric, represents both challenges and opportunities for sustainable development.

Results

Based on the assessment of 20 indicators extracted from the current situation of District 12, the TOPSIS technique was employed for ranking. After standardizing the indicators, distances to the ideal and non-ideal solutions were calculated. The results revealed significant variations in livability levels among neighborhoods. Iran Neighborhood achieved the highest livability score with 0.967, followed by Qiyam with 0.914, Kosar with 0.487, Sanglaj with 0.445, and Pamenar with 0.433, demonstrating relatively favorable living conditions and better access to essential urban amenities. In contrast, Harandi recorded the lowest livability score (0.082), reflecting severe deficiencies in several dimensions of urban life. Emamzadeh Yahya (0.220) and Ferdowsi (0.232) also ranked among the least livable neighborhoods. These findings reveal substantial spatial disparities in the distribution of urban resources, facilities, and development opportunities across the district. Among the evaluated indicators, quality housing emerged as the most influential factor contributing to urban livability, followed by favorable physical environments and compatible land uses, while urban infrastructure quality ranked third. Environmental pollution reduction, access to financial services, and employment opportunities received comparatively lower scores.

Conclusions

This study demonstrates that urban livability serves as a critical intermediary between current urban conditions and the broader goals of sustainable urban development. The considerable disparities observed among neighborhoods in District 12 reflect uneven urban development patterns and highlight the need for targeted planning interventions. Improving livability requires integrated policies that address housing quality, environmental management, social equity, infrastructure provision, public participation, and economic opportunities. The results further confirm that sustainable urban development cannot be achieved solely through long-term environmental strategies; it also requires immediate improvements in residents' daily living conditions. Therefore, enhancing livability should be considered a practical and measurable approach to advancing sustainability goals in historic urban districts such as Tehran's District 12. To improve livability, urban policymakers should prioritize investments in educational and recreational facilities, healthcare services, public transportation, environmental quality improvements, employment creation, affordable housing, and equitable access to urban services. Such measures would not only enhance residents' quality of life but also strengthen the long-term sustainability and resilience of the district. Future research is recommended to investigate the dynamic relationships between livability indicators, conduct comparative studies across different districts, and develop comprehensive frameworks for monitoring and evaluating progress toward sustainable urban development goals.



تحلیل سطح زیست پذیری محلات منطقه ۱۲ تهران در چارچوب توسعه پایدار شهری

مجید کریم پور ریحان^a، شهرزاد شریف جاهد^b

^aگروه پژوهشی علوم زمین، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

^bگروه جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: مجید کریم پور ریحان Mrihan@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	امروزه شهرها با چالش های متعددی مواجه شده اند و افزایش جمعیت پیامدهای زیان باری برای شهرها به
مقاله پژوهشی	ارمغان آورده است. تداوم این گونه رشد شهرنشینی با مشکلات اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی،
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۰۲	بحران آفرین و هشدار بر ناپایداری شهرها می باشد. در این راستا زیست پذیری در شهرها کاهش
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰	یافته است. هدف پژوهش بررسی زیست پذیری منطقه ۱۲ تهران در راستای توسعه پایدار است. تحقیق از
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰	نظر روش توصیفی-تحلیلی بوده و از حیث هدف در دسته تحقیقات کاربردی قرار دارد. روش جمع آوری
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۳۱	اطلاعات کتابخانه ای و میدانی است. جامعه آماری این پژوهش شامل کارشناسان شهرداری منطقه ۱۲
کلیدواژه ها:	تهران می باشد و روش نمونه گیری تصادفی خوشه ای است. اطلاعات با استفاده از تکنیک تاپسیس تحلیل
توسعه پایدار،	شده است. منطقه ۱۲ تهران به دلیل موقعیت مرکزی، قدمت تاریخی، وجود بافت های فرسوده و تنوع
زیست پذیری شهری،	کاربری ها، به عنوان محدوده مطالعه انتخاب گردید. در این پژوهش، ۲۰ شاخص در ابعاد مختلف شامل
شهر تهران،	امنیت فردی و اجتماعی، مسکن با کیفیت خوب، آلودگی های محیطی، ایستگاه های حمل و نقل عمومی،
منطقه ۱۲.	امکانات تفریحی و اوقات فراغت، کیفیت آب شرب، جمع آوری زباله و فاضلاب، فضاهای آموزشی، حس
	تعلق مکانی، مشارکت شهروندان، کاربری های سازگار با محیط، دسترسی به شغل مناسب، تأسیسات و
	تجهیزات منطقه، دسترسی به فضاهای باز، فضای سبز و عمومی، حکمروایی شهری، تعاملات اجتماعی،
	نظافت و تمیزی فضای عمومی، کیفیت فضای عمومی و عدالت اجتماعی، مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج
	نشان می دهد که محله ایران با نمره ۰/۹۶۷ رتبه اول را به خود اختصاص داده و سطح زیست پذیری در
	آن بالا است و محله هرندی با کسب نمره ۰/۰۸۲ رتبه آخر را کسب کرده و پایین ترین سطح زیست پذیری
	را دارد. همچنین محله قیام با نمره ۰/۹۱۴ در رتبه دوم قرار گرفته است. این نتایج نشان دهنده نابرابری
	قابل توجه در سطح زیست پذیری محلات منطقه ۱۲ تهران است. بنابراین، اجرای سیاست های توسعه
	پایدار شهری برای بهبود شرایط زندگی، کاهش نابرابری های محله ای و ارتقای کیفیت زندگی شهری،
	به ویژه در مناطق محروم، ضروری به نظر می رسد. مدیران و برنامه ریزان شهری باید محلات کمتر برخوردار
	را از طریق مداخلات هدفمند برای ارتقای عدالت اجتماعی و توسعه پایدار شهری در اولویت قرار دهند.

استناد به این مقاله: کریم پور ریحان، مجید و شریف جاهد، شهرزاد. (۱۴۰۵). تحلیل سطح زیست پذیری محلات منطقه ۱۲ تهران در چارچوب توسعه پایدار شهری.

راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار ۱(۱)، ۷۲-۵۴. <https://doi.org/10.22034/jscsm.2026.252684>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jscsm.2026.252684>

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

امروزه افزایش جمعیت موجب رشد شهرنشینی شده است و پیامدهای زیان‌باری در زمینه اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی برای این‌گونه شهرها در پی داشته است (Bedi et al., 2023). تداوم این‌گونه رشد شهرنشینی موجب عدم دستیابی به توسعه پایدار شهری می‌شود (Kamp et al., 2003; Van Kamp et al., 2003). در این میان مشکلاتی دیگر همچون انواع آلودگی‌ها، ترافیک و مشکلات روانی و غیره، کیفیت زندگی و به تبع آن زیست‌پذیری در کلان شهرها را به شدت کاهش می‌دهد. در دهه‌های اخیر به موازات پارادایم‌های توسعه پایدار و توسعه پایدار شهری ایده ارتقای کیفیت زندگی که خود موجبات زیست‌پذیر بودن شهرها را موجب می‌شود، جای خود را در ادبیات برنامه‌ریزی شهری باز کرده است. توسعه پایدار شهری طی دهه‌های اخیر به تدریج به الگوواره‌ای نوین و مسلطی در ادبیات نظری و علمی رایج در باب توسعه و برنامه‌ریزی شهری تبدیل شده است (Almulhim & Cobbinah, 2024). این معنا اگرچه ناظر به برداشت‌ها و تفسیرهای گوناگون است، اما در مجموع بر پایداری و استمرار توسعه برای همگان و نسل‌های آینده طی زمان و بر همه جانبه‌گری ابعاد پیچیده اقتصادی، اجتماعی، کالبدی و محیط زیستی فرایند توسعه در سطح یک شهر تاکید دارد (Chakraborty et al., 2025).

در این میان یکی از مباحث مورد توجه در پایداری شهری، زیست‌پذیری است. زیست‌پذیری، به یک سیستم شهری که در آن به سلامت اجتماعی، اقتصادی، کالبدی و روانی همه ساکنانش توجه شده است اطلاق می‌شود. این کیفیت درباره فضاهای شهری مطلوب که غنای فرهنگی را انعکاس می‌دهند، می‌باشد. اصول کلیدی که به این مفهوم استحکام می‌بخشد شامل برابری، عدالت، امنیت، مشارکت، تفرج و قدرت بخشیدن می‌باشد. شهر زیست‌پذیر، شهری است که در آن می‌توان یک زندگی سالم داشت (Bedi et al., 2023; Roka, 2020). این‌گونه شهر، شهری است برای همه مردم. شهر زیست‌پذیر به عنوان یک اتصال بین گذشته و حال مطرح است. یعنی از یک سو به نشانه‌های تاریخی احترام می‌گذارد و از سویی دیگر به آنچه تاکنون متولد نشده است، ارج می‌نهد. این‌گونه شهرها علیه هر گونه به هدر دادن منابع طبیعی و آنچه که ما باید به صورت دست نخورده برای آیندگان نگه داریم مبارزه می‌کند بنابراین یک شهر زیست‌پذیر یک شهر پایدار نیز هست. در بسیاری از متون مفهوم شهر زیست‌پذیر با کیفیت زندگی به صورت مترادف بیان شده است. کیفیت زندگی که به وسیله شهروندان یک شهر تجربه می‌شود با توانایی آن‌ها برای دسترسی به زیرساخت‌ها، غذا، هوای پاک، مسکن ارزان قیمت، اشتغال موثر، فضای سبز و پارک‌ها گره خورده است. زیست‌پذیری نیز به عنوان کیفیت زندگی تجربه‌شده توسط ساکنان یک شهر یا یک منطقه تعریف می‌شود. در چنین زمینه‌ای پایداری عبارت است از توانایی تقویت کیفیت زندگی که بشر برای آن ارزش است (Ahmed et al., 2019; Sekar, 2023).

با توجه به اهمیت اقتصادی، سیاسی، تاریخی و کالبدی بخش مرکزی شهر تهران و وضعیت نه چندان مطلوب آن در زمان حاضر از جنبه‌های مختلف اجتماعی، کالبدی، مدیریتی، منطقه ۱۲ که قدمت عمده بخش مرکزی شهر تهران را تشکیل می‌دهد، به عنوان محدوده مکانی و قلمرو جغرافیایی این پژوهش انتخاب شده است. این منطقه ریشه در قدیمی‌ترین بافت‌های این شهر دارد و با وسعتی حدود ۱۶/۹۱ کیلومتر مربع تقریباً ۳/۲ درصد از مساحت کل شهر را به خود اختصاص می‌دهد. منطقه ۱۲ شامل ۶ ناحیه و ۱۳ محله می‌باشد که از شمال به خیابان انقلاب، از جنوب به خیابان شوش، از شرق به خیابان ۱۷ شهریور و از غرب به خیابان وحدت اسلامی منتهی می‌شود. علی‌رغم ناپایداری و فرسودگی بخش عمده منطقه به دلیل وجود عناصر قدیمی و با ارزش چون بازار بزرگ تهران با راسته‌ها و سراهای متعدد، بازارچه‌ها، مسجد جامع، مسجد شاه، ارگ سلطنتی، ساختمان‌های بزرگ و معتبر دولتی، سبزه میدان، مراکز متعدد مذهبی و همچنین مراکز فرهنگی در سطح ملی همانند موزه ایران باستان، مدرسه مروی و نیز گذرهای قدیمی متعدد با کوچه‌های تنگ و باریک که از مشخصه‌های بافت قدیمی شهرها است و از آنجا که هسته اولیه و تاریخی شهر است، فضاهای هویتی

مهمی را در خود جای داده‌است. با وجود این، تفاوت قابل ملاحظه‌ای به لحاظ وضعیت اجتماعی، کالبدی، اقتصادی در بین محله‌های منطقه وجود دارد. به طوری که بعضی محله‌ها در مجموع مطلوب‌تر و برخی دیگر در شرایط نابسامانی به سر می‌برند (Cheshmi et al., 2020; Rezaei et al., 2018; Ehlers & Floor, 1993). در نتیجه زیست‌پذیری و شرایط زندگی نیز از یک محله به محله دیگر متفاوت است. در این راستا و با در نظر داشتن مشکلات و مسائل منطقه ۱۲ که قسمت عمده بخش مرکزی شهر تهران را تشکیل می‌دهد، مساله محوری پژوهش حاضر این است که بخش مرکزی تهران که روزگاری مهم‌ترین هسته‌های حیاتی و محله‌های اصلی شهر را دربر داشته‌است، چرا و طی چه فرایندی و تحت تاثیر چه عواملی دچار افت زیست‌پذیری شده‌است؟

مبانی نظری

صاحب‌نظران و اندیشمندان حوزه شهر پیرامون مفهوم زیست‌پذیری نظرات گوناگونی داده‌اند که اغلب تکمیل‌کننده یکدیگرند. آن‌ها سعی داشته‌اند تا با اشاره به مفاهیم و موضوعات مرتبط با زیست‌پذیری و راه‌های رسیدن به آن، این کیفیت را روشن‌تر کنند. برخی از اندیشمندان زیست‌پذیری شهری را به صورت سازگاری بین فرم و فعالیت معرفی می‌کنند. برخی دیگر خاطر نشان می‌کنند که زیست‌پذیری شهرها به این بستگی دارد که هر مکان بستر چه رفتارهای را تأمین می‌کند و تمایلات مردم نسبت به آن‌ها چگونه باشد. بنابراین طبق نظر لنگ زیست‌پذیری به عنوان میزان سازگاری بین محیط و فعالیت‌های صورت گرفته در آن تعریف شده‌است. برخی دیگر از اندیشمندان زیست‌پذیری را به گونه‌ای دیگر توضیح می‌دهند، آن‌ها می‌گویند شهری زیست‌پذیر است که مردم در آن حضور یابند و امکان تعامل با سایرین برایشان فراهم باشد. به طور کلی تعارف زیست‌پذیری و اجتماع زیست‌پذیری شامل مجموعه متنوعی از موضوعات مختلف است که به وسیله یک‌سری اصول راهنما بیان می‌شوند؛ دسترسی، برابری و مشارکت که مفاهیم مربوط به زیست‌پذیری بر مبنای آن‌ها شکل گرفته می‌گیرند. کیفیت زندگی شهروندان به میزان دسترسی آن‌ها به زیرساخت‌ها (حمل‌ونقل، ارتباطات، آب و بهداشت، غذا، هوای پاک، مسکن مناسب، شغل راضی‌کننده و فضای سبز و پارک‌ها) بستگی دارد. زیست‌پذیری یک سکونت‌گاه همچنین به میزان دسترسی ساکنان آن به مشارکت در فرایند تصمیم‌گیری در جهت تأمین نیازهایشان بستگی دارد. زیست‌پذیری یک معنای کلی است که با تعدادی از مفاهیم اصطلاحات دیگر مانند پایداری، کیفیت زندگی، کیفیت مکان و اجتماعات سالم در ارتباط است (Kamp et al., 2003; Van Kamp et al., 2003; Lang, 1994).

از نظر مقالات دیگر معیارهای زیست‌پذیری سکونت‌گاهی به شرح زیر هستند: دسترسی به خدمات و تسهیلات با کیفیت محلی مانند هنرکده‌ها، مدارس، حمل‌ونقل و مراقبت‌های بهداشتی، قابلیت حرکت پیاده، تنوع در قوم، سن، جنس، شرایط اجتماعی-اقتصادی، امنیت، پایداری، فضا و فرصت‌های موجود برای مشارکت اجتماعی، خودمختاری فضاهای خصوصی، احساس افتخار به مالکیت و هویت منحصربه‌فرد، ثبات اقتصادی از نظر تجاری و قیمت مسکن، توجه به ورای شهرها (حومه‌ها و روستاها)، وجود تسهیلات یادگیری در طی عمر، محیط فیزیکی با کیفیت، مشاغل، فرصت‌های زندگی سالم، طراحی شهری، چشم‌اندازها و ابعاد زیباشناختی، هنرهای عمومی، کیفیت هوا، احساس پیوستگی با دیگر محلات، انعطاف ارزش‌های مشترک، مشارکت مدنی، وابستگی به تاریخ و میراث فرهنگی، فعالیت‌های داوطلبانه، مشارکت سیاسی است (Van Kamp et al., 2003; Mousavi et al., 2019).

توسعه پایدار شهری عمدتاً حاصل بحث‌های طرفداران محیط‌زیست درباره مسائل محیط‌زیستی به خصوص محیط‌زیست شهری است که به دنبال نظریه توسعه پایدار برای حمایت از منابع محیطی ارائه شده‌است. در این نظریه موضوع نگهداری منابع برای حال و آینده از طریق استفاده بهینه از زمین و وارد کردن کم‌ترین ضایعات به منابع تجدیدنپذیر مطرح است (Ma et al., 2023; Motaghd et al., 2023). نظریه توسعه پایدار شهری موضوع‌های

جلوگیری از آلودگی‌های محیط شهری و ناحیه‌ای، کاهش ظرفیت‌های تولید محیط محلی، ناحیه‌ای و ملی، حمایت از بازیافت‌ها، عدم حمایت از توسعه‌های زیان‌آور و از بین بردن شکاف میان فقیر و غنی را مطرح می‌کند (Ma et al., 2023; Newman, 1999).

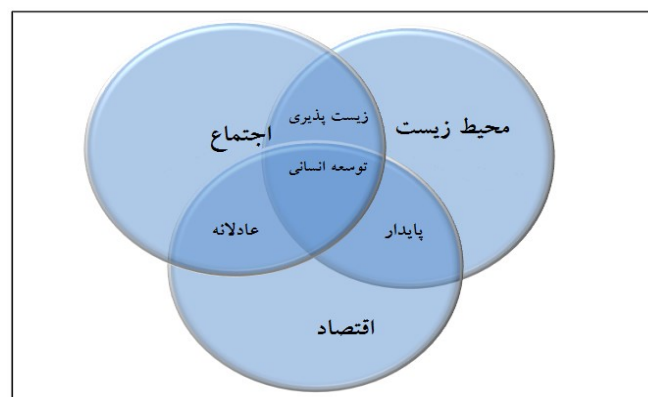
توسعه پایدار شهری به نقل از پیترهال^۱ شکلی از توسعه امروزی است که توان توسعه مداوم شهرها و جوامع شهری نسل‌های آینده را تضمین کند. از نظر کالبدی توسعه پایدار شهری یعنی تغییراتی که در کاربری زمین و سطوح تراکم جهت رفع نیازهای ساکنان شهر در زمینه مسکن، حمل و نقل، اوقات فراغت و غذا به عمل آید تا در طول زمان شهر را از نظر محیط زیستی قابل سکونت و زندگی (هوای پاک، آب آشامیدنی سالم، اراضی و آب‌های سطحی و زیرزمینی بدون آلودگی و غیره)، از نظر اقتصادی بادوام (اقتصاد شهری هماهنگ با تغییرات فنی و صنعتی جهت حفظ مشاغل پایه‌ای و تأمین مسکن مناسب و در حد استطاعت ساکنان، با بار مالیاتی سرانه عادلانه) و از نظر اجتماعی همبسته (الگوهای کاربری اراضی همبستگی اجتماعی و احساس تعلق شهروندان به میراث‌های شهر را ارتقا خواهد داد) نگه دارد. دغدغه اصلی توسعه پایدار تحدید آثار بلندمدت طراحی و برنامه‌ریزی در مقیاسی جهانی است، اما دغدغه اصلی زیست‌پذیری در ارتباط با مکانی خاص و زمان حال می‌باشد. در این میان رویکردی وجود دارد که زیست‌پذیری را جزئی از اجزاء توسعه پایدار می‌داند که در کنار سایر اجزاء سبب تحقق توسعه پایدار خواهد شد (Birch & Wachter, 2011; Clark, 2004; Hall & Pfeiffer, 2013).

شباهت بسیاری بین مفاهیم زیست‌پذیری و پایداری وجود دارد به عنوان مثال هر دو به تأمین نیازها، عدالت و برابری و کیفیت محیط زندگی توجه نشان می‌دهند. در عین حال تفاوت‌های متعددی نیز بین آن‌ها وجود دارد از جمله اینکه زیست‌پذیری بر روی دوره زمانی کوتاه مدت و پایداری بر روی دوره‌های زمانی بلندمدت تمرکز دارند. تمایز بین شاخص‌های زیست‌پذیری با شاخص‌های پایداری در این است که شاخص‌های زیست‌پذیری آنچه که امروز در حال وقوع است، اندازه می‌گیرند. اما شاخص‌های پایداری ظرفیت موجود برای آنچه در آینده رخ خواهد داد را اندازه‌گیری می‌کند (Kazemian et al., 2017). زیست‌پذیری اشاره به زیر مجموعه‌ای از اهداف پایداری دارد که مستقیماً اعضای جامعه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. زیست‌پذیری و پایداری معمولاً دارای اهداف مشترکی هستند اما غالباً دارای چشم‌اندازها و اولویت‌های متعددی هستند. به عنوان مثال هر دو آن‌ها به دنبال کاهش آلودگی هستند، این در حالی است که تمرکز پایداری بر روی گازهای که باعث تغییر اقلیم است و زیست‌پذیری بر روی هوای محلی و آلودگی صوتی تمرکز دارد (Bedi et al., 2023; Van Kamp et al., 2003).

بسیاری از دانشگاهیان و طرفداران گفتمان زیست‌پذیری معتقدند که ایده زیست‌پذیری و پایداری در عمل هم‌پوشانی‌های دارند. اما باید پذیرفت که منطق‌های این دو گفتمان در ارائه اصول در عین هم‌پوشانی با هم یکی نیستند. در حالی که ویلر (1998) پیشنهاد می‌دهد که بهبود فضای عمومی پیاده‌محور، موضوع هر دو گفتمان زیست‌پذیری و پایداری است اما باید پذیرفت که دلایل هر یک از این جنبش‌ها در پذیرش این اصل، متفاوت است (Stephen et al., 1998; Wheeler, 2001). برای رویکرد پایداری دلیل این امر می‌تواند کاهش استفاده از اتومبیل و به دنبال آن کاهش آلودگی‌ها (رویکرد محیط زیستی) و کاهش هزینه رفت‌وآمد (پایداری اقتصادی) و بهبود شرایط حمل‌ونقل برای کسانی باشد که امکان استفاده از وسایل نقلیه را ندارند و در حقیقت به دنبال برقراری عدالت اجتماعی (پایداری اجتماعی) باشد. اما براساس اهداف زیست‌پذیری دلیل افزایش فرصت پیاده‌روی، ایجاد فرصت‌های بیشتر پیاده‌روی به قصد افزایش سلامت فردی از طریق تأمین نیازهای جسمانی افراد برای پیاده‌روی و کاهش خطرات ابتلا به بیماری و تأمین نیازهای روحی افراد به برقراری روابط اجتماعی با استفاده از فضاهای اجتماعی بهتر و ایجاد هویت

^۱ Peter Hall

مبتنی بر مکان منتهی خواهد شد. بنابراین در حالی که هدف (ایجاد و بهبود فضای پیاده) یکی است اما دلایل به وجود آوردن آن می‌تواند کاملاً متفاوت باشد. گادشالک^۱ (2004) این تحلیل را فراتر برده و پیشنهاد می‌دهد که اصول پایداری و زیست‌پذیری ممکن است حتی در تضاد باهم باشند، چرا که تاکید کارگفتمان زیست‌پذیری بر ارتقاء کیفیت زندگی مبتنی بر مکان، وجود ارزش‌های اقتصادی، اجتماعی و سیاسی برای اکنون و در لحظه است و نه در آینده (Godschalk, 2010; Association, 2010; & Anderson, 2012). بنابراین اساساً گفتمان زیست‌پذیری به سمت فایده‌گرایی متمایل است و به تغییراتی که ارزش معاملاتی مکان را در قالب اثرات کالبدی، اقتصادی و یا اجتماعی همراه با جابه‌جایی اجتماعی بالا می‌برد، روی خوش نشان می‌دهد و البته تعجبی هم نیست چرا که بسیاری از مکان‌های ارزشمند و زیست‌پذیر، کمتر در حد توان خرید عموم هستند و این امر تنها با اصلاح سطوح آگاهی و هوشیاری همگانی قابل توصیه و تفسیر است. در حالی که همیشه زیست‌پذیری در جهت پایداری حرکت نمی‌کند ولی استحکام آن در زمانی که در یک چارچوب پایدار مشتمل بر محیط‌زیست، برابری و اقتصاد تعریف شود افزایش می‌یابد. دور و ملیر سؤالات زیادی را در ارتباط با ضدیت پایداری و زیست‌پذیری را در موضوع شهرهای فشرده مطرح نموده‌اند. آن‌ها توضیح می‌دهند که زیست‌پذیری لزوماً معادل پایداری نیست. چنانچه زیست‌پذیری معمولاً روی شرایط موجود در یک محله یا منطقه محدودشهری متمرکز می‌شود. حال آنکه پایداری معمولاً حوزه فضایی گسترده‌تری را مورد توجه قرار می‌دهد. به عنوان مثال سیاست‌های شهر فشرده بر طبق دیدگاه‌های ساکنین زیست‌پذیری را کاهش می‌دهد. زیرا باعث افزایش تراکم و کاهش فضاهای باز افزایش ترافیک و سروصدا و مشکلات مربوط به پارکینگ و مانند آن می‌شود حال آنکه این سیاست‌ها منطبق با اصول پایداری محسوب می‌شوند. یکی از جنبه‌های زیست‌پذیری ابعاد اقتصادی و اجتماعی است. دو مورد اساسی در مورد این چشم انداز وجود دارد: معیشت و پایداری اکولوژیکی. معیشت به معنای کار نزدیک به محل زندگی، دستمزدهای متناسب با کرایه‌ها و دسترسی به خدماتی که برای ایجاد یک سکونتگاه سالم ضروری به نظر می‌رسند. پایداری اکولوژیکی به این معنی است که معیشت باید پایدار باشد بدین معنی که اگر مشکل مسکن و کار تنها از طریق حل قابل حل باشد که موجب تخریب محیط‌زیست گردد باید مسئله را به نحو صحیح و فاقد تهدید محیط حل نمود. اصول زیست‌پذیری غالباً شامل اهداف محیط زیستی، اقتصادی و برابری می‌باشد که در واقع اجزای مورد نیاز برای حرکت به سمت پایداری است. پایداری و زیست‌پذیری دارای همپوشی‌های اساسی باهم هستند و در واقع بهبود پایداری موجب بهبود زیست‌پذیری می‌شود (Alzaim et al., 2024; Evans, 2002).



شکل ۱. نقش تعامل بین محیط‌زیست، اجتماع و اقتصاد در شکل‌گیری زیست‌پذیری (یافته‌های نگارنده، ۱۴۰۵)

Figure 1. The role of interaction between environment, society, and economy in shaping livability (Author's findings, 1405)

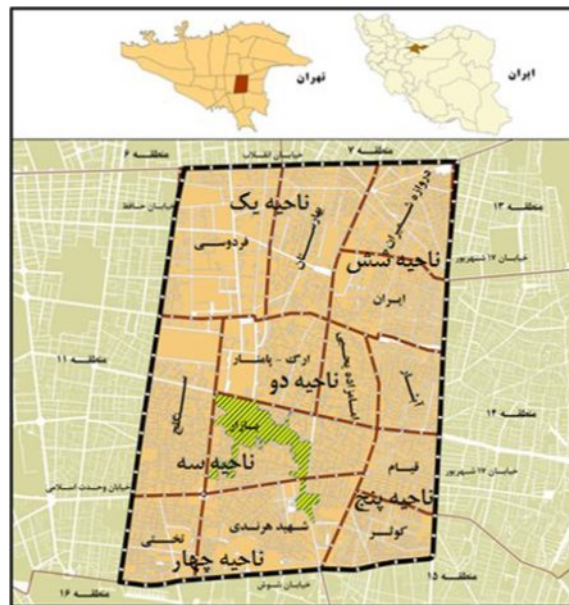
¹ Godschalk

روش‌شناسی پژوهش

تحقیق از نظر روش و ماهیت توصیفی-تحلیلی بوده و از حیث هدف پژوهش در دسته تحقیقات کاربردی قرار دارد. برای جمع‌آوری اطلاعات پژوهش، مطالعات کتابخانه‌ای و میدانی انجام گرفته که ابزارهای مطالعات میدانی، شامل مشاهده، مصاحبه و پرسشنامه بوده است. جامعه آماری این پژوهش شامل کارشناسان شهرداری منطقه ۱۲ تهران می‌باشد و روش نمونه‌گیری تصادفی خوشه‌ای است. برای تجزیه و تحلیل اطلاعات از تکنیک تاپسیس استفاده شده است. در روش در این الگوریتم، فرض بر این است که مطلوبیت هر شاخص به طور یکنواخت افزایشی (یا کاهش) است. بدان صورت که بهترین ارزش موجود از یک شاخص نشان‌دهنده ایده‌آل مثبت بوده و بدترین ارزش موجود از آن مشخص کننده ایده‌آل منفی خواهد بود. همچنین شاخص‌ها مستقل از هم هستند. در ضمن فاصله یک گزینه از ایده‌آل مثبت (یا منفی) ممکن است به صورت اقلیدسی از (توان دوم) و یا به صورت مجموع قدر مطلق از فواصل خطی (معروف به فواصل بلوکی) محاسبه گردد، که این امر بستگی به تبادل و جایگزینی در بین شاخص‌ها دارد. جهت بهره‌برداری از این تکنیک، مراحل زیر به اجرا گذاشته می‌شود (Kabir & Thakurta, 2024; Opricovic & Tzeng, 2004; Saha et al., 2022).

محدوده مورد مطالعه

محدوده منطقه ۱۲ با مساحت ۱۶۰۰ هکتار است و عمر ۷۳ درصد بافت این منطقه بیش از ۲۰۰ سال می‌باشد. ۳/۴۳ درصد منطقه از گستره‌ها و پهنه‌های شاخص تشکیل شده و در ۵/۱۵ درصد از طول لبه‌های شهری (سیمای خیابان) هنوز بدنه‌های ارزشمند یافت می‌شود (مجموع طول خیابان‌های اصلی منطقه نزدیک به ۵۸ کیلومتر است). منطقه ۱۲ از شمال به خیابان انقلاب دارای نقاط عطف میدان فردوسی، پیچ شمیران، لاله‌زار، پل چوبی، از غرب به خیابان حافظ و خیابان وحدت اسلامی با نقاط عطف میدان تاریخی حسن‌آباد (هشت گنبدان)، میدان وحدت اسلامی (شاهپور)، چهارراه وحدت اسلامی (چهارراه شاهپور) و از جنوب به خیابان شوش با نقاط عطف خیابان جهان‌پهلوان تختی، یخچال و میدان غار و از شرق خیابان ۱۷ شهریور (شهباز سابق) با نقاط عطف خیابان شهید کفایی امانی و خیابان خورشید، خیابان مجاهدین، زیرگذر امیرکبیر و اتوبان شهید محلاتی محدود می‌شود (Kangarani Farahani et al., 2021). این منطقه با قدمتی به تاریخچه تهران و بناهایی زیبا که بافت تجاری آن غلبه‌ی سیری‌ناپذیری را در این منطقه پیدا کرده، ولی هنوز صفا و صمیمیت محلات آن تداعی‌کننده تهران قدیم در اذهان است. منطقه‌ای با مساجد عظیم و متبرک و زیبا با امامزاده‌هایی از سلاله ائمه اطهار (ع) و مهم‌تر از آن محبان اهل بیت عصمت و طهارت که کوچه‌به‌کوچه و محله به محله آن را به محبت اهل بیت (ع) مصفا و حسینی و تکیه و هیئت بنا کرده‌اند و آتشکده‌های آن نیز علی‌رغم تاریخ کهن مکان عبادی و زیارتی عزیزان اقلیت دینی کشور است. کاروانسرای خانان در چهارراه مولوی که معروف به نگین گردشگری تهران است بسیار جالب و دیدنی می‌باشد (Pour Ahmad et al., 2021).



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی منطقه ۱۲ شهرداری تهران (شهرداری منطقه ۱۲، ۱۳۹۷)

Figure 2. Geographical location of District 12 of Tehran Municipality (District 12 Municipality, 2018)

یافته‌ها و بحث

باتوجه به بررسی زیست‌پذیری شهرها در راستای توسعه پایدار شهری (منطقه ۱۲ شهرداری تهران) ۲۰ شاخص از وضعیت موجود منطقه استخراج شده‌است که بعد از دادن امتیاز به شاخص‌ها، ۲۰ شاخص را به اعداد استاندارد تبدیل کرده و فاصله هر شاخص را تا حد ایده‌آل و غیرایده‌آل تعیین نموده و در نهایت به رتبه‌بندی شاخص‌ها می‌پردازیم که به شرح زیر می‌باشد. در این مرحله برای رتبه‌بندی هر یک از شاخص‌های مورد ارزیابی از تکنیک چندمعیاره تاپسیس استفاده شده‌است که مراحل اجرای آن این‌گونه است که:

بعد از محاسبه وزن شاخص‌ها، اعداد نرمالیزه شده را در وزن هر یک از شاخص‌ها ضرب شده و ماتریس استاندارد داده‌ها ایجاد خواهد شد:

$$W = \{W_1, W_2, \dots, W_n\} \quad W_{mn} = W_n R_{mn}$$

تعیین راه حل ایده‌آل و ایده‌آل منفی:

در این مرحله با استفاده از داده‌های ماتریس استاندارد، بالاترین عملکرد و پایین‌ترین عملکرد (A^-) هر شاخص از رابطه‌های زیر محاسبه می‌گردد:

$$A^+ = \{(Max \ V_{ij} | j \in J), (Min \ V_{ij} | i \in J^-) | i = \{1, 2, 3, \dots, m\}\} \quad J = \{1, 2, 3, \dots, n\}$$

$$A^- = \{(Min \ V_{ij} | j \in J), (Max \ V_{ij} | i \in J^-) | i = \{1, 2, 3, \dots, m\}\} \quad J^- = \{1, 2, 3, \dots, n\}$$

محاسبه اندازه فاصله هر گزینه از ایده‌آل و ایده‌آل منفی:

در این مرحله اقدام به تعیین معیار فاصله‌ای برای آلترناتیوهای حداکثر و حداقل می‌شود، که فرمول محاسبه آن به شرح زیر می‌باشد:

$$di+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2}$$

$$di- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2}$$

براساس فرمول بالا اقدام به تعیین فاصلی نسبی تا برترین معیار می‌شود سپس براساس آن انواع معیارها از لحاظ حداکثر و حداقل رتبه بندی می‌شود.

جدول ۱. ماتریس شاخص‌ها زیست‌پذیری محلات منطقه ۱۲ تهران

Table 1. Matrix of Livability Indicators for Neighborhoods in Tehran's District 12

موردلحاظ	بازار	مدرسه	تجارت	آب‌رسان	سنگلج	پارک	دروازه شهیدان	تفریح	فرهنگی	فرهنگی	فرهنگی	فرهنگی	فرهنگی	فرهنگی
۳/۲۷	۳/۱۷	۳/۶۴	۳/۷۷	۳/۶۵	۳/۲۳	۳/۶۷	۳/۵۴	۳/۳۷	۴/۵۸	۴/۴۲	۳/۳۷	۳/۵۲	۳/۴	امنیت فردی و اجتماعی
۳/۰۸	۳/۱۱	۳/۱۳	۳/۱۹	۳/۲۱	۳/۱۴	۳/۲۴	۳/۱۹	۳/۱۱	۳/۸۷	۳/۶۱	۳/۴۱	۳/۴۱	۳/۳۸	مسکن با کیفیت خوب
۲/۲۱	۲/۴۸	۲/۶۸	۳/۱۱	۳/۱۷	۳/۲۵	۳/۱۱	۳/۲۴	۳/۲۷	۳/۹۴	۳/۶۷	۳/۲۴	۳/۱۴	۳/۱۱	آلودگی‌های محیطی
۲/۱۳	۲/۷۸	۲/۶۸	۳/۱۱	۳/۱۷	۳/۲۵	۳/۱۶	۳/۲۴	۳/۲۷	۳/۹۴	۳/۶۷	۳/۲۴	۳/۱۴	۳/۱۶	ایستگاه‌های حمل و نقل عمومی
۲/۱۲	۲/۷۸	۳/۶۸	۳/۰۱	۳/۱	۳/۱۵	۳/۲۴	۳/۲۴	۳/۲۷	۳/۹۴	۳/۶۷	۳/۲۴	۳/۲۴	۳/۱۷	امکانات تفریحی و اوقات فراغت
۲/۲۳	۲/۷۸	۲/۶۸	۳/۱۱	۳/۱۷	۳/۲۵	۳/۱۸	۲/۲۳	۳/۱۱	۳/۹۱	۳/۷۱	۳/۳۴	۳/۱۴	۳/۱۱	کیفیت آب شرب
۲/۲۴	۲/۰۴	۲/۶	۲/۷۹	۲/۹۷	۲/۸۴	۲/۶۷	۲/۵۷	۲/۸۷	۳/۷۱	۳/۵۸	۳/۳۷	۳/۳۷	۳/۱۶	جمع‌آوری زباله و فاضلاب
۲/۲۷	۳/۳۷	۲/۶۷	۳/۰۸	۲/۵۹	۲/۵۹	۳/۰۴	۳/۲۷	۳/۲۸	۳/۸۴	۳/۶۳	۲/۶۷	۳/۰۴	۲/۲۷	فضاهای آموزشی
۲/۳۴	۳/۱۴	۲/۳	۲/۴۹	۲/۴	۳/۳۷	۲/۸۴	۲/۸۷	۲/۹۷	۳/۶۷	۳/۷۸	۲/۵۹	۲/۵۹	۳/۰۴	حس تعلق مکانی
۲/۱۴	۲/۱۷	۲/۳	۲/۶۴	۲/۱۵	۲/۸۴	۲/۲۱	۲/۴۷	۲/۵۵	۳/۷۴	۳/۶۶	۲/۸۸	۲/۸۸	۲/۷۱	مشارکت دادن شهروندان
۲/۱۱	۲/۳۱	۱/۹۴	۲/۲۲	۲/۰۸	۲/۲۱	۲/۴۴	۲/۳۴	۲/۱۷	۳/۴	۳/۵	۲/۵۴	۲/۴۴	۲/۴۲	کاربری‌های سازگار با محیط
۲/۴۱	۲/۳۸	۲/۴۷	۳/۵	۲/۵۵	۲/۶۶	۲/۷۷	۲/۶۶	۳/۸۲	۳/۶۶	۳/۶۴	۳/۲۷	۳/۲۲	۳/۲۱	دسترسی به شغل مناسب
۲/۵۲	۲/۴۴	۳/۰۶	۳/۲۸	۳/۲۸	۳/۱۳	۳/۲۲	۳/۳۳	۳/۳۴	۴/۱۲	۴/۱۷	۳/۵	۳/۵	۳/۵۳	تأسیسات و تجهیزات منطقه
۲/۶۲	۲/۵۷	۲/۸۸	۳/۲۷	۳/۰۳	۳/۴	۲/۹۴	۳/۱۵	۲/۵۳	۳/۷۱	۳/۶۱	۳/۴۴	۳/۳۴	۳/۲۶	دسترسی به فضاهای باز
۲/۶۹	۳/۰۱	۳/۴۴	۲/۴۵	۳/۳۱	۳/۱۵	۳/۰۲	۳/۳۴	۳/۲۲	۳/۷۴	۳/۶۴	۳/۲۸	۳/۲۸	۳/۴۳	فضای سبز و عمومی
۲/۲۱	۲/۴۷	۳/۱	۲/۹۱	۲/۹۵	۱/۹۹	۲/۲۵	۲/۶۲	۲/۹۷	۳/۶۲	۳/۵۱	۳/۲۸	۳/۱۸	۳/۱۳	حکمرانی شهری
۲/۳	۲/۴۸	۲/۲۴	۲/۲۶	۲/۰۷	۲/۱۵	۲/۴۱	۲/۵۲	۲/۵۶	۳/۸۲	۳/۶۵	۲/۶۷	۲/۶۷	۳/۶۹	تعاملات اجتماعی
۲/۱۴	۲/۳۴	۲/۱۶	۲/۳۷	۲/۲۷	۲/۰۹	۲/۴۵	۲/۱۵	۲/۱	۳/۱۶	۳/۳۷	۲/۴۸	۲/۵۱	۲/۴۲	نظافت و تمیزی فضای عمومی
۲/۴۷	۲/۸	۲/۷۷	۲/۸۷	۲/۶۶	۲/۷۴	۲/۱۵	۲/۶۷	۲/۳۴	۳/۵۴	۳/۹۴	۲/۹۲	۲/۷۴	۲/۷۵	کیفیت فضای عمومی
۲/۲۲	۲/۱۹	۲/۵۸	۲/۴۸	۲/۴۸	۲/۴۴	۲/۵۱	۲/۷۵	۲/۶۹	۳/۰۱	۳/۱۲	۲/۹۱	۲/۹۱	۲/۲۷	عدالت اجتماعی

منبع: (یافته‌های نگارنده، ۱۴۰۵)

مقادیر شاخص‌های زیست‌پذیری محلات به توان ۲ رسانده می‌شود تا جدول شماره ۲ شکل بگیرد.

جدول ۲. ماتریس مجذور شده شاخص های زیست پذیری منطقه ۱۲ تهران

Table 2. Squared Matrix of Livability Indicators for Tehran's District 12

مودلajan	بازار	کوثر	قیام	ایران	سنگلج	پامنار	دروازه شمیران	بهارستان	هرندی	تختی	فردوسی	امام زاده یحیی	هرندی	TOPSIS
۰/۰۶۵	۰/۰۶۳	۰/۰۷۲	۰/۰۷۵	۰/۰۷۲	۰/۰۶۴	۰/۰۷۳	۰/۰۷۰	۰/۰۶۷	۰/۰۹۱	۰/۰۸۷	۰/۰۶۷	۰/۰۷۰	۰/۰۶۷	امنیت فردی و اجتماعی
۰/۰۶۷	۰/۰۶۷	۰/۰۶۸	۰/۰۶۹	۰/۰۷۰	۰/۰۶۸	۰/۰۷۰	۰/۰۶۹	۰/۰۶۷	۰/۰۸۴	۰/۰۷۸	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۳	مسکن با کیفیت خوب
۰/۰۵۱	۰/۰۵۷	۰/۰۶۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۳	۰/۰۷۵	۰/۰۷۱	۰/۰۷۴	۰/۰۷۵	۰/۰۹۰	۰/۰۸۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۲	۰/۰۷۱	آلودگی های محیطی
۰/۰۴۸	۰/۰۶۳	۰/۰۶۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۲	۰/۰۷۴	۰/۰۷۲	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۹۰	۰/۰۸۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۱	۰/۰۷۲	ایستگاه های حمل و نقل عمومی
۰/۰۴۸	۰/۰۶۴	۰/۰۶۱	۰/۰۶۹	۰/۰۷۱	۰/۰۷۲	۰/۰۷۱	۰/۰۷۴	۰/۰۷۵	۰/۰۹۰	۰/۰۸۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۳	امکانات تفریحی و اوقات فراغت
۰/۰۵۱	۰/۰۶۳	۰/۰۶۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۲	۰/۰۷۴	۰/۰۷۲	۰/۰۷۳	۰/۰۷۱	۰/۰۸۹	۰/۰۸۴	۰/۰۷۶	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	کیفیت آب شرب
۰/۰۵۵	۰/۰۵۰	۰/۰۶۴	۰/۰۶۸	۰/۰۷۳	۰/۰۷۰	۰/۰۶۵	۰/۰۶۳	۰/۰۷۰	۰/۰۹۱	۰/۰۸۸	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳	۰/۰۷۷	جمع آوری زباله و فاضلاب
۰/۰۵۷	۰/۰۶۰	۰/۰۶۷	۰/۰۷۸	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۰۷۷	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳	۰/۰۹۷	۰/۰۹۲	۰/۰۶۷	۰/۰۵۲	۰/۰۵۷	فضاهای آموزشی
۰/۰۵۸	۰/۰۷۸	۰/۰۵۷	۰/۰۶۲	۰/۰۵۹	۰/۰۸۳	۰/۰۷۰	۰/۰۷۱	۰/۰۷۴	۰/۰۹۱	۰/۰۹۴	۰/۰۶۴	۰/۰۶۴	۰/۰۷۵	حس تعلق مکانی
۰/۰۵۸	۰/۰۶۲	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۵۸	۰/۰۷۶	۰/۰۵۹	۰/۰۶۶	۰/۰۶۸	۰/۱۰۰	۰/۰۹۸	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۳	مشارکت دادن شهروندان
۰/۰۶۲	۰/۰۶۸	۰/۰۵۷	۰/۰۶۵	۰/۰۶۱	۰/۰۶۵	۰/۰۷۲	۰/۰۶۹	۰/۰۶۴	۰/۱۰۰	۰/۱۰۳	۰/۰۷۴	۰/۰۷۲	۰/۰۷۱	کاربری های سازگار با محیط
۰/۰۵۸	۰/۰۵۸	۰/۰۶۰	۰/۰۶۲	۰/۰۶۲	۰/۰۶۵	۰/۰۶۷	۰/۰۶۵	۰/۰۶۸	۰/۰۸۹	۰/۰۸۸	۰/۰۷۹	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	دسترسی به شغل مناسب
۰/۰۵۴	۰/۰۵۳	۰/۰۶۶	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۶۷	۰/۰۶۹	۰/۰۷۲	۰/۰۸۹	۰/۰۸۹	۰/۰۹۰	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۶	تأسیسات و تجهیزات منطقه
۰/۰۶۰	۰/۰۵۹	۰/۰۶۶	۰/۰۵۷	۰/۰۶۹	۰/۰۷۸	۰/۰۶۷	۰/۰۷۲	۰/۰۸۵	۰/۰۸۵	۰/۰۸۳	۰/۰۷۹	۰/۰۷۶	۰/۰۷۵	دسترسی به فضاهای باز
۰/۰۵۸	۰/۰۶۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۲	۰/۰۶۸	۰/۰۶۶	۰/۰۷۳	۰/۰۷۰	۰/۰۸۱	۰/۰۷۹	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۵	فضای سبز و عمومی
۰/۰۵۵	۰/۰۶۱	۰/۰۷۷	۰/۰۷۲	۰/۰۷۳	۰/۰۵۰	۰/۰۵۶	۰/۰۶۵	۰/۰۷۴	۰/۰۹۰	۰/۰۸۷	۰/۰۸۲	۰/۰۷۹	۰/۰۷۸	حکمرانی شهری
۰/۰۶۳	۰/۰۶۸	۰/۰۶۱	۰/۰۶۲	۰/۰۵۹	۰/۰۵۹	۰/۰۶۶	۰/۰۶۹	۰/۰۷۰	۰/۱۰۵	۰/۱۰۰	۰/۰۷۳	۰/۰۷۳	۰/۰۷۴	تعاملات اجتماعی
۰/۰۶۳	۰/۰۶۹	۰/۰۷۰	۰/۰۷۰	۰/۰۶۷	۰/۰۶۱	۰/۰۷۲	۰/۰۶۳	۰/۰۶۲	۰/۰۹۳	۰/۰۹۹	۰/۰۷۳	۰/۰۷۴	۰/۰۷۱	نظافت و تمیزی فضای عمومی
۰/۰۶۳	۰/۰۷۱	۰/۰۷۰	۰/۰۷۳	۰/۰۶۸	۰/۰۷۰	۰/۰۵۵	۰/۰۶۸	۰/۰۹۰	۰/۰۹۰	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۰	۰/۰۷۰	کیفیت فضای عمومی
۰/۰۶۰	۰/۰۶۰	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶۷	۰/۰۶۹	۰/۰۷۵	۰/۰۷۴	۰/۰۸۲	۰/۰۸۵	۰/۰۸۰	۰/۰۸۰	۰/۰۶۲	عدالت اجتماعی

منبع: (یافته های نگارنده، ۱۴۰۵)

مقادیر اصلی شاخص های بدست آمده در جذر به دست آمده همان شاخص به دست می آید این مقادیر به دست آمده داده های نرمال شده شاخص های اصلی می باشند که فاقد مقیاس هستند.

جدول ۳. ماتریس نرمال شده وزنی شاخص های زیست پذیری منطقه ۱۲ شهرداری تهران

Table 3. Weighted Normalized Matrix of Liveability Indicators for District 12 of Tehran Municipality

مودلajan	بازار	کوثر	قیام	ایران	سنگلج	پامنار	دروازه شمیران	بهارستان	هرندی	تختی	فردوسی	امام زاده یحیی	هرندی	TOPSIS
۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲۴	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۵	امنیت فردی و اجتماعی
۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۷	مسکن با کیفیت خوب
۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۲۶	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲۶	آلودگی های محیطی
۰/۱۸	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	ایستگاه های حمل و نقل عمومی
۰/۱۸	۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	امکانات تفریحی و اوقات فراغت
۰/۱۹	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲۶	کیفیت آب شرب
۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۲۹	جمع آوری زباله و فاضلاب
۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۲۹	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۶	۰/۳۴	۰/۲۵	۰/۱۹	۰/۲۱	فضاهای آموزشی
۰/۲۱	۰/۲۹	۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۳۱	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۸	حس تعلق مکانی
۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۱	۰/۲۸	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۳۷	۰/۳۶	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۷	مشارکت دادن شهروندان
۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۳۷	۰/۳۸	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۲۶	کاربری های سازگار با محیط
۰/۲۲	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۳۱	۰/۲۳	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۹	دسترسی به شغل مناسب

۰/۲۰	۰/۱۹	۰/۲۴	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	تأسیسات و تجهیزات منطقه
۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۲۶	۰/۲۹	۰/۲۵	۰/۲۷	۰/۲۱	۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۸	دسترسی به فضاهای باز
۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۲۴	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۸	فضای سبز و عمومی
۰/۲۰	۰/۲۳	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۲۴	۰/۲۷	۰/۳۳	۰/۳۲	۰/۳۰	۰/۲۹	۰/۲۹	حکمرانی شهری
۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۳۸	۰/۳۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	تعاملات اجتماعی
۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۳۴	۰/۳۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۶	نظافت و تمیزی فضای عمومی
۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۲۲	۰/۳۳	۰/۳۷	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۲۶	کیفیت فضای عمومی
۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۲۳	عدالت اجتماعی

منبع: (یافته‌های نگارنده، ۱۴۰۵)

شناسایی راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی از طریق شاخص‌های زیست‌پذیری منطقه ۱۲ وزنی نرمال شده بدست می‌آید. در این ماتریس براساس شاخص‌ها یعنی مثبت یا منفی بودن آن‌ها، گزینه ایده‌آل و غیرایده‌آل بدست می‌آید.

جدول ۴. ایده‌آل‌های مثبت و منفی برای هر شاخص زیست‌پذیری

Table 4. Positive and Negative Ideals for Each Livability Indicator

Di+	Di-	CLi	رتبه	محلات
۰/۰۲۵	۰/۰۰۳	۰/۰۸۲	۱۴	هرندی
۰/۰۲۵	۰/۰۰۷	۰/۲۲۰	۱۳	امامزاده یحیی
۰/۰۱۸	۰/۰۰۷	۰/۲۳۲	۱۲	فردوسی
۰/۰۲۳	۰/۰۱۴	۰/۴۲۶	۶	تختی
۰/۰۱۹	۰/۰۱۰	۰/۳۱۴	۱۱	هرندی
۰/۰۲۰	۰/۰۱۳	۰/۴۱۸	۷	بهارستان
۰/۰۱۸	۰/۰۱۳	۰/۳۸۹	۱۰	دروازه شمیران
۰/۰۱۸	۰/۰۱۴	۰/۴۳۳	۵	پامنار
۰/۰۰۱	۰/۰۱۵	۰/۴۴۵	۴	سنگلج
۰/۰۰۳	۰/۰۳۰	۰/۹۶۷	۱	ایران
۰/۰۱۶	۰/۰۲۸	۰/۹۱۴	۲	قیام
۰/۰۲۰	۰/۰۱۶	۰/۴۸۷	۳	کوثر
۰/۰۱۹	۰/۰۱۴	۰/۴۱۷	۹	بازار
۰/۰۲۸	۰/۰۱۳	۰/۴۱۷	۸	عودلاجان

منبع: (یافته‌های نگارنده، ۱۴۰۵)

در این مرحله با توجه به نوع شاخص (از نظر مثبت یا منفی بودن) فاصله هر معیار یا راه‌حل با راه‌حل ایده‌آل و راه غیرایده‌آل محاسبه شده است و محلات مورد بررسی را به صورت نزولی مرتب شده‌اند. هرچقدر مقدار C بزرگ‌تر باشد بهترین راه حل ایده‌آل محسوب می‌شود. براساس داده‌های بررسی شده در مورد زیست‌پذیری محلات منطقه ۱۲ تهران محله ایران با ۰/۹۶۷ امتیاز رتبه یک و محله قیام با امتیاز ۰/۹۱۴ بیشترین امتیاز زیست‌پذیر بودن را به خود اختصاص دادند. در مقابل محله هرندی و امامزاده یحیی به ترتیب با ۰/۰۸۲ و ۰/۲۲۰ کمترین امتیاز به خود اختصاص دادند و آخرین رتبه از نظر زیست‌پذیری را به خود اختصاص دادند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که زیست‌پذیری شهری به عنوان یک مفهوم کلیدی، نقش واسطه‌ای بین شرایط موجود شهری و اهداف گسترده‌تر توسعه پایدار شهری ایفا می‌کند. بر اساس یافته‌های حاصل از تکنیک تاپسیس، تفاوت‌های قابل توجهی در سطح زیست‌پذیری محلات منطقه ۱۲ تهران مشاهده شد. محله ایران با امتیاز ۰/۹۶۷ در بالاترین سطح و محله هرنندی با امتیاز ۰/۰۸۲ در پایین‌ترین سطح زیست‌پذیری قرار دارند. این نابرابری‌های فضایی نشان‌دهنده الگوهای نابرابر توسعه شهری در منطقه است و لزوم مداخلات هدفمند برنامه‌ریزی را آشکار می‌سازد.

از میان شاخص‌های مورد بررسی، «مسکن با کیفیت خوب» بیشترین تأثیر را در زیست‌پذیری محلات داشته است. پس از آن، «کیفیت محیط فیزیکی و کاربری‌های سازگار با محیط» و «کیفیت زیرساخت‌های شهری» به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. در مقابل، شاخص‌های «کاهش آلودگی‌های محیطی»، «دسترسی به خدمات مالی» و «فرصت‌های شغلی» امتیازات پایین‌تری کسب کردند که نشان‌دهنده ضعف در این ابعاد است.

نتایج این تحقیق تأیید می‌کند که توسعه پایدار شهری نه تنها از طریق راهبردهای بلندمدت محیط زیستی محقق نمی‌شود، بلکه نیازمند بهبود فوری و عملیاتی شرایط زندگی روزمره ساکنان است. بنابراین، ارتقای زیست‌پذیری باید به عنوان یک رویکرد عملی و قابل‌اندازه‌گیری برای پیشبرد اهداف پایداری در بافت‌های تاریخی و مرکزی شهرها مانند منطقه ۱۲ تهران در نظر گرفته شود.

از سوی دیگر نگاهی به مطالعات و پژوهش‌های انجام شده از دو جهت، پژوهش حاضر را متمایز می‌سازد: اول، ابعاد و شاخص‌های مورد مطالعه پژوهش حاضر می‌باشد که نسبت به سایر مطالعات مشابه، کامل‌تر و جامع‌تر و در برگیرنده ابعاد متنوع‌تری می‌باشد. دوم، تلاش برای درک علل، فرآیندها و زمینه‌های تأثیرگذار و بوجود آورنده زیست‌پذیری می‌باشد. چراکه اکثریت تحقیقات انجام شده درباره زیست‌پذیری شهری اساساً به تعریف، ابعاد، شاخص‌ها و روش‌های اندازه‌گیری این مفهوم پرداخته‌اند.

به منظور بهبود زیست‌پذیری در منطقه ۱۲ تهران، پیشنهاد می‌شود که سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری سرمایه‌گذاری در حوزه‌های زیر را در اولویت قرار دهند:

- بهبود کیفیت مسکن: با تأکید بر نوسازی بافت‌های فرسوده محلات منطقه ۱۲ و تأمین مسکن ارزان‌قیمت برای اقشار کم‌درآمد
 - حفظ کاربری‌های موجود: از طریق ممانعت و جلوگیری از تغییر بیشتر کاربری‌ها در منطقه، اختلاط کاربری‌ها
 - ارتقای کیفیت محیط زیست: از طریق کاهش آلودگی‌های هوا و صدا به دلیل افزایش جمعیت روزانه به سمت بازار، افزایش فضای سبز و مدیریت پایدار پسماند
 - توسعه حمل‌ونقل عمومی: با گسترش شبکه حمل‌ونقل و بهبود دسترسی به ایستگاه‌های موجود چون مترو، اتوبوس و تاکسی
 - افزایش فرصت‌های شغلی: با حمایت از کسب‌وکارهای کوچک و محلی براس ساکنان منطقه
 - تقویت مشارکت شهروندی: از طریق ایجاد سازوکارهای مشارکت محلی و توانمندسازی ساکنان
 - ارتقای عدالت اجتماعی: با توزیع عادلانه خدمات و امکانات منطقه‌ای در بین تمام محلات
- اجرای این اقدامات نه تنها کیفیت زندگی ساکنان را بهبود می‌بخشد، بلکه پایداری و تاب‌آوری طولانی‌مدت منطقه را نیز تقویت می‌کند. همچنین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، روابط پویا بین شاخص‌های زیست‌پذیری مورد بررسی قرار گیرد، مطالعات تطبیقی بین مناطق مختلف شهری تهران انجام شود و چارچوبی جامع برای پایش و ارزیابی پیشرفت به سوی اهداف توسعه پایدار شهری تدوین گردد.

References

- Ahmed, N. O., El-Halafawy, A. M., & Amin, A. M. (2019). A critical review of urban livability. *European journal of sustainable development*, 8(1), 165-165. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2019.v8n1p165>
- Almulhim, A. I., & Cobbinah, P. B. (2024). Urbanization provocateur: Reaching urban planning-led development in Saudi Arabia. *Land use policy*, 147, 107365. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107365>
- Alzaim, M. A., AlAli, M., Mattar, Y., & Samara, F. (2024). Integrated Framework for enhancing Liveability and Ecological Sustainability in UAE communities. *Sustainability*, 16(22), 9872. <https://doi.org/10.3390/su16229872>
- Association, A. P. (2010). *Sustaining Places: The Role of the Comprehensive Plan*. In: David R. Godschalk, FAICP y William R. Anderson, FAICP.
- Bedi, C., Kansal, A., & Mukheibir, P. (2023). A conceptual framework for the assessment of and the transition to liveable, sustainable and equitable cities. *Environmental Science & Policy*, 140, 134-145. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.11.018>
- Birch, E. L., & Wachter, S. M. (2011). *Global urbanization*. University of Pennsylvania Press.
- Chakraborty, S., Fukuda, T., & Ji, S. (2025). Integrated framework for sustainable urban development: bridging morphology, sustainability, and design. *International Journal of Innovation Science*, 17(4), 936-998. <https://doi.org/10.1108/IJIS-06-2024-0161>
- Cheshmi, M., Hqzad, A., Ramezanipour, M., & Ebrahimi, L. (2020). Investigation of Livability Indices in historical and Worn-Out Texture of Urban Neighborhoods Case study: District 12 of Tehran Metropolis. *Sustainable city*, 3(3), 87-101. <http://doi.org/10.22034/JSC.2020.210506.1160>
- Clark, D. (2004). *Urban world/global city* (2nd ed.). Routledge.
- Ehlers, E., & Floor, W. (1993). Urban change in Iran, 1920–1941. *Iranian studies*, 26(3-4), 251-275. <https://doi.org/10.1080/00210869308701801>
- Evans, P. (2002). *Livable cities?: Urban struggles for livelihood and sustainability*. Univ of California Press. <https://doi.org/10.1017/S1537592703640429>
- Godschalk, D. R., & Anderson, W. R. (2012). *Sustaining places: the role of the comprehensive plan*. American Planning Association.
- Hall, P., & Pfeiffer, U. (2013). *Urban future 21: a global agenda for twenty-first century cities*. Routledge.
- Kabir, K. A., & Thakurta, P. K. G. (2024). Synergizing AHP, TOPSIS MCDM techniques with GIS for inclusive land suitability evaluation in sustainable development. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/5.0214686>
- Kamp, I., Leidelmeijer, K., & Marsman, G. (2003). Urban environmental quality and human well-being: Towards a conceptual framework and demarcation of concepts; a literature study. *Landscape and Urban Planning*. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00232-3](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00232-3)
- Kangarani Farahani, M., Basirat, M., & Sharafi, M. (2021). Defining an optimal framework for achieving creative regeneration in the historic fabric of Tehran. *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*, 9(3), 615-635. <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2021.313333.1400>
- Kazemian, G., Rasouli, A., & Khazaei, M. (2017). New and renewable energies position in creating viable cities, case study Tehran city. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22285229.1396.8.29.6.0>
- Lang, J. (1994). *Urban design: the American experience*. John Wiley & Sons.
- Ma, J., Han, Z., Liu, Y., Sairjiang, H., Yan, L., Wang, H., Jiang, J., Li, X., & Luan, C. (2023). *Theoretical Model for Urban Sustainability Planning Based on Metabolic Concepts*.

- International Conference on Urban Climate, Sustainability and Urban Design. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8401-1_53
- Motaghed, M., Sajadzadeh, H., & Izadi, M. S. (2023). Explaining the Concept of Urban Green Network from the Perspective of Different Sciences by Developing a Theoretical Framework. *Geography and Environmental Planning*, 34(3), 65-94. <https://doi.org/10.22108/gep.2022.133689.1526>
- Mousavi, N. S. A., Varesi, H. R., & Mohammadi, J. (2019). The Application of Multi-criteria Decision Making Models for Assessing the Livability of Metropolitan Areas of Tehran. <https://www.magiran.com/p2011960>
- Newman, P. W. (1999). Sustainability and cities: extending the metabolism model. *Landscape and urban planning*, 44(4), 219-226. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(99\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(99)00009-2)
- Opricovic, S., & Tzeng, G.-H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European journal of operational research*, 156(2), 445-455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
- Pour Ahmad, A., Hataminejad, H., Modiri, M., & Azimzadeh Irany, A. (2021). Analysis of urban historical fabrics, in opposition to human hazards Case Study: Tehran, 12th municipal district. *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*, 9(3), 589-613. <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2020.287066.1143>
- Rezaei, N., Rasouli, M., & Azhdari, B. (2018). The attitude of the local community to the impact of building reuse: Three cases in an Old Neighborhood of Tehran. *Heritage & Society*, 11(2), 105-125. <https://doi.org/10.1080/2159032X.2019.1583805>
- Roka, K. (2020). Liveable City: Toward Economic, Social, Cultural, and Environmental Well-Being. In *Sustainable Cities and Communities* (pp. 353-365). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95717-3_23
- Saha, S., Basu, S., & Pandit, D. (2022). A framework for exploration of variation in prioritization of neighborhood infrastructure influencing the overall Quality of Life (QoL) of older citizens, across varied socio-demographic groups: A case study of Kolkata, India. <https://doi.org/10.47472/vtWTsqxM>
- Sekar, K. (2023). National Institutes of Health (NIH) Funding: FY1996-FY2024. Congressional Research Service (CRS) Reports and Issue Briefs, NA-NA.
- Stephen, W., Richard, L., & Frederick, S. (1998). Planning sustainable and livable cities. *The City Reader*, 500-509.
- Van Kamp, I., Leidelmeijer, K., Marsman, G., & De Hollander, A. (2003). Urban environmental quality and human well-being: Towards a conceptual framework and demarcation of concepts; a literature study. *Landscape and urban planning*, 65(1-2), 5-18. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00232-3](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00232-3)
- Wheeler, S. (2001). Planning sustainable and livable cities. *The City Reader*/S. Wheeler/edited by RT Legates & F. Stout, 434-445.



Performance Evaluation of the MIDREX Gas Processing System for Reducing Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions in the Steel Industry

Mina Yazdani^{a*}, Bahador Abolpour^a, Hanieh Abbaslou^b

^aDepartment of Chemical Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

^bDepartment of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

*Corresponding Author: Mina.yazdani81@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-0833-0831>

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 2026/02/22

Received in revised form:
2026/04/13

Accepted: 2026/04/28

Available online: 2026/06/01

Keywords:

Carbon footprint,
Gas processing,
Hydrogen,
Ironmaking,
Natural gas

ABSTRACT

The steel industry is one of the largest consumers of energy and one of the major sources of greenhouse gas emissions worldwide. Among ironmaking technologies, the natural gas-based direct reduction process, particularly the MIDREX technology, is recognized as one of the most efficient and low-carbon methods for producing direct reduced iron (DRI). Despite its advantages, the performance of the gas processing system, especially the reformer, recuperator, and recycle gas circuit, has a significant impact on energy consumption, process efficiency, and CO₂ emissions. Therefore, evaluating and optimizing this system is essential for improving operational performance and reducing environmental impacts. This study aims to evaluate the performance of the gas processing system in an industrial MIDREX plant with an annual production capacity of 825,000 tons of DRI. Operational data, including process gas composition, reformer efficiency, recuperator performance, recycle gas quality, and operating conditions, were collected and analyzed. Subsequently, a comprehensive process model was developed using Aspen HYSYS to simulate plant operation and assess various optimization scenarios. The results indicate that reduced reformer efficiency, heat losses in the recuperator, and increased concentrations of CO₂ and H₂O in the recycle gas are the primary factors contributing to higher natural gas consumption and increased CO₂ emissions. Simulation results show that improving recuperator performance can reduce the reformer heat duty by 6–8%. In addition, reducing CO₂ in the recycle gas, replacing the reformer catalyst, and increasing the inlet gas preheating temperature can collectively decrease the reformer energy consumption by approximately 12%. Furthermore, the evaluation of improvement scenarios demonstrates that combining these optimization measures with a 30% hydrogen substitution in the reducing gas can lower CO₂ emissions to approximately 0.5–0.6 tons per ton of DRI produced. These findings highlight that optimizing the gas processing system is an effective strategy for enhancing energy efficiency, reducing fossil fuel consumption, and advancing the steel industry toward sustainable and low-carbon production.

Cite this article: yazdani, M., abolpor, B., & Abbaslou, H. (2026). Performance Evaluation of the MIDREX Gas Processing System for Reducing Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions in the Steel Industry. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 2(1), 73-90. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252687>



© The Author(s).

Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252687>

Introduction

The steel industry is one of the largest energy consumers and a major contributor to global greenhouse gas emissions, accounting for approximately 7–9% of worldwide CO₂ emissions. Growing global demand for steel, combined with increasingly stringent environmental regulations and international commitments to climate change mitigation, has accelerated the search for low-carbon ironmaking technologies. Among the available alternatives, the natural gas-based Direct Reduction Iron (DRI) process, particularly the MIDREX technology, has gained considerable attention due to its lower carbon footprint compared with conventional blast furnace routes. In addition, MIDREX technology offers operational flexibility and the potential for future integration with hydrogen-based reduction pathways. Within the MIDREX process, the methane gas processing system plays a critical role in determining overall process efficiency, reformer performance, reducing gas quality, and environmental emissions. This system includes gas cooling, scrubbing, drying, compression, purification, recycling, and reforming units. Any inefficiency within these components can increase natural gas consumption, deteriorate the H₂/CO ratio of the reducing gas, elevate thermal loads on the reformer, and consequently increase CO₂ emissions. Despite its significance, comprehensive assessments of the environmental implications of gas processing performance in industrial MIDREX plants remain limited. Therefore, this study investigates the operational behavior of the methane gas processing system and evaluates its contribution to reducing environmental impacts in a commercial MIDREX direct reduction plant. The primary objective of this research was to evaluate the efficiency of the methane gas processing system in reducing environmental burdens associated with MIDREX-based ironmaking. Specifically, the study aimed to identify major energy bottlenecks, quantify their effects on energy consumption and CO₂ emissions, and assess the effectiveness of various improvement scenarios, including reformer optimization, recuperator enhancement, CO₂ removal from recycle gas, and partial hydrogen substitution.

Method

A combined industrial-process analysis and engineering simulation approach was employed. A MIDREX direct reduction plant in Iran with an annual production capacity of approximately 825,000 tons of DRI was selected as the case study. Operational data were collected from various process units, including the reformer, shaft furnace, recuperator, scrubber, compressors, and Top Gas recycling system. Parameters such as gas composition, pressure, temperature, equipment efficiency, and energy consumption were analyzed. Thermal imaging techniques were used to identify abnormal temperature distributions and heat losses in the reformer and recuperator. Subsequently, a comprehensive process model was developed using Aspen HYSYS V9. The model incorporated major chemical reactions, including steam methane reforming, dry reforming, and methane decomposition. Actual plant operating conditions were implemented to compare real performance with ideal design conditions. Several improvement scenarios were simulated, including increased recuperator efficiency, reduced CO₂ concentration in recycle gas, enhanced reformer performance, implementation of Hot Direct Reduced Iron (HDRI) technology, and hydrogen integration. Environmental impacts were quantified through mass and energy balance calculations. CO₂ emissions from fuel combustion and process operations were estimated for each scenario, allowing a comparative evaluation of their environmental benefits. The simulation results were validated against actual plant data to ensure accuracy and reliability of the model predictions.

Results

The results revealed that the reformer, recuperator, and Top Gas recycling system represent the most significant contributors to energy losses and environmental impacts within the MIDREX process. Analysis of the Top Gas system indicated that elevated concentrations of CO₂ and

water vapor reduce reducing-gas quality and decrease the H_2/CO ratio. Environmental factors such as ambient humidity, temperature fluctuations, dust contamination, atmospheric pressure variations, and the presence of SO_x and NO_x pollutants were found to influence gas quality and reduce Top Gas efficiency by approximately 10–12%, resulting in an additional 0.05–0.10 tons of CO_2 emissions per ton of DRI. The reformer was identified as the largest energy consumer within the plant. Catalyst deactivation, uneven flame distribution, carbon deposition, and inadequate insulation were found to significantly increase fuel consumption. Simulation results demonstrated that reformer optimization could reduce natural gas consumption by up to 12%, corresponding to a reduction of approximately 0.12 tons CO_2 per ton of DRI. The recuperator was found to have a substantial influence on process energy efficiency. Improving heat recovery performance increased inlet gas temperatures and reduced reformer thermal demand by approximately 6–8%, resulting in a further reduction of CO_2 emissions. Additional simulations showed that reducing recycle-gas CO_2 concentration from 15% to 8% increased the H_2/CO ratio from 1.2 to 1.6 while decreasing reformer heat requirements by approximately 5%. Furthermore, replacing 30% of natural gas with hydrogen reduced reformer energy demand by 18–20% and significantly lowered carbon emissions. The combined implementation of all improvement measures yielded the most promising results. Total natural gas consumption decreased by approximately 22–25%, while CO_2 emissions were reduced by 0.5–0.6 tons per ton of DRI produced. These findings demonstrate that systematic optimization of the methane gas processing system can achieve substantial environmental benefits while maintaining operational efficiency.

Conclusions

The findings confirm that methane gas processing performance in the MIDREX direct reduction process has a major impact on energy consumption, reducing gas quality, and CO_2 emissions. The reformer, recuperator, and Top Gas system were identified as the main sources of efficiency losses. Reformer inefficiency caused by carbon deposition, temperature non-uniformity, and inadequate insulation increases natural gas consumption and CO_2 emissions, while recuperator heat losses and poor recycled gas quality increase the reformer's thermal load and reduce the H_2/CO ratio. Simulation results indicate that improving these three sections through better control, heat recovery, and gas drying can significantly enhance system performance. Combined optimization measures have the potential to reduce CO_2 emissions by approximately 0.5–0.6 tons per ton of DRI, with substantial benefits for energy costs and emission intensity. The study also indicates that gradual hydrogen integration, particularly with 30% substitution of natural gas, could provide an effective pathway for further decarbonization. Overall, optimization of the gas processing system is both a technical necessity and an important strategy for sustainable and low-carbon steel production. Future studies should focus on the effects of furnace load variations, economic evaluation of hydrogen substitution scenarios, and real-time optimization of gas processing systems.



ارزیابی عملکرد سیستم فرآوری گاز MIDREX با هدف کاهش مصرف انرژی و انتشار دی اکسید کربن در صنعت فولاد

مینا یزدانی^{a*}، بهادر ابولپور^a، حانیه عباسلو^b

^aگروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران.

^bگروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران.

*نویسنده مسئول: Mina.yazdani81@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱

کلیدواژه‌ها:

آهن سازی،

ردپای کربن،

فرایند گاز،

هیدروژن،

گاز طبیعی.

صنعت فولاد یکی از اصلی ترین مصرف کنندگان انرژی و از بزرگ ترین منابع انتشار گازهای گلخانه ای در جهان به شمار می رود. در میان فناوری های تولید آهن، فرایند احیای مستقیم مبتنی بر گاز طبیعی، به ویژه فناوری MIDREX، به عنوان یکی از کارآمدترین و کم کربن ترین روش های تولید آهن اسفنجی شناخته می شود. با وجود مزایای این فناوری، عملکرد سیستم فرایند گاز، به ویژه بخش های رفورمر، ریکوپراتور و مدار بازیافت گاز، تأثیر مستقیمی بر مصرف انرژی، بازده فرایند و میزان انتشار دی اکسید کربن دارد. از این رو، ارزیابی و بهینه سازی این بخش از فرایند، نقش مهمی در افزایش بهره وری و کاهش اثرات محیط زیستی ایفا می کند. این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد سیستم فرایند گاز در یک واحد صنعتی MIDREX با ظرفیت تولید ۸۲۵ هزار تن آهن اسفنجی در سال انجام شد. در این راستا، داده های عملیاتی شامل ترکیب گازهای فرایندی، بازده رفورمر، عملکرد ریکوپراتور، کیفیت گاز برگشتی و شرایط عملیاتی واحد جمع آوری و تحلیل شدند. سپس مدل کامل فرایند با استفاده از نرم افزار Aspen HYSYS توسعه یافته و برای بررسی عملکرد واقعی و ارزیابی سناریوهای مختلف بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که افت بازده رفورمر، اتلاف حرارتی در ریکوپراتور و افزایش غلظت CO_2 و H_2O در گاز برگشتی، مهم ترین عوامل افزایش مصرف گاز طبیعی و رشد انتشار CO_2 هستند. بر اساس نتایج شبیه سازی، بهبود عملکرد ریکوپراتور می تواند بار حرارتی رفورمر را ۶ تا ۸ درصد کاهش دهد. همچنین کاهش CO_2 گاز برگشتی، تعویض کاتالیست رفورمر و افزایش دمای پیش گرمایش گاز ورودی، در مجموع موجب کاهش حدود ۱۲ درصدی مصرف انرژی رفورمر می شوند. افزون بر این، ارزیابی سناریوهای اصلاحی نشان داد که ترکیب اقدامات بهینه سازی با جایگزینی ۳۰ درصد هیدروژن در گاز احیا کننده، قادر است انتشار CO_2 را به حدود ۵/۵ تا ۶/۰ تن به ازای هر تن آهن اسفنجی کاهش دهد. نتایج این پژوهش نشان می دهد که بهینه سازی سیستم فرایند گاز، راهبردی مؤثر برای افزایش بهره وری انرژی، کاهش مصرف سوخت های فسیلی و حرکت صنعت فولاد به سوی تولید پایدار و کم کربن است.

استناد به این مقاله: یزدانی، مینا؛ ابولپور، بهادر و عباسلو، حانیه. (۱۴۰۵). ارزیابی عملکرد سیستم فرآوری گاز MIDREX با هدف کاهش مصرف انرژی و انتشار دی اکسید کربن در صنعت فولاد. راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، ۱۲(۱)، ۷۰-۷۳. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252687>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252687>

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

صنعت فولاد به عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی و منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای، سهمی قابل توجه (حدود ۷ تا ۹ درصد) در انتشار دی‌اکسیدکربن جهانی دارد (Ariyama, 2025; Davis et al., 2025; World Steel Association, 2024) با تولید سالانه بیش از ۱/۹ میلیارد تن فولاد، این صنعت با فشارهای فزاینده‌ای از سوی توافقات بین‌المللی اقلیمی و مقررات محیط‌زیستی سخت‌گیرانه برای گذار به مسیرهای تولید کم‌کربن مواجه است (Draxler et al., 2022; Schlacke et al., 2021). توافق پاریس و متعاقباً تعهدات بیش از ۴۰ کشور برای دستیابی به بی‌طرفی کربنی تا سال ۲۰۵۰، جستجو برای فناوری‌های تحول‌آفرینی را که قادر به کاهش قابل توجه ردپای کربن صنعت فولاد باشند، شتاب بخشیده است.

در میان مسیرهای مختلف تولید آهن، فرایند احیای مستقیم با گاز طبیعی و به‌ویژه فناوری MIDREX جایگاه ویژه‌ای دارد؛ زیرا نسبت به روش کوره‌بلند، مصرف انرژی و انتشار CO₂ کمتری داشته و امکان یکپارچه‌سازی آن با هیدروژن نیز وجود دارد (Astoria et al., 2023; Chevrier et al., 2021; Kopfle & Hunter, 2008). مسیر-DRI EAF می‌تواند انتشار مستقیم CO₂ را تا ۶۸ درصد در مقایسه با روش سنتی کوره‌بلند-کوره اکسیژن‌پایه کاهش دهد (Skaf et al., 2025). به‌طوری‌که شرکت تکنولوژی میدرکس^۱ گزارش کرده است تولید جهانی آهن اسفنجی از طریق واحدهای MIDREX در سال ۲۰۲۳ به ۷۶ میلیون تن رسیده و پیش‌بینی می‌شود تقاضای جهانی برای آهن اسفنجی و آهن بریکت‌شده داغ^۲ (HBI) تا سال ۲۰۳۰ به ۱۸۰ میلیون تن برسد که برای تأمین آن به سرمایه‌گذاری حدود ۱۶ تا ۲۰ میلیارد دلاری در واحدهای جدید نیاز است (S&P Global, 2026). این گسترش، ضرورت بهبود مستمر در بازدهی فرایند و عملکرد محیط زیستی را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

در فرایند MIDREX، سیستم پردازش گاز متان شامل واحدهای خنک‌سازی، خشک‌سازی، تصفیه، فشرده‌سازی و بازیافت گاز برگشتی است و کیفیت و ترکیب گاز احیاکننده نقش تعیین‌کننده‌ای در بازده انرژی، کیفیت آهن اسفنجی و میزان انتشار آلاینده‌ها دارد. کوچک‌ترین افت عملکرد در این بخش‌ها می‌تواند باعث افزایش بار رفورمر، افزایش مصرف گاز طبیعی، کاهش نسبت H₂/CO و در نتیجه افزایش انتشار CO₂ شود (Zhao et al., 2022). ریفورمر به‌ویژه بزرگ‌ترین مصرف‌کننده انرژی در واحد است و عملکرد آن مستقیماً تحت تأثیر کیفیت گاز برگشتی Top Gas و بازده ریکوپراتور^۳ قرار دارد.

مطالعات متعددی به بررسی ابعاد مختلف بهینه‌سازی فرایند MIDREX پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، عبادی و همکاران^۴ مدل‌سازی و بهینه‌سازی ریفورمرهای MIDREX با سوخت متانول را برای تولید کارآمد هیدروژن بررسی کردند. وو و همکاران^۵ تحلیل فنی-اقتصادی جامعی از یکپارچه‌سازی جذب و ذخیره‌سازی کربن با فرایند MIDREX انجام داده و بازده سرمایه‌گذاری ۱۹۰۹ درصدی را گزارش کرده‌اند که viability اقتصادی را در شرایط فعلی بازار نشان می‌دهد. اسکاف و همکاران^۶ استراتژی‌های تولید آهن سبز مبتنی بر هیدروژن را ارزیابی کرده و نشان داده‌اند که سناریوهای مبتنی بر هیدروژن می‌توانند ردپای کربن را بسته به منبع تأمین برق، ۵۳ تا ۸۲ درصد در مقایسه با

1. Midrex Technologies

2. Hot Briquetted Iron (HBI)

3. Recuperator

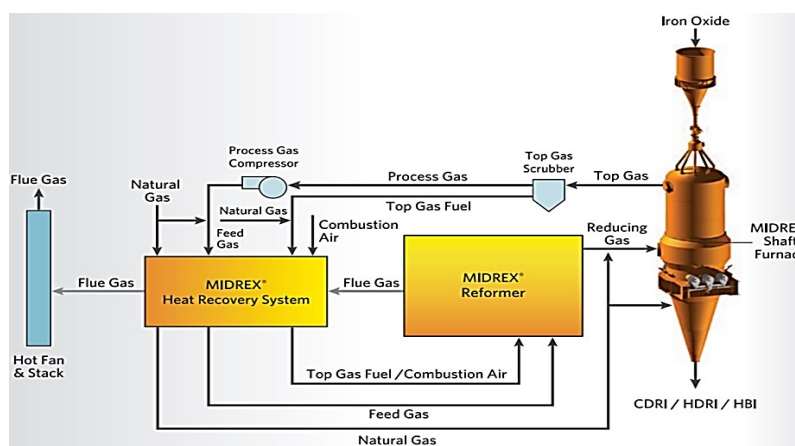
4. (Abadi et al., 2026b)

5. (Vu et al., 2024)

6. (Skaf et al., 2025)

7. (Astoria et al., 2023)

MIDREX معمولی مبتنی بر گاز طبیعی کاهش دهند. همچنین آستوریا و همکاران^۷ مسیرهای گذار از MIDREX مبتنی بر گاز طبیعی به هیدروژن را مطالعه کرده و امکان‌پذیری فنی ادغام تدریجی هیدروژن را برجسته ساخته‌اند. در راستای توسعه فناوری‌های سبز، پژوهش‌های جدید بر روی مدل‌سازی جامع و شبیه‌سازی‌های چندفیزیکی برای بهینه‌سازی عملکرد ریفورمرهای MIDREX متمرکز شده‌اند. به عنوان مثال، مطالعه‌ای جامع با استفاده از داده‌های واقعی یک واحد صنعتی در ایران، رفتار حرارتی، سینتیکی و ترمودینامیکی یک ریفورمر متان را شبیه‌سازی کرده و نشان داده است که افزایش دمای دیواره از ۱۳۰۰ به ۱۵۰۰ کلوین، تولید هیدروژن را تا ۱۲۰۲۴ درصد افزایش می‌دهد (Abadi et al., 2026a). همچنین، فناوری MIDREX Flex با ارائه قابلیت انعطاف‌پذیری در استفاده از گاز طبیعی و هیدروژن، مسیری عملی برای کاهش تدریجی انتشار CO₂ فراهم آورده است، به گونه‌ای که واحدهای مجهز به این فناوری می‌توانند با کمترین تغییرات در تجهیزات، تا ۳۰ درصد گاز طبیعی خود را با هیدروژن جایگزین نمایند (Midrex Technologies, Inc., 2025). با وجود اهمیت شناخته‌شده سیستم پردازش گاز، در بسیاری از واحدهای صنعتی، تحلیل سیستماتیک و جامع از رفتار واقعی آن، گلوگاه‌های انرژی و اثرات محیط‌زیستی مرتبط انجام نشده است؛ این موضوع شکاف اصلی پژوهشی را تشکیل می‌دهد (Kopfle & Hunter, 2008; Abadi et al., 2026). بیشتر مطالعات موجود بر مؤلفه‌های منفرد متمرکز بوده‌اند تا تحلیل یکپارچه از کل سیستم پردازش گاز، و تعداد کمی از آن‌ها یافته‌های خود را با داده‌های عملیاتی واقعی صنعتی از واحدهای ایرانی اعتبارسنجی کرده‌اند. پژوهش حاضر با هدف تحلیل دقیق عملکرد سیستم پردازش گاز MIDREX بر اساس داده‌های واقعی صنعتی و شبیه‌سازی مهندسی انجام شده است. در این تحقیق، نواقص کلیدی شامل بازدهی پایین ریفورمر، اتلاف حرارتی ریکوپراتور، ناکارآمدی سیستم Top Gas و اثرات ترکیب نامناسب گاز برگشتی شناسایی و اثر هر یک بر مصرف انرژی و انتشار CO₂ کمی‌سازی شده است (Zhao et al., 2022). همچنین سناریوهای اصلاحی مانند افزایش بازده بازیابی حرارت، کاهش CO₂ گاز برگشتی و جایگزینی هیدروژن بررسی شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اصلاح سیستم پردازش گاز می‌تواند یکی از مؤثرترین راهکارها برای حرکت به سوی تولید فولاد سبز باشد و امکان کاهش انتشار CO₂ را تا حدود ۰٫۵ تا ۰٫۶ تن به ازای هر تن آهن اسفنجی فراهم کند؛ عددی که در مقیاس صنعتی بسیار قابل توجه است. این پژوهش ضمن ارائه تحلیل فنی دقیق، مسیر عملی برای بهینه‌سازی انرژی و ارتقای پایداری محیط‌زیستی واحدهای احیای مستقیم پیشنهاد می‌کند (Rechberger et al., 2020; Skaf et al., 2025). فلوشیت استاندارد فرایند MIDREX با گاز طبیعی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. فلوشیت استاندارد میدرکس گاز طبیعی (Midrex Technologies, Inc., 2021)

Figure 1. Standard Midrex Natural Gas Flowsheet

روش انجام این پژوهش بر پایه یک رویکرد ترکیبی شامل تحلیل داده‌های عملیاتی یک واحد صنعتی MIDREX، شبیه‌سازی مهندسی و مدل‌سازی موازنه جرم و انرژی طراحی شده است. هدف اصلی این بخش شناخت دقیق رفتار سیستم فرایند گاز و شناسایی عوامل مؤثر بر کارایی انرژی و انتشار CO₂ است. مراحل تحقیق شامل چهار بخش اصلی زیر است.

آهن‌سازی به روش میدرکس

فرایند MIDREX متداول‌ترین فناوری احیای مستقیم در جهان است و بر پایه تبدیل گاز طبیعی به گاز احیاکننده (H₂ و CO) و واکنش آن با سنگ‌آهن در کوره شفتی است. در این واحد صنعتی، سنگ‌آهن گندله پس از ورود از بالای کوره، توسط گاز احیاکننده داغ در دماهای حدود ۷۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد احیا شده و آهن اسفنجی (DRI)^۱ تولید می‌شود (Midrex Technologies, Inc., 2021).

مراحل اصلی فرایند به صورت زیر است:

۱- تولید گاز احیاکننده

گاز طبیعی (CH₄) در رفورمر با استفاده از سطوح بالای حرارت و حضور کاتالیست، از طریق واکنش‌های ریفورم بخار (معادله ۱) و ریفورم خشک (معادله ۲) به گاز احیاکننده شامل H₂ و CO تبدیل می‌شود (Horne & Miller, 2017).



۲- احیا در کوره شفتی

گاز احیا با دمای حدود ۸۰۰-۹۰۰ درجه سانتی گراد وارد بخش پایین کوره شفتی می‌شود و به سمت بالا حرکت می‌کند. گندله آهن از بالا وارد شده و واکنش طبق معادله ۳ انجام می‌شود (Szekely et al., 1976):



۳- بازیافت گاز خروجی (Top Gas)

گاز خروجی کوره (Top Gas) شامل CO، CO₂، H₂ و H₂O و گردوغبار است. این گاز پس از خنک‌سازی و تصفیه، بخشی به رفورمر بازگردانده می‌شود و بخشی مشعل‌ها را تغذیه می‌کند. در این مطالعه، تمامی داده‌های مربوط به دما، فشار، ترکیب گاز و عملکرد بخش‌های ذکر شده، از واحد مورد مطالعه برداشت و تحلیل شدند.

سیستم فرایند گاز

سیستم فرایند گاز بخش کلیدی فرایند MIDREX است و وظیفه آن آماده‌سازی گاز برگشتی برای ورود دوباره به رفورمر است. هرگونه نقص در این سیستم می‌تواند بازده رفورمر و کل فرایند را کاهش دهد.

اجزای اصلی سیستم فرایند گاز عبارت‌اند از:

- خنک‌سازی اولیه: Top Gas از دمای حدود ۴۰۰-۳۵۰ درجه سانتی گراد به حدود ۴۰ درجه سانتی گراد می‌رسد. این مرحله برای جلوگیری از آسیب به تجهیزات بعدی ضروری است.

- حذف گردوغبار: در اسکرابر، گردوغبار و بخشی از CO₂ جذب شده و رطوبت گاز کاهش می‌یابد. در صورتی که عملکرد این بخش ضعیف باشد، CO₂ و H₂O بالا وارد رفورمر شده و بار آن افزایش می‌یابد (Wang et al., 2020).

- فشرده‌سازی گاز تصفیه‌شده به فشار ۲-۳ bar فشرده می‌شود تا امکان ورود به مبدل‌های حرارتی و رفورمر را داشته باشد.

-پیش‌گرمایش در ریکوپراتور: ریکوپراتور با استفاده از دودکش رفورمر، گاز برگشتی را از ۴۰ درجه سانتیگراد به حدود ۴۵۰-۵۲۰ درجه سانتیگراد گرم می‌کند.

این بخش مهم‌ترین واحد کاهش‌دهنده مصرف انرژی است (Kumar & Singh, 2018). افت عملکرد ریکوپراتور یکی از دلایل افزایش CO₂ در واحدهای صنعتی است.

- مخلوط‌سازی با گاز طبیعی (NG + Recycle Mixing): نسبت گاز طبیعی به گاز برگشتی براساس طراحی واحد تنظیم می‌شود.

نسبت بیشتر گاز برگشتی^۱ معمولاً سبب کاهش هزینه سوخت و بهبود کیفیت گاز احیا می‌شود.

- ورود مخلوط به رفورمر: در رفورمر گاز گرم‌شده در حضور کاتالیست به H₂ و CO تبدیل شده و به سمت کوره شفتی ارسال می‌شود.

شبیه‌سازی با نرم‌افزار Aspen HYSYS

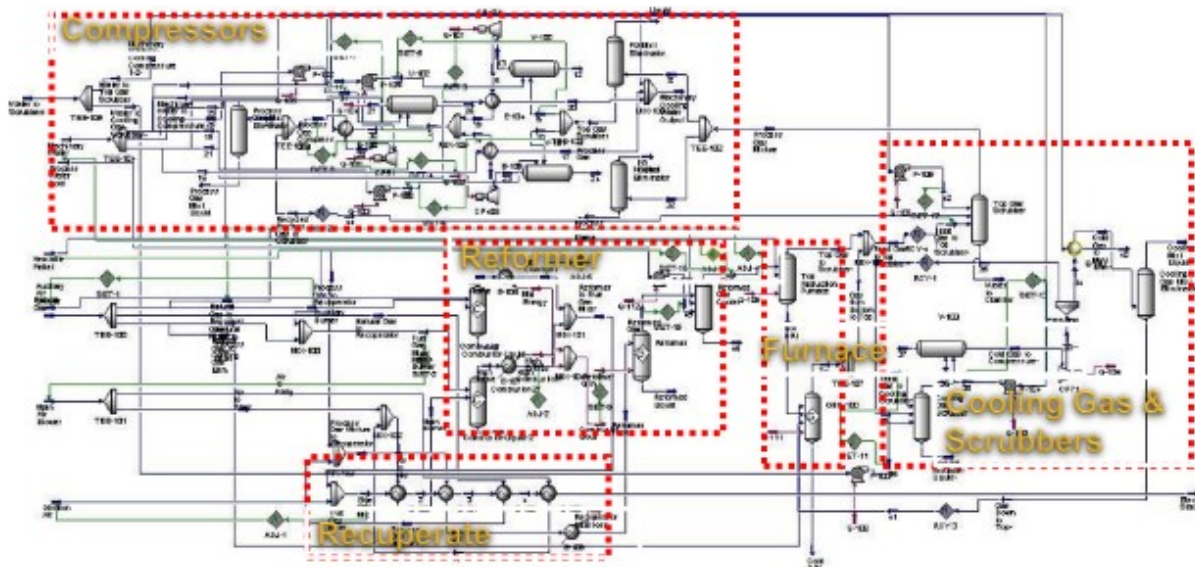
به‌منظور تحلیل دقیق عملکرد سیستم فرایند گاز و سنجش اثر تغییرات عملیاتی، یک مدل کامل فرایند در نرم‌افزار Aspen HYSYS ساخته شد (Alvarez & Gómez-Barea, 2018). در شبیه‌سازی انجام‌شده، معادله حالت Soave-Redlich-Kwong به‌عنوان مدل ترمودینامیکی انتخاب شد، زیرا ترکیب گازهای موجود در فرایند شامل متان، هیدروژن، مونوکسیدکربن و دی‌اکسیدکربن است و این معادله حالت دقت مناسبی در پیش‌بینی رفتار ترمودینامیکی چنین مخلوط‌هایی در دما و فشار عملیاتی واحد MIDREX دارد (International Energy Agency, 2021). انتخاب این مدل امکان محاسبه صحیح تعادل فازی، آنتالپی و خواص انتقالی جریان‌های گازی را فراهم کرد و پایه اصلی شبیه‌سازی دقیق فرایند را شکل داد. مدل شبیه‌سازی به‌صورت یک فلوشیت کامل فرایندی ایجاد شد که تمامی واحدهای اصلی سیستم فرایند گاز را دربر می‌گرفت. این مدل شامل رفورمر، ریکوپراتور، مبدل‌های حرارتی، کمپرسور گاز برگشتی، اسکرابر، خطوط انتقال گاز طبیعی و مسیرهای بازیافت گاز بود. اتصال صحیح این تجهیزات به یکدیگر به‌گونه‌ای انجام شد که مسیر واقعی جریان‌ها، تبادل حرارت و افت فشارها مطابق با شرایط صنعتی بازسازی شود و رفتار کل واحد به‌صورت یکپارچه قابل تحلیل باشد. در مدل شبیه‌سازی، واکنش‌های شیمیایی اصلی حاکم بر عملکرد رفورمر تعریف شدند. این واکنش‌ها شامل ریفورمینگ بخار متان، ریفورمینگ خشک متان با دی‌اکسیدکربن و واکنش تجزیه متان بودند که همگی به‌صورت واکنش‌های گرماگیر در نظر گرفته شدند. نرخ این واکنش‌ها بر اساس داده‌های صنعتی و سینتیک‌های متداول تنظیم شد تا تولید هیدروژن و مونوکسیدکربن در شرایط عملیاتی واقعی با دقت مناسبی شبیه‌سازی شود.

به‌منظور نزدیک‌کردن شبیه‌سازی به عملکرد واقعی واحد، شرایط عملیاتی حقیقی مستقیماً در مدل اعمال شد. این داده‌ها شامل دمای گازهای ورودی، فشار گاز برگشتی، دمای کاری رفورمر، ترکیب گاز احیاکننده و دمای دودکش رفورمر بود. اعمال این اطلاعات باعث شد نتایج شبیه‌سازی بازتاب دقیقی از وضعیت موجود واحد صنعتی داشته باشد و امکان مقایسه مستقیم بین شرایط واقعی و شرایط اصلاح‌شده فراهم شود.

پس از پایدارسازی مدل، سناریوهای مختلف اصلاحی بر روی شبیه‌سازی اجرا شد. این سناریوها شامل افزایش بازده ریکوپراتور، کاهش میزان دی‌اکسیدکربن در گاز برگشتی، جایگزینی تدریجی هیدروژن به‌میزان ۱۰ تا ۳۰ درصد، بهبود عایق‌بندی رفورمر و افزایش دمای پیش‌گرمایش گاز ورودی بودند. برای هر سناریو، شاخص‌هایی نظیر مصرف گاز

^۱- Recycle Gas

طبیعی، ترکیب گاز احیا، دمای محصول، میزان انتشار دی‌اکسیدکربن و تغییر بار حرارتی رفورمر استخراج و با یکدیگر مقایسه شدند تا اثر هر اقدام اصلاحی به صورت کمی ارزیابی شود. فلوشیت فرایندی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Aspen HYSYS در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. Pfd شبیه سازی شده توسط نرم افزار Aspen HYSYS V9
Figure 2. PFD simulated by Aspen HYSYS V9 software

موازنه جرم و انرژی

موازنه جرم و انرژی واحد احیای مستقیم MIDREX به صورت جامع و یکپارچه انجام شد تا ارتباط دقیق بین جریان‌های مادی، مصرف انرژی و میزان انتشار دی‌اکسیدکربن به طور کمی مشخص شود. موازنه جرم بر پایه شناسایی و ردیابی تمامی جریان‌های ورودی و خروجی سیستم فرایند گاز و کوره شفتی انجام گرفت (Himmelblau & Riggs, 2012). جریان‌های اصلی شامل گاز طبیعی ورودی به رفورمر، گاز برگشتی حاصل از بالای کوره شفتی، گاز احیاکننده تولیدی و گاز خروجی Top Gas بودند. با در نظر گرفتن پایستگی جرم، برای هر یک از واحدهای عملیاتی معادلات موازنه نوشته شد تا تطابق کامل بین جرم ورودی و خروجی برقرار گردد. این تحلیل نشان داد که افزایش سهم CO_2 و بخار آب در گاز برگشتی، بدون تغییر محسوس در دبی جرمی کل، باعث تغییر قابل توجه در ترکیب گاز ورودی به رفورمر می‌شود که در نهایت کیفیت گاز احیاکننده را کاهش داده و نیاز به مصرف انرژی بیشتر را ایجاد می‌کند.

محاسبه شاخص‌های محیط‌زیستی

شاخص‌های محیط زیستی در روابط ۴ تا ۸ نشان داده شده‌اند.

- شدت کربن ویژه واحد (Specific Carbon Intensity – SCI)

$$SCI = \frac{(\text{سال/تن}) \text{ کل انتشار دی اکسید کربن}}{(\text{سال/تن}) \text{ تولید آهن اسفنجی}} \quad (4)$$

انتشار CO_2 در حالت پایه حدود ۰/۵ تا ۰/۶ تن به ازای هر تن آهن اسفنجی ذکر شده است. با احتساب ظرفیت واحد (۸۲۵ هزار تن در سال)، انتشار سالانه حدود ۴۱۲،۵۰۰ تا ۴۹۵،۰۰۰ تن CO_2 است. شاخص شدت کربن ویژه واحد می‌دهد که به ازای هر تن محصول، چه مقدار CO_2 منتشر می‌شود. پس از اعمال

راهکارهای بهینه‌سازی (بهبود ریکوپراتور، کاهش CO₂ برگشتی، جایگزینی هیدروژن)، این مقدار می‌تواند تا ۰/۴ تن/تن کاهش یابد که معادل کاهش ۲۰٪ در شدت کربن است. این بهبود، همسو با اهداف صنعت فولاد کم‌کربن است.

- بازده انرژی ویژه (SEC – Specific Energy Consumption)

$$SEC = \frac{\text{(سال/گیگاژول) مصرف گاز طبیعی}}{\text{(سال/تن) تولید آهن اسفنجی}} \quad (۵)$$

با توجه به کاهش ۲۲ تا ۲۵ درصدی مصرف گاز طبیعی پس از بهینه‌سازی، اگر مصرف اولیه واحد را حدود ۱۰ گیگاژول بر تن در نظر بگیریم، پس از بهبود به ۷/۵ تا ۷/۸ گیگاژول بر تن می‌رسد. این شاخص نشان می‌دهد که به ازای هر تن آهن اسفنجی، چقدر انرژی مصرف می‌شود. کاهش ۲۲-۲۵٪ در SEC نشان‌دهنده بهبود قابل توجه بهره‌وری انرژی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی است.

- نسبت کاهش انتشار ناشی از هیدروژن (H₂ Substitution Impact – HSI)

$$HSI = \frac{\text{کاهش دی اکسید کربن ناشی از جایگزینی هیدروژن}}{\text{کل انتشار پایه}} \quad (۶)$$

جایگزینی ۳۰٪ هیدروژن منجر به کاهش ۰/۲۵ تن دی اکسیدکربن به ازای تن DRI می‌شود. اگر انتشار پایه را ۰/۵ تن/تن بگیریم، HSI ≈ ۰/۵٪ خواهد بود. این شاخص نشان می‌دهد که جایگزینی هیدروژن چقدر می‌تواند در کاهش انتشار موثر باشد. مقدار ۰/۵٪ بیانگر پتانسیل بالای هیدروژن برای کربن‌زدایی در فرآیند MIDREX است.

- نسبت بازیافت حرارتی مؤثر (EHRR – Effective Heat Recovery Ratio)

$$EHRR = \frac{\text{(سال/گیگاژول) انرژی بازیافتی ریکوپراتور}}{\text{(سال/گیگاژول) انرژی ورودی ریفورمر}} \quad (۷)$$

با بهبود ریکوپراتور، ۶-۸٪ از بار حرارتی ریفورمر کاسته می‌شود. اگر انرژی ورودی به ریفورمر را ۱۰۰ واحد در نظر بگیریم، EHRR ≈ ۶-۸٪ خواهد بود. این شاخص نشان می‌دهد که چقدر از انرژی تلف‌شده قابل بازیافت است. افزایش EHRR تنها مصرف سوخت را کاهش می‌دهد، بلکه از انتشار CO₂ اضافی جلوگیری می‌کند.

- شاخص کیفیت گاز برگشتی (RGQI – Return Gas Quality Index)

$$RGQI = \frac{[H_2] + [CO]}{[CO_2] + [H_2O]} \quad (۸)$$

افزایش CO₂ و H₂O در گاز برگشتی باعث کاهش کیفیت می‌شود. پس از بهینه‌سازی، این نسبت بهبود می‌یابد. افزایش RGQI نشان‌دهنده بهبود کیفیت گاز برگشتی و کاهش بار روی ریفورمر است. این شاخص می‌تواند به عنوان معیاری برای پایش عملیاتی واحد استفاده شود.

ارزیابی اقتصادی

برای تکمیل تحلیل فنی و محیط‌زیستی، یک ارزیابی اقتصادی برای بررسی امکان‌پذیری مالی سناریوهای بهبود پیشنهادی انجام شد. تحلیل اقتصادی بر برآورد سرمایه‌گذاری اولیه موردنیاز، صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی و دوره بازگشت سرمایه مرتبط با اجرای اقدامات بهینه‌سازی شناسایی شده متمرکز بود. شاخص‌های کلیدی اقتصادی شامل کل سرمایه‌گذاری، صرفه‌جویی سالانه هزینه ناشی از کاهش مصرف گاز طبیعی و دوره بازگشت سرمایه ساده، بر اساس قیمت‌های فعلی بازار ایران برای گاز طبیعی و تجهیزات محاسبه شد. تحلیل سناریوهای بهبود زیر را در نظر گرفت: (۱) افزایش بازده ریفورمر، (۲) بهبود عملکرد ریکوپراتور، (۳) ارتقای سیستم Top Gas با حذف CO₂، و (۴) اجرای همزمان تمامی اقدامات. هزینه‌های تجهیزات بر اساس استعلام قیمت از تأمین‌کنندگان و روابط استاندارد هزینه‌یابی صنعتی برآورد شد، در حالی که صرفه‌جویی گاز طبیعی از نتایج شبیه‌سازی بخش قبل استخراج گردید. این ارزیابی

اقتصادی چارچوب اولیه‌ای برای بررسی مقرون‌به‌صرفه بودن اصلاحات پیشنهادی فراهم کرده و از تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری برای بهره‌برداران واحد پشتیبانی می‌کند.

یافته‌ها و بحث

فرایند گاز در فرایند MIDREX

بررسی داده‌های عملیاتی واحد صنعتی نشان داد که سیستم فرایند گاز یکی از مؤثرترین بخش‌ها در تعیین بازده کلی فرایند احیای مستقیم به روش MIDREX است. گاز برگشتی خروجی از بالای کوره شفتی که شامل CO ، CO_2 ، H_2 ، بخار آب و مقادیر جزئی متان است، در صورت عدم تصفیه و آماده‌سازی مناسب، می‌تواند بار حرارتی و شیمیایی قابل توجهی به رفورمر تحمیل کند. نتایج نشان داد که افزایش CO_2 و H_2O در گاز برگشتی باعث تشدید واکنش‌های گرماگیر در رفورمر شده و کیفیت گاز احیاکننده تولیدی را کاهش می‌دهد. این موضوع به‌طور مستقیم موجب افزایش مصرف گاز طبیعی، کاهش نسبت H_2/CO و افت بازدهی واکنش‌های احیا در کوره شفتی می‌شود. همچنین عملکرد نامناسب واحدهای خنک‌سازی، اسکرابر و فشرده‌سازی گاز برگشتی، منجر به ورود ناخالصی‌ها و رطوبت به تجهیزات پایین‌دست شده و شرایط عملیاتی رفورمر و مبدل‌های حرارتی را از حالت بهینه خارج می‌کند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از انرژی مصرفی واحد صرف جبران افت کیفیت گاز برگشتی می‌شود و بهینه‌سازی این سیستم می‌تواند نقش کلیدی در کاهش شدت انرژی داشته باشد (Adewuyi & Fletcher, 2019).

شبیه‌سازی فرایند با Aspen HYSYS

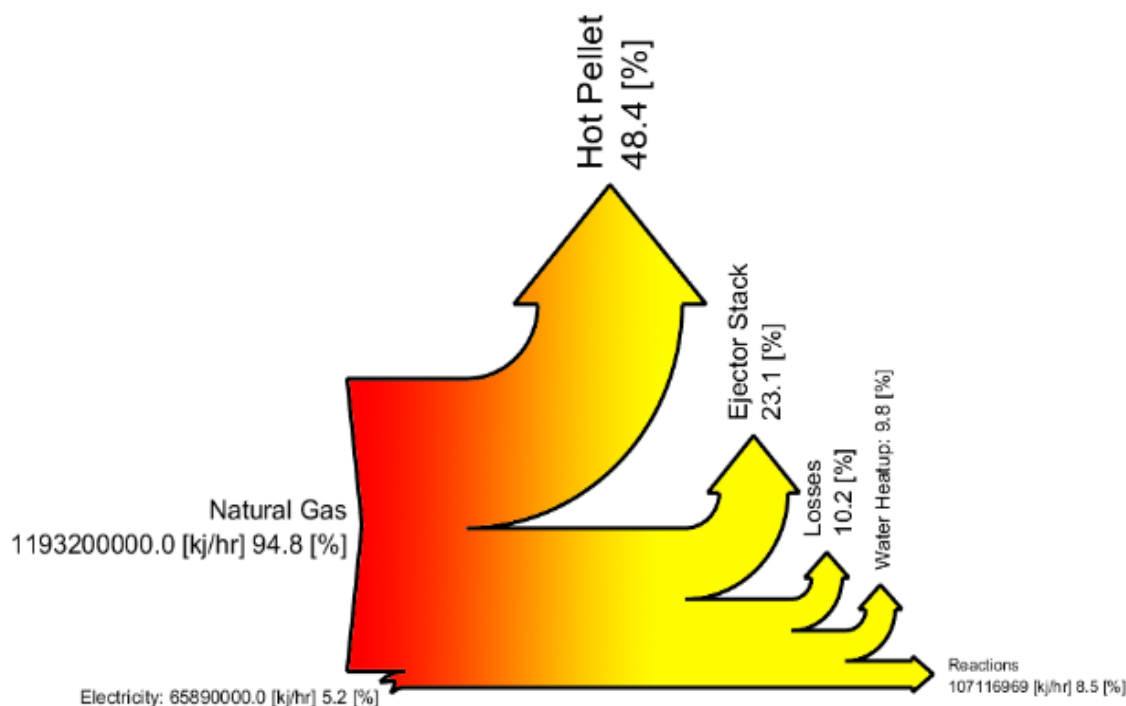
شبیه‌سازی فرایند با استفاده از داده‌های واقعی صنعتی در محیط Aspen HYSYS انجام شد تا تأثیر شرایط عملیاتی مختلف بر عملکرد سیستم فرایند گاز بررسی شود (Alvarez & Gómez-Barea, 2018). نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزایش دمای گاز برگشتی ورودی به رفورمر، که عمدتاً از طریق بهبود عملکرد ریکوپراتور حاصل می‌شود، تأثیر قابل توجهی در کاهش بار حرارتی رفورمر دارد. با افزایش دمای پیش‌گرمایش گاز ورودی، نیاز به احتراق سوخت در مشعل‌ها کاهش یافته و نسبت H_2 به CO در گاز احیاکننده بهبود پیدا می‌کند. همچنین کاهش میزان CO_2 در گاز برگشتی موجب کاهش شدت واکنش‌های گرماگیر ریفرمینگ و افزایش کیفیت گاز احیا شد. در سناریوی جایگزینی بخشی از گاز طبیعی با هیدروژن، نتایج نشان داد که بار رفورمر به‌طور محسوسی کاهش یافته و انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از احتراق سوخت افت قابل توجهی پیدا می‌کند. زمانی که تمامی اصلاحات به‌صورت هم‌زمان اعمال شدند، کاهش چشمگیر مصرف گاز طبیعی و بهبود معنی‌دار شاخص‌های محیط‌زیستی واحد مشاهده شد که تطابق مناسبی با داده‌های عملیاتی واقعی داشت و اعتبار مدل شبیه‌سازی را تأیید کرد.

موازنه جرم و انرژی

برای تحلیل نحوه توزیع انرژی در واحد احیای مستقیم، موازنه جرم و انرژی بر اساس داده‌های عملیاتی و نتایج شبیه‌سازی انجام شد و نتایج به‌صورت دیاگرام سنکی نمایش داده شد. این تحلیل نشان داد که رفورمر بیشترین سهم مصرف انرژی را در کل واحد به خود اختصاص می‌دهد و پس از آن، ریکوپراتور نقش مهمی در بازیافت بخشی از انرژی دودکش ایفا می‌کند. با وجود این، مقدار قابل توجهی از انرژی به‌صورت اتلاف حرارتی از بدنه رفورمر و دودکش از دست می‌رود که این موضوع یکی از عوامل اصلی افزایش مصرف سوخت و انتشار دی‌اکسیدکربن است. نتایج دیاگرام سنکی نشان داد که حتی بهبود محدود در بازده ریکوپراتور و کاهش اتلاف حرارتی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش شدت انرژی کل واحد داشته باشد. دیاگرام موازنه انرژی خط احیای شبیه‌سازی‌شده در شکل ۳ ارائه شده است. موازنه جرم مشخص کرد که سهم بازیافت گاز برگشتی نقش مهمی در کاهش مصرف گاز طبیعی دارد، اما در صورتی که کیفیت

این گاز کنترل نشود، مزیت بازیافت به یک عامل تشدیدکننده مصرف انرژی تبدیل می‌شود. انرژی‌های ورودی شامل انرژی شیمیایی گاز طبیعی، انرژی همراه گاز برگشتی، انرژی تأمین‌شده توسط مشعل‌های رفورمر و سهم انرژی ناشی از پیش‌گرمایش جریان‌ها بود. در مقابل، انرژی خروجی به‌صورت انرژی موجود در گاز احیاکننده، انرژی انتقال‌یافته به کوره شفتی، انرژی بازیافتی در ریکوپراتور و اتلاف‌های حرارتی از بدنه رفورمر و دودکش در نظر گرفته شد. نتایج این موازنه نشان داد که بخش قابل‌توجهی از انرژی ورودی به رفورمر صرف جبران افت دمای گاز ورودی و انجام واکنش‌های گرماگیر ناشی از حضور CO_2 و H_2O اضافی در گاز برگشتی می‌شود. به‌عبارت دیگر، کاهش کیفیت گاز برگشتی مستقیماً موجب افزایش بار حرارتی رفورمر و افزایش مصرف سوخت می‌گردد. تحلیل انرژی همچنین نشان داد که ریکوپراتور نقش کلیدی در بهبود کارایی انرژی واحد دارد، زیرا با بازیافت حرارت دودکش رفورمر، دمای گاز برگشتی را پیش از ورود به رفورمر افزایش می‌دهد. هرگونه افت بازده در این مبدل حرارتی باعث کاهش دمای پیش‌گرمایش، افزایش نیاز به احتراق سوخت در مشعل‌ها و در نتیجه افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود. نتایج موازنه انرژی نشان داد که اتلاف حرارت از بدنه رفورمر و دودکش سهم قابل‌توجهی از انرژی کل را به خود اختصاص می‌دهد و بهبود عایق‌بندی و ارتقای تجهیزات بازیافت حرارت می‌تواند تأثیر مستقیمی بر کاهش مصرف انرژی داشته باشد. در بخش محاسبه انتشار دی‌اکسیدکربن، نتایج موازنه جرم و انرژی به‌صورت هم‌زمان مورد استفاده قرار گرفت. دی‌اکسیدکربن تولیدی از احتراق سوخت رفورمر، CO_2 حاصل از واکنش‌های شیمیایی احیا و CO_2 موجود در گاز خروجی کوره شفتی به‌عنوان اجزای اصلی انتشار در نظر گرفته شدند. محاسبات نشان داد که افزایش مصرف سوخت در رفورمر، که عمده‌تأ ناشی از افت کارایی سیستم فرایند گاز است، بیشترین سهم را در افزایش انتشار CO_2 دارد. از سوی دیگر، بهبود شرایط عملیاتی و کاهش بار حرارتی رفورمر باعث کاهش هم‌زمان مصرف سوخت و انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود.

در مجموع، نتایج موازنه جرم و انرژی نشان داد که عملکرد سیستم فرایند گاز به‌طور مستقیم بر رفتار انرژی و محیط‌زیستی کل واحد MIDREX اثرگذار است (Ezzati & Carroll, 2018). هرگونه بهبود در کیفیت گاز برگشتی، افزایش بازده ریکوپراتور و کاهش اتلاف‌های حرارتی، نه‌تنها موجب کاهش مصرف گاز طبیعی می‌شود، بلکه اثر مستقیمی بر کاهش انتشار CO_2 به‌ازای هر تن آهن اسفنجی دارد. این تحلیل جامع تأیید می‌کند که موازنه جرم و انرژی ابزاری کلیدی برای شناسایی نقاط بحرانی مصرف انرژی و طراحی راهبردهای مؤثر برای حرکت به‌سوی تولید آهن و فولاد کم‌کربن و پایدار است.



شکل ۳. دیاگرام موازنه انرژی خط احیاء شبیه‌سازی شده

Figure 3. Energy balance diagram of the simulated reduction line

کارایی انرژی

تحلیل کارایی انرژی واحد نشان داد که بازدهی واقعی فرایند کمتر از مقدار طراحی استاندارد فناوری MIDREX است. این اختلاف عمدتاً ناشی از افت عملکرد تجهیزات کلیدی مانند ریکوپراتور و رفورمر، افزایش CO_2 و بخار آب در گاز برگشتی و اتلاف حرارتی از بدنه تجهیزات است. نتایج نشان داد که بهبود شرایط پیش‌گرمایش گاز برگشتی، تعویض یا احیای کاتالیست رفورمر و کاهش ناخالصی‌های گاز بازیافتی می‌تواند منجر به افزایش قابل توجه کارایی انرژی شود. اجرای هم‌زمان این اصلاحات امکان افزایش بازده کلی واحد را فراهم می‌کند و می‌تواند فاصله موجود بین عملکرد واقعی و شرایط طراحی را به‌طور محسوسی کاهش دهد (International Energy Agency, 2020).

کاهش مصرف گاز طبیعی در رفورمر باعث کاهش بار حرارتی موردنیاز واحد شده و در کنار افزایش بازیافت حرارت در ریکوپراتور، منجر به استفاده بهینه‌تر از انرژی ورودی گردیده است. این عوامل در مجموع سبب افزایش بازده انرژی واحد و کاهش مصرف ویژه انرژی به ازای هر تن آهن اسفنجی تولیدی شده‌اند.

انتشار دی‌اکسیدکربن و شاخص‌های محیط زیستی

نتایج تحلیل انتشار دی‌اکسیدکربن نشان داد که رفورمر اصلی‌ترین منبع تولید CO_2 در واحد MIDREX است و مصرف سوخت در این بخش بیشترین سهم را در آلاینده‌گی کل دارد. افزایش ناخالصی‌های گاز برگشتی، به‌ویژه CO_2 و بخار آب، موجب افزایش مصرف سوخت و در نتیجه افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که بهبود بازده ریکوپراتور و کاهش بار حرارتی رفورمر می‌تواند انتشار CO_2 را به‌طور مستقیم کاهش دهد. همچنین جایگزینی تدریجی هیدروژن به جای گاز طبیعی یکی از مؤثرترین راهکارها برای کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن ارزیابی شد، به‌طوری‌که در سناریوی بهینه، کاهش قابل توجهی در میزان CO_2 تولیدی به‌ازای هر تن آهن اسفنجی حاصل گردید (Gielen & Yagi, 2021).

جدول ۱. اقدامات اصلاحی پتانسیل کاهش انتشار CO₂Table 1. Corrective actions with potential for CO₂ emission reduction

اقدام	کاهش CO ₂ (تن/تن DRI)
افزایش بازده ریفرمر	۰/۱۲
افزایش بازده ریکوپراتور	۰/۰۵
HDRI	۰/۰۸
استفاده از هیدروژن تا ۳۰٪	۰/۲۵
حذف CO ₂ محلول	۰/۰۲

تایج ارائه شده در جدول ۱ نشان می دهد که هر یک از اقدامات اصلاحی پیشنهادی، بسته به نوع و میزان تأثیرگذاری خود، می تواند در کاهش انتشار CO₂ و بهبود عملکرد محیط زیستی واحد احیای مستقیم نقش داشته باشد. با این حال، بررسی اثرات هر اقدام به صورت منفرد نمی تواند به تنهایی بیانگر عملکرد نهایی و میزان بهبود حاصل از اجرای مجموعه اقدامات بهینه سازی باشد؛ زیرا در شرایط عملیاتی، عوامل مختلف سیستم فرایند گاز، از جمله عملکرد ریفرمر، بازده ریکوپراتور، کیفیت گاز برگشتی و میزان استفاده از هیدروژن، به صورت متقابل بر مصرف انرژی و انتشار CO₂ اثر می گذارند. بنابراین، پس از شناسایی پتانسیل هر یک از اقدامات اصلاحی، اثر تجمعی آن ها بر عملکرد کلی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا، شاخص های کمی انرژی و محیط زیستی شامل شدت کربن ویژه (Specific Carbon Intensity – SCI)، بازده انرژی ویژه (Specific Energy Consumption – SEC)، نسبت کاهش انتشار ناشی از هیدروژن و بازیافت حرارتی مؤثر، به عنوان معیارهای اصلی ارزیابی عملکرد در نظر گرفته شدند. مقادیر پایه و مقادیر حاصل پس از اعمال سناریوهای بهینه سازی و همچنین میزان بهبود هر شاخص در جدول ۲ ارائه شده است. این مقایسه امکان ارزیابی دقیق تر میزان تأثیر اقدامات اصلاحی بر کاهش شدت کربن، کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره وری حرارتی سیستم را فراهم می کند و نشان می دهد که ترکیب اقدامات اصلاحی می تواند علاوه بر کاهش مستقیم انتشار CO₂، به بهبود هم زمان شاخص های عملکردی واحد نیز منجر شود.

جدول ۲. شاخص های کمی محیط زیستی و عملکردی

Table 2. Quantitative Environmental and Performance Indicators

شاخص	مقدار پایه	مقدار پس از بهینه سازی	بهبود (%)
شدت کربن ویژه (تن CO ₂ /تن DRI)	۰/۵۵	۰/۴	٪۲۷
بازده انرژی ویژه (GJ/تن)	۱۰	۷/۶	٪۲۴
نسبت کاهش انتشار هیدروژن	–	۰/۵۰	–
بازیافت حرارتی مؤثر	٪۵	٪۷	٪۴۰

تحلیل اقتصادی

به منظور ارزیابی امکان پذیری مالی اقدامات بهینه سازی پیشنهادی، یک تحلیل اقتصادی بر اساس نتایج شبیه سازی و شرایط فعلی بازار ایران انجام شد. این تحلیل بر برآورد سرمایه گذاری اولیه، صرفه جویی سالانه هزینه های عملیاتی و دوره بازگشت سرمایه ساده برای سناریوهای اصلی بهبود متمرکز گردید.

سرمایه گذاری مورد نیاز برای اجرای اصلاحات پیشنهادی بسته به دامنه و پیچیدگی هر اقدام متفاوت است. بر اساس داده های صنعتی، احداث یک واحد جدید MIDREX با ظرفیت ۱/۵ میلیون تن در سال معمولاً به سرمایه گذاری بیش از ۱ میلیارد دلار نیاز دارد (S&P Global, 2026). برای واحد مورد مطالعه با ظرفیت ۸۲۵،۰۰۰ تن در سال، هزینه های

سرمایه‌ای برآوردی برای هر سناریوی بهبود در جدول ۳ خلاصه شده است. بهینه‌سازی ریفورمر شامل تعویض کاتالیست، تنظیم مشعل‌ها و ارتقای عایق‌بندی، به سرمایه‌گذاری حدود ۸ تا ۱۲ میلیون دلار نیاز دارد. ارتقای ریکوپراتور شامل تعویض لوله‌ها و اصلاح سطح انتقال حرارت، تقریباً ۳ تا ۵ میلیون دلار هزینه دربردارد. ارتقای سیستم Top Gas با نصب واحد حذف CO₂، بیشترین هزینه سرمایه‌ای را به خود اختصاص می‌دهد و بین ۱۵ تا ۲۰ میلیون دلار برآورد می‌شود. اجرای همزمان تمامی اقدامات با بهره‌مندی از صرفه‌جویی مقیاس و زیرساخت‌های مشترک، بین ۲۵ تا ۳۵ میلیون دلار سرمایه‌گذاری نیاز دارد.

جدول ۳. سرمایه‌گذاری اولیه برآوردی و صرفه‌جویی سالانه برای سناریوهای بهبود

Table 3. Estimated Initial Investment and Annual Savings for Improvement Scenarios

سناریوی بهبود	سرمایه‌گذاری اولیه برآوردی (میلیون دلار)	صرفه‌جویی سالانه گاز طبیعی (میلیون دلار در سال)	دوره بازگشت سرمایه ساده (سال)
بهینه‌سازی ریفورمر	۸-۱۲	۴/۸ - ۳/۲	۳ - ۲/۵
ارتقای ریکوپراتور	۳-۵	۲/۴ - ۱/۶	۲/۵ - ۱/۹
ارتقای (Top Gas حذف CO ₂)	۱۵-۲۰	۳/۲ - ۲/۴	۳ - ۶/۳
اجرای همزمان تمامی اقدامات	۲۵-۳۵	۱۰/۴ - ۷/۲	۲ - ۳/۵

توجه: محاسبات بر اساس قیمت گاز طبیعی به مبلغ ۰/۱ تا ۰/۱۵ دلار به ازای هر متر مکعب (نرخ صنعتی داخلی ایران، سال ۱۴۰۴) انجام شده است.

منبع اصلی صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی ناشی از کاهش مصرف گاز طبیعی است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی ارائه‌شده در بخش قبل، اجرای همزمان تمامی اقدامات بهینه‌سازی می‌تواند مصرف گاز طبیعی را ۲۲ تا ۲۵ درصد کاهش دهد که برای واحد ۸۲۵،۰۰۰ تنی معادل صرفه‌جویی سالانه حدود ۷۲ تا ۹۶ میلیون متر مکعب گاز طبیعی است. با نرخ فعلی گاز طبیعی صنعتی ایران (۰/۱ تا ۰/۱۵ دلار بر مترمکعب)، این مقدار به صرفه‌جویی سالانه ۷/۲ تا ۱۰/۴ میلیون دلار منجر می‌شود. صرفه‌جویی‌های اضافی ممکن است از طریق کاهش جرایم انتشار CO₂ حاصل شود، هرچند که مکانیسم‌های قیمت‌گذاری کربن هنوز در ایران به‌طور کامل پیاده‌سازی نشده و بنابراین در تحلیل پایه لحاظ نشده‌اند.

دوره بازگشت سرمایه ساده که به‌صورت نسبت سرمایه‌گذاری به صرفه‌جویی سالانه هزینه محاسبه می‌شود، برای اقدامات بهبود منفرد بین ۱/۹ تا ۶/۳ سال و برای سناریوی اجرای همزمان بین ۳ تا ۳/۵ سال متغیر است (جدول ۳). ارتقای ریکوپراتور به دلیل هزینه سرمایه‌ای نسبتاً پایین و صرفه‌جویی فوری انرژی، کوتاه‌ترین دوره بازگشت سرمایه (۱/۹ تا ۲/۵ سال) را ارائه می‌دهد. بهینه‌سازی ریفورمر نیز با دوره بازگشت سرمایه ۲/۵ تا ۳ سال از اقتصاد مطلوبی برخوردار است. ارتقای سیستم Top Gas با حذف CO₂ طولانی‌ترین دوره بازگشت سرمایه (۵ تا ۶/۳ سال) را دارد که عمدتاً به دلیل هزینه سرمایه‌ای بالای واحد جذب CO₂ مبتنی بر آمین است و با یافته‌های مطالعات قبلی همخوانی دارد (Vu et al., 2024). با این حال، وقتی تمامی اقدامات به‌صورت یکپارچه اجرا شوند، دوره بازگشت سرمایه به ۳ تا ۲/۵ سال بهبود می‌یابد که نشان‌دهنده مزایای هم‌افزایی بهینه‌سازی یکپارچه است.

برای مقایسه، سلیمی و همکاران (۲۰۲۲) دوره بازگشت سرمایه بیش از ۱۷ سال را برای سیستم‌های بازیابی حرارت هدررفته در واحدهای MIDREX ایران تحت ساختار تعرفه‌های فعلی خرید تضمینی برق گزارش کرده‌اند که نشان‌دهنده جذابیت نسبی اقتصادی بهبودهای مستقیم بازده پیشنهادی در این مطالعه است. علاوه‌براین، اگرچه ادغام هیدروژن در قیمت‌های فعلی از نظر اقتصادی با گاز طبیعی رقابت‌پذیر نیست، اما مسیر راهبردی برای کاهش انتشار در آینده ارائه می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهد که آهن‌اسفنجی مبتنی بر هیدروژن بسته به منبع برق می‌تواند انتشار CO₂ را ۵۰ تا

۸۰ درصد کاهش دهد (Skaf et al., 2025). و با کاهش هزینه‌های تولید هیدروژن سبز به حدود ۲ تا ۳ دلار بر کیلوگرم، انتظار می‌رود viability اقتصادی ادغام هیدروژن به‌طور قابل‌توجهی بهبود یابد (Astoria et al., 2023). تحلیل اقتصادی در معرض چندین عدم قطعیت است. قیمت گاز طبیعی در ایران در حال حاضر یارانه‌ای است و هرگونه تعدیل آتی به سمت نرخ‌های بازار بین‌المللی، اقتصاد اقدامات پیشنهادی را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد. در مقابل، نوسانات هزینه تجهیزات، هزینه‌های نصب و زمان توقف واحد در حین اجرا می‌تواند دوره بازگشت سرمایه را افزایش دهند. با این وجود، تحلیل نشان می‌دهد که اقدامات بهینه‌سازی پیشنهادی در شرایط فعلی از نظر مالی توجیه‌پذیر بوده و پتانسیل قابل‌توجهی برای صرفه‌جویی هزینه، به‌ویژه در صورت اجرای هماهنگ، ارائه می‌دهند.

نتیجه‌گیری

عملکرد سیستم فرایند گاز متان در فرایند احیای مستقیم آهن به روش MIDREX با تمرکز بر کارایی انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن به‌صورت جامع مورد بررسی قرار گرفت. ترکیب داده‌های واقعی یک واحد صنعتی با شبیه‌سازی دقیق مهندسی در نرم‌افزار Aspen HYSYS امکان تحلیل هم‌زمان رفتار عملیاتی، موازنه جرم و انرژی و اثر سناریوهای اصلاحی را فراهم ساخت. نتایج نشان داد که کیفیت گاز برگشتی، بازده رفورمر و عملکرد ریکوپراتور سه عامل کلیدی در تعیین شدت مصرف انرژی و میزان انتشار CO_2 در واحدهای MIDREX هستند. تحلیل‌ها نشان داد که افزایش CO_2 و بخار آب در گاز برگشتی موجب تشدید واکنش‌های گرماگیر در رفورمر، افزایش بار حرارتی و در نهایت افزایش مصرف گاز طبیعی می‌شود. در مقابل، بهبود عملکرد ریکوپراتور و افزایش دمای پیش‌گرمایش گاز برگشتی می‌تواند بار رفورمر را به‌طور محسوسی کاهش داده و کیفیت گاز احیاکننده را بهبود بخشد. نتایج موازنه جرم و انرژی و دیاگرام سنکی نیز نشان داد که رفورمر بیشترین سهم مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن را در کل واحد به خود اختصاص می‌دهد و کاهش اتلاف حرارتی در این بخش نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود عملکرد کلی دارد. سناریوهای اصلاحی نشان داد که اجرای هم‌زمان اقدامات بهینه‌سازی عملیاتی، شامل کاهش CO_2 گاز برگشتی، ارتقای بازده ریکوپراتور، بهبود شرایط رفورمر و جایگزینی تدریجی هیدروژن، می‌تواند منجر به کاهش ۲۲ تا ۲۵ درصدی مصرف گاز طبیعی و کاهش حدود ۰/۵ تا ۰/۶ تن دی‌اکسیدکربن به‌ازای هر تن آهن اسفنجی شود. این میزان کاهش در مقیاس صنعتی بسیار قابل‌توجه بوده و نشان‌دهنده ظرفیت بالای سیستم فرایند گاز برای کنترل شدت انرژی و آلاینده‌گی است. در مجموع، نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که بهینه‌سازی سیستم فرایند گاز متان نه‌تنها یک راهکار عملی برای افزایش بهره‌وری انرژی واحدهای MIDREX است، بلکه به‌عنوان یک پیش‌نیاز اساسی برای گذار تدریجی به سمت استفاده از هیدروژن و تولید فولاد کم‌کربن و پایدار مطرح می‌شود. رویکرد ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند به‌عنوان چارچوبی مهندسی برای ارزیابی و بهبود عملکرد واحدهای احیای مستقیم در مسیر تحقق اهداف محیط‌زیستی صنعت فولاد مورد استفاده قرار گیرد.

References

- Abadi, M. M., Ghasemi, M., Ghasmi, H. K., Zare, M., Thumu, U., Taghipour, A., & Mohammadi, M. S. H. (2026a). Multiphasic simulation and thermal stress evaluation of an industrial methane reformer in the DRI hydrogen production process. *Chemical Engineering Research and Design*, 226, 114–133. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2025.12.033>
- Abadi, M. M., Rashidi, M. M., & Thumu, U. (2026b). Modeling and optimization of methanol-fueled MIDREX reformers for energy-efficient hydrogen production. *Energy Conversion and Management: X*, 101521. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101521>

- Adewuyi, Y. G., & Fletcher, S. (2019). Top gas composition impacts on reformer efficiency in MIDREX DRI plants. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 67, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.04.015>
- Alvarez, D., & Gómez-Barea, A. (2018). Process simulation of natural gas-based DRI plants. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 43, pp. 1537–1542). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64235-6.50269-3>
- Ariyama, T. (2025). Perspectives on the promising pathways to zero carbon emissions in the steel industry toward 2050. *ISI International*, 65(2), 165–184. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-320>
- Association, W. S. (2024). Sustainability indicators 2023 report. World Steel Association.
- Astoria, T., Hughes, G., & Mizutani, N. (2023). Moving from natural gas to hydrogen. *Steel Times International*, 47(1), 40–45.
- Chevrier, V., Lauren, L., & Michishita, H. (2021). MIDREX® Process: Bridge to ultra-low CO₂ ironmaking. *Kobelco Technology Review*, 39, 33–40. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:264431946>
- Davis, C., Li, Z., Styring, P., Curry, R., & Holliman, P. J. (2025). Routes to reducing emissions from steel production. *Nature Reviews Clean Technology*, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s44359-025-00118-1>
- Draxler, M., Sormann, A., Kempken, T., Pierret, J.-C., De Santis, M., Ratto, V., & others. (2021). Funding opportunities to decarbonise the EU steel industry. *Green Steel for Europe*.
- Ezzati, A., & Carroll, J. (2018). Energy analysis and gas recycling in MIDREX DRI plants. *Journal of Cleaner Production*, 196, 645–657. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.038>
- Gielen, D., & Yagi, M. (2021). Iron and steel technology roadmap. International Energy Agency.
- Himmelblau, D. M., & Riggs, J. B. (2012). *Basic principles and calculations in chemical engineering* (8th ed.). Prentice Hall.
- Horne, S., & Miller, T. (2017). The MIDREX direct reduction process: Past, present, and future developments. *Iron & Steel Technology*, 14(7), 45–52.
- International Energy Agency. (2020). *Energy efficiency and decarbonisation pathways for iron and steel* (Tracking Report Series).
- International Energy Agency. (2021). *Tracking Industry CO₂ Emissions*. Paris: IEA.
- Kopfle, J., & Hunter, R. (2008). Direct reduction's role in the world steel industry. *Ironmaking & Steelmaking*, 35(4), 254–259. <https://doi.org/10.1179/174328108X301732>
- Kumar, V., & Singh, R. (2018). Thermal analysis of shell & tube recuperators. *Applied Thermal Engineering*, 130, 120–131.
- Midrex Technologies, Inc. (2021). *Midrex process overview and innovations*.
- Midrex Technologies, Inc. (2025). *The green revolution in steelmaking: How Midrex is leading the way*.
- Rechberger, K., Spanlang, A., Sasiain Conde, A., Wolfmeir, H., & Harris, C. (2020). Green hydrogen-based direct reduction for low-carbon steelmaking. *Steel Research International*, 91(11), 2000110. <https://doi.org/10.1002/srin.202000110>
- S&P Global. (2026). INTERVIEW: Midrex plans for 16 new plants on rising direct-reduction tech demand. *S&P Global Commodity Insights*.
- Schlacke, S., Wentzien, H., Thierjung, E.-M., & Köster, M. (2022). Implementing the EU Climate Law via the 'Fit for 55' package. *Oxford Open Energy*, 1, oiab002. <https://doi.org/10.1093/ooenergy/oiab002>
- Skaf, A., Tiruta-Barna, L., & Ahmadi, A. (2025). Technical and environmental assessment of new green iron production strategies using hydrogen. *Journal of Cleaner Production*, 532, 146970. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146970>
- Szekely, J., Evans, J. W., & Sohn, H. Y. (1976). *Gas-solid reactions*. Academic Press.
- Vu, T. T., Seo, J., Kim, E., Ryoo, S. G., Park, B. C., & Song, D. (2024). Techno-economic analysis of integrated MIDREX process with CO₂ capture and storage: Evaluating sustainability and viability for iron production. *Process Safety and Environmental Protection*, 189, 1314–1322. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.07.005>

- Wang, C., Mellin, P., Lövgren, J., Nilsson, L., Yang, W., Salman, H., Hultgren, A., & Larsson, M. (2020). CO₂ capture and utilization in direct reduction ironmaking. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123321. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123321>
- Zhao, Z., Tang, J., Chu, M., Wang, X., Zheng, A., Wang, X., & Li, Y. (2022). Direct reduction swelling behavior of pellets in hydrogen-based shaft furnaces under typical atmospheres. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 29(10), 1891–1900. <https://doi.org/10.1007/s12613-022-2494-4>



Sustainable Landscape Design of the Karaj-Qazvin Freeway for Enhancing Safety and Maintaining Habitat Connectivity

Mahdi Khansefid^{a*}, Zeinab Ansari Jabeti^a, Saba Arasteh^a

^aDepartment of Horticultural Sciences and Green Space, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: mkhansefid@ut.ac.ir, <https://orcid.org/0000-0002-8077-6268>

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 2026/02/22
Received in revised form:
2026/04/13
Accepted: 2026/04/28
Available online: 2026/06/01

Keywords:
Road safety,
Habitat analysis,
Wildlife casualties,
Ecological corridor,
Freeway design.

ABSTRACT

Freeway networks are essential for transportation efficiency, but they often generate adverse consequences, including increased public safety risks and fragmentation of natural habitats. This study aimed to enhance safety for both human and wildlife populations along the Karaj–Qazvin Freeway by proposing ecologically sensitive and safety-oriented landscape interventions. The study adopted a descriptive–analytical approach combining a systematic literature review, case study selection, and extensive field investigations. The Karaj–Qazvin Freeway was selected as the study area because of its strategic importance, high traffic volume, and its location within a region with significant wildlife presence and a history of road-related accidents. Data were collected through documentary and field survey methods. Documentary sources included traffic accident reports, environmental impact assessments, and previous transportation studies. Field surveys involved direct observation of traffic patterns, identification of wildlife crossing points, and documentation of existing landscape features. A segmented SWOT analysis was employed to identify strengths, weaknesses, opportunities, and threats within different freeway sections. This analytical tool helped in formulating appropriate design strategies tailored to the specific conditions of each segment. The findings indicated that integrating wildlife underpasses, dedicated pedestrian overpasses, and protective barriers combined with guiding vegetation can substantially improve road safety and ecological performance. Wildlife underpasses allow animals to cross safely beneath the freeway, reducing the risk of collisions. Pedestrian overpasses provide safe crossing points for local communities, minimizing human casualties. Protective barriers and guiding vegetation direct both wildlife and pedestrians toward designated crossing structures. Based on the identified needs and environmental conditions, a section of the freeway was redesigned according to engineering and ecological standards. The proposed interventions are expected to reduce wildlife–vehicle collisions and traffic accidents while improving habitat connectivity. The results demonstrate that incorporating ecological principles into freeway landscape design can effectively balance transportation functions with environmental conservation objectives. Such integrated approaches contribute to biodiversity protection, enhance landscape resilience, and promote sustainable transportation infrastructure. This study provides practical recommendations for planners and decision-makers involved in highway development projects in similar ecological contexts.

Cite this article: Khansefid, M., ansari jabeti, Z., & arasteh, S. (2026). Sustainable Landscape Design of the Karaj–Qazvin Freeway for Enhancing Safety and Maintaining Habitat Connectivity. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 2(1), 91-113. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252692>



© The Author(s).

Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252692>

Introduction

Although the development of freeway networks plays a vital role in facilitating transportation and intercity communication, it is often accompanied by unintended environmental consequences, including habitat fragmentation, wildlife–vehicle collisions, noise and air pollution, and reduced user safety. In Iran, roads are historically perceived not only as transit routes but also as cultural and spatial corridors with distinct identities. However, contemporary freeway design has largely prioritized traffic engineering criteria, often overlooking ecological, aesthetic, and experiential dimensions. This has resulted in ecological disruption, increased wildlife accidents, degraded landscape quality, and reduced user satisfaction. The Karaj–Qazvin Freeway, which passes through foothills, agricultural lands, and settlements, represents a clear example of the conflict between transportation efficiency and environmental considerations. Known as one of the most accident-prone freeways in Iran, it highlights the urgent need to reconsider current design approaches. Key research gaps include the lack of integrated studies addressing safety, sustainability, and habitat restoration simultaneously, limited quantitative evaluation of wildlife crossing effectiveness, and insufficient attention to the cultural and visual functions of freeway landscapes. The main objective of this study is to develop a practical framework for the landscape design of the Karaj–Qazvin Freeway, transforming it into a multifunctional ecological corridor that enhances wildlife safety, resident safety, user safety, and habitat continuity. The significance of this research lies in integrating road ecology, sustainable landscape design, and traffic safety principles to provide a context-sensitive model that can be applied to other freeways in Iran.

Method

This research was implemented in five consecutive steps using a combined approach based on context-sensitive design. In the first step, the Karaj–Qazvin Freeway was selected as a case study due to its unique features, including passing through natural and agricultural areas, proximity to metropolises, and high biodiversity. In the second step, extensive library studies were conducted on reputable domestic and international sources in the fields of road ecology, sustainable landscape design, traffic safety, and ecological corridors to identify and formulate the theoretical foundations and background of the research. In the third step, a comprehensive field survey was conducted along the entire 13.3 km freeway route, which included systematic photography, documentation of landscape elements (skyline, building facades, visual quality, walls, vegetation, and adjacent uses), and recording the precise location of natural and man-made features. In the fourth step, using field data and base maps, a SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats) analysis was conducted for the entire route as well as for its various sections (based on the division into sections A, B, and C), and the potential and design constraints in each section were identified. To increase the accuracy of the analysis, adjacent uses were classified into eight main categories (parks, intersections, private gardens, rivers, wastelands, agricultural lands, industrial areas, and religious sites) and the location of each was tracked and recorded. In the fifth step, based on the findings of the analysis, design strategies were developed for each section, and then a section of the freeway (including the linear park and the riverfront) as an example reached the executive design stage, and 2D maps and planting plans were prepared. The data analysis method was qualitative-analytical and combined field observations, library documents, and standard design criteria. The main limitation of the research was the lack of access to accurate wildlife accident statistics and long-term traffic data along the route, which was partially compensated by field observations and qualitative analyses.

Results

The field survey and SWOT analysis of the Karaj–Qazvin freeway identified several key strengths, including its scenic route passing near the Botanical Garden, the presence of agricultural and mountainous landscapes, cultural–religious landmarks such as Imamzadeh sites, and relatively well-planned design in certain segments. However, notable weaknesses were also observed, such as poor asphalt quality in some sections, outdated irrigation practices, insufficient retaining structures, lack of pedestrian infrastructure, visual disorder in certain areas, and noise pollution affecting nearby residents. At the same time, the analysis highlighted important opportunities, including the rehabilitation of degraded lands along the freeway, increasing vegetation cover in the median strip, development of a riverside landscape along the Karaj River, establishment of roadside rest areas, and improvement of visual quality through artistic facade design. Key threats included environmental pollution from heavy traffic, uncontrolled urban development, damage from metro infrastructure, proximity of residential zones to the highway, and weak institutional coordination in landscape management.

Based on these findings, four main design strategies were proposed: enhancing wildlife safety through ecological crossings and protective barriers; improving pedestrian and residential safety via bridges, sidewalks, and bicycle paths; reducing driver fatigue and improving safety through vegetation planning, visual diversity, and rest areas; and restoring ecological continuity by developing linear parks, rehabilitating the Karaj River corridor, and planting native, resilient species to reduce pollution and maintenance needs. Some of these strategies have already progressed to implementation, particularly in the form of linear park and river corridor development projects.

Conclusions

The findings indicate that the Karaj–Qazvin Expressway, despite its important transportation function, faces significant ecological, visual, and safety challenges. Its predominantly traffic-oriented design has disrupted natural habitats, increased risks to wildlife and residents, and created a monotonous and tiring visual experience for drivers. The study therefore emphasizes a shift toward integrated, context-based landscape design that simultaneously addresses human safety, wildlife protection, visual quality, and ecological sustainability. The proposed strategies, including ecological underpasses, pedestrian bridges, protective green walls, linear parks, and roadside rest areas, could transform the expressway into a natural-cultural corridor while improving safety, protecting biodiversity, and enhancing the travel experience. Successful implementation, however, requires institutional coordination, sustainable funding, community participation, and continuous scientific monitoring. Future research should focus on GIS-based mapping of wildlife–vehicle conflict zones, evaluating the effects of interactive landscape elements on driver behavior and public awareness, and quantitatively assessing multilayer vegetation for noise reduction, safety improvement, and ecological sustainability. The proposed approach can also serve as a model for other Iranian freeways facing similar environmental and safety challenges.



طراحی منظر پایدار آزادراه کرج-قزوین با هدف ارتقای ایمنی و حفظ پیوستگی زیستگاهها

مهدی خان سفید^{a*}، زینب انصاری جابری^a، صبا آراسته^a

^aگروه علوم باغبانی و فضای سبز، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: mkhansefid@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	توسعه شبکه های آزادراهی اگرچه نقش بسزایی در تسهیل حمل و نقل و افزایش کارایی جابه جایی دارد، اما اغلب با پیامدهای ناخواسته ای همچون به خطر انداختن ایمنی شهروندان، افزایش تصادفات جاده ای و تخریب زیستگاه های طبیعی همراه است. این پژوهش با هدف کاهش اثرات نامطلوب و با تمرکز بر افزایش ایمنی برای انسان و حیات وحش در مسیر آزادراه کرج - قزوین انجام شده است. آزادراه کرج - قزوین به دلیل موقعیت راهبردی، تردد بالای وسایل نقلیه، حضور چشمگیر حیات وحش در حاشیه مسیر و سابقه تصادفات جاده ای مرتبط با حیوانات، به عنوان محدوده مطالعه انتخاب گردید. روش کار به این صورت بود که پس از بررسی منابع معتبر و مرور نظام مند پژوهش های پیشین در زمینه ایمنی راهها و گذرگاه های بوم شناختی، این آزادراه به عنوان مطالعه موردی انتخاب و در ادامه، بررسی میدانی کاملی در طول مسیر آن انجام گرفت. در بازدیدهای میدانی، الگوهای تردد خودروها، نقاط عبور حیات وحش و وضعیت تأسیسات و مناظر حاشیه راه مورد شناسایی و مستندسازی قرار گرفت. با استفاده از تحلیل SWOT برای هر بخش از آزادراه، نقاط قوت، ضعف، فرصت ها و تهدیدها شناسایی و بر اساس آن، راهبردهای طراحی متناسب با شرایط هر بخش تدوین شد. بر اساس یافته ها، راهکارهای اصلی شامل ایجاد زیرگذرهای بوم شناختی برای عبور ایمن حیوانات، ساخت پل های عابر پیاده ویژه ساکنان محلی، و احداث دیوارهای محافظ همراه با پوشش گیاهی هدایت کننده است که حیوانات و عابران را به سمت گذرگاه های تعیین شده سوق می دهد. در ادامه، بخشی از آزادراه بر اساس استانداردهای طراحی مهندسی و بوم شناختی بازطراحی شد. نتایج نشان می دهد اجرای این اقدامات می تواند حوادث جاده ای و تصادفات ناشی از برخورد با حیات وحش را کاهش داده و اتصال زیستگاه ها را حفظ کند. در مجموع، رویکرد تلفیقی طراحی منظر با اصول بوم شناختی می تواند ضمن بهبود ایمنی راهها، به حفاظت از تنوع زیستی و ارتقای پایداری زیرساخت های حمل و نقل کمک نماید.
کلیدواژه ها: ایمنی جاده ای، تحلیل زیستگاه، تلفات حیات وحش، راهروهای بوم شناختی، طراحی آزادراه.	

استناد به این مقاله: خان سفید، مهدی؛ انصاری جابری، زینب و آراسته، صبا. (۱۴۰۵). طراحی منظر پایدار آزادراه کرج-قزوین با هدف ارتقای ایمنی و حفظ پیوستگی زیستگاه ها. راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، ۲(۱)، ۹۱-۱۱۳. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252692>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252692>

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

در ایران، مفهوم «راه» به دلیل تنوع جغرافیایی، پیشینه طولانی زیست و کوچ‌نشینی، با برداشت رایج در دیگر نقاط جهان تفاوت دارد. راه‌ها در این سرزمین نه تنها مسیر عبور، بلکه راهروهای بوم‌شناختی طبیعی و فرهنگی با هویت مستقل و حامل رویدادها و نشانه‌های فرهنگی بوده‌اند. در طول زمان، عناصر وابسته به راه و پدیده‌های فرهنگی پیرامون آن به جاذبه‌ها و محل مراجعه انسان‌ها تبدیل شده و مفهوم «راه فرهنگی» که ^۱ICOMOS در دهه‌های اخیر برای ثبت جهانی مطرح کرده‌است، در ایران زمینه‌ای غنی برای توسعه و تعمیق دارد (Bird, 2024; Fardanesh & Arefian, 2021).

در عصر حاضر، طراحی منظر آزادراه‌های شهری دیگر تنها به معنای ایجاد مسیر سریع‌السير نیست؛ بلکه این فضاها به‌عنوان راهروهای بوم‌شناختی و عمومی با تأثیر بر ایمنی کاربران، سلامت بوم‌سازگان‌ها و پایداری محیط‌زیست مطرح هستند (Forman et al., 2013). با افزایش سرعت حرکت خودروها، ادراک بصری کاربران تغییر یافته و توجه بیشتر به عناصر دور و ثابت معطوف می‌شود، از این‌رو طراحی هوشمند جداره‌ها برای ارتقای ایمنی و کیفیت تجربه بصری اهمیت ویژه‌ای دارد (Habibi et al., 2022). آزادراه کرج-قزوین، به عنوان شریان حیاتی کلان‌شهر تهران که از میان عرصه‌های طبیعی، کشاورزی و سکونتگاه‌های انسانی عبور می‌کند، نمونه‌ای بارز از تنش میان عملکرد حمل‌ونقلی و اثرات محیط‌زیستی است و ضرورت رعایت اصول طراحی منظر پایدار در آن دوچندان می‌شود (Habibi et al., 2022). رویکردهای سنتی طراحی آزادراه‌ها عمدتاً بر معیارهای مهندسی ترافیک تمرکز داشته و پیامدهای بوم‌شناختی را موضوعی ثانویه می‌دانند که این امر موجب گسست بوم‌شناختی، افزایش تصادفات با حیوانات و آلودگی منابع طبیعی شده و تاب‌آوری منظر شهری و طبیعی را کاهش داده‌است (Popp et al., 2023). باوجود پیشرفت‌های اخیر در حوزه بوم‌شناسی جاده و طراحی پایدار، همچنان شکاف‌های دانشی مهمی باقی است. نخست، مطالعات یکپارچه‌ای که هم‌زمان ابعاد ایمنی، پایداری و احیای زیستگاه را باتوجه به ویژگی‌های خاص منطقه بررسی کنند، بسیار محدود هستند. دوم، ارزیابی کمی اثرگذاری طرح‌های اجراشده مانند گذرگاه‌های حیات‌وحش با روش‌های علمی به‌ندرت انجام شده است. سوم، ظرفیت منظر آزادراه برای ارائه خدمات فرهنگی و ارتقای تجربه بصری رانندگان کمتر موردتوجه قرار گرفته‌است (Gao et al., 2025; Kim et al., 2024; Sukhontapatipak et al., 2025).

آزادراه کرج - قزوین به دلیل عبور از مناطق طبیعی ارزشمند مانند کوهپایه‌های البرز و دشت حاصلخیز قزوین، مجاورت با کلان‌شهرها و تنوع زیستی بالا، نمونه‌ای ایده‌آل برای بررسی تعارض و فرصت هم‌زیستی زیرساخت‌های خطی و محیط‌زیست است. این مسیر چالش‌ها و فرصت‌های پیونددهنده طراحی زیرساخت، ایمنی و بوم‌شناسی را نمایان کرده و امکان توسعه رویکردی بین‌رشته‌ای برای طراحی منظر پایدار را فراهم می‌سازد. باتوجه به این زمینه‌ها، این پژوهش تلاش دارد چارچوبی عملی برای طراحی منظر آزادراه کرج-قزوین ارائه دهد تا مسیر به یک **راهروهای بوم‌شناختی** چند عملکرد تبدیل شود و هم‌زمان ایمنی، خدمات بوم‌سازگانی و کیفیت ادراکی کاربران ارتقا یابد. اهداف پژوهش شامل افزایش ایمنی حیات‌وحش از طریق ایجاد دالان‌های زیرگذر و روگذر و ارتقای آموزش عمومی در زمینه حفاظت از حیوانات، ارتقای ایمنی ساکنین حریم راه با طراحی پل‌ها و حایل‌های مناسب و ساماندهی فضاهای ناامن، افزایش ایمنی کاربران با کنترل دید، جلوگیری از خیرگی و ایجاد تنوع بصری مسیر برای کاهش خستگی رانندگان و در نهایت احیای پیوستگی زیستگاه و تقویت خدمات بوم‌سازگانی است (Gholampour et al., 2022).

¹ International Council on Monuments and Sites

در مجموع، این مطالعه نه تنها به بازخوانی مفهوم تاریخی و فرهنگی راه در ایران می‌پردازد، بلکه با الهام از آن، مسیر آزادراه کرج-قزوین را به نمونه‌ای از طراحی منظر پایدار، ایمن و چند عملکردی تبدیل می‌کند که هماهنگی میان نیازهای انسانی و الزامات بوم‌شناختی را در بستر یک فضای خطی فراهم می‌آورد.

پیشینه پژوهش

بررسی سیر تحقیقات انجام‌شده در حوزه طراحی جاده‌های حساس به حیات‌وحش و منظر بزرگراه‌های شهری، حاکی از توجه تدریجی به ابعاد بوم‌شناختی و اجتماعی است. در بستر ملی، در پژوهشی به بهسازی منظر حاشیه بزرگراه چمران شیراز پرداختند و بر ایجاد مسیرهای پیاده‌روی پیوسته، ایمن و تفریحی منطبق بر باغ‌های موجود و فرهنگ منطقه تأکید کردند. یافته‌های آن‌ها اولویت‌های کاربران را «تنوع پوشش گیاهی» و «خوانایی مسیر» با استفاده از نورپردازی و فعالیت‌های مشارکتی شناسایی نمود. در ادامه، با تمرکز بر کاهش استرس شهروندان در میدان ۹ دی تهران، به کارگیری گونه‌های گیاهی متنوع، لاین دوچرخه‌سواری و آب‌نماها را به عنوان عواملی برای ایجاد حس آرامش و بهبود منظر شهری معرفی کردند. با ارتقای سطح تحلیل به مقیاس کلان‌شهری، تمرکز بر تاب‌آوری منظر، شاخص‌هایی چون تنوع زیستی، پیوستگی بوم‌شناختی و چندعملکردی بودن را برای دستیابی به پایداری در طراحی منظر بزرگراه‌های شهری ارائه نمودند (Karkhaneh et al., 2023). در جدیدترین پژوهش داخلی، با خوانش تهران به مثابه یک متن از طریق منظر ذهنی رانندگان تاکسی، نشان دادند که چگونه مدرنیته می‌تواند به شکل‌گیری تجربه‌ای گسسته، احساس بی‌هویتی و حافظه‌ای تهی از معنا در کلان‌شهر بینجامد (Rashidpour et al., 2023).

در عرصه بین‌المللی، یافته‌ها بر جنبه‌های فنی و سیاستگذاری تمرکز دارند. (Laube et al., 2023) با تحلیل داده‌های ۴۳ هزار مورد برخورد حیات‌وحش و خودرو در سوئیس، به مدل‌سازی نقاط حادثه‌خیز پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد عواملی مانند «انحناء جاده»، «میزان پوشش غذایی» و «نویز ترافیکی» محوری‌ترین متغیرها هستند و استفاده از داده‌های دقیق پوشش زمینی می‌تواند قدرت پیش‌بینی این نقاط را افزایش دهد. در همان سال، (Su et al., 2023) با ارائه یک چارچوب تحلیلی جامع، عوامل مؤثر بر برخورد خودرو و حیات‌وحش را در چهار دسته «ویژگی‌های گونه»، «ویژگی‌های جاده و ترافیک»، «ویژگی‌های منظر» و «عوامل انسانی» دسته‌بندی و تعامل پیچیده بین این عوامل را تشریح کردند. سرانجام، در یک مقاله مروری نتیجه گرفتند که با وجود معرفی ابزارها و روش‌های شناخته‌شده برای «طراحی جاده حساس به حیات‌وحش»، بسیاری از پروژه‌های حمل‌ونقل فاقد ادغام کافی این ملاحظات در طراحی خود هستند (Johnson et al., 2022). آن‌ها بر لزوم گنجاندن این راهکارها در سیاست‌ها و طرح‌های کلان حمل‌ونقل برای دستیابی به شبکه‌ای پایدارتر تأکید نمودند.

به عبارتی می‌توان گفت پایداری در پروژه‌های طراحی آزادراه به معنای کاهش اثرات منفی بر محیط‌زیست، مصرف بهینه منابع و افزایش تاب‌آوری بوم‌شناختی است. از جمله اصول کلیدی در این زمینه می‌توان به کاهش شکاف بوم‌شناختی با احداث گذرگاه‌های حیات‌وحش اشاره کرد که هم پیوستگی زیستگاه را حفظ می‌کنند و هم ایمنی ترافیک را افزایش می‌دهند (Clevenger & Huijser, 2011). مدیریت آب‌های سطحی از طریق سیستم‌های طبیعی مانند سیستم‌های نگهداشت زیستی^۱ برای تصفیه روان آب‌ها (Ferguson, 2005) و احیای پوشش گیاهی بومی برای کاهش نیاز به نگهداری و تقویت زیستگاه‌های محلی از دیگر راهکارهای مؤثر در پایداری آزادراه‌ها محسوب می‌شوند (Forman et al., 2003).

^۱ Bioretention

منظر آزادراه همچنین می‌تواند به طور فعال در ارتقای ایمنی نقش ایفا کند؛ به‌عنوان مثال، استفاده از کاشت گیاهان برای هدایت بصری راننده در قوس‌ها و کاهش خستگی او (Dumbaugh & Rae, 2009) و نصب حصارهای هدایت‌کننده حیوانات به سمت گذرگاه‌ها برای کاهش تصادفات از راهکارهای کلیدی در این حوزه هستند. رویکرد بنیادین این است که آزادراه را نه به‌عنوان عنصری بیگانه، بلکه بخشی از زیستگاهی بزرگ‌تر و پیوسته در نظر بگیریم. تحقیقات اخیر بر کمی‌سازی مزایای طراحی منظر با بهره‌گیری از فناوری‌هایی مانند GIS و مدل‌سازی مسیرهای حرکت حیات‌وحش تأکید دارند (Popp et al., 2023). همچنین، تمرکز بر خدمات بوم‌سازگانی به‌عنوان مبنای طراحی، توسعه ایمنی هوشمند با استفاده از حسگرها و به‌کارگیری مواد و فناوری‌های پایدار نوین روندهای قابل‌توجهی در طراحی منظر آزادراه‌ها را شکل داده‌اند (Balzan et al., 2021; Huijser et al., 2021; Tafida et al., 2024). (mokhles et al., 2015) در تحلیل منظر بزرگراه‌های یادگار امام و شهید همت با رویکرد زیبایی‌شناسی نشان دادند که آشفتگی بصری در این محورها ناشی از کم‌توجهی به فرایند معنابخشی و فقدان برنامه‌ای جامع در طراحی جداره‌هاست؛ برنامه‌ای که می‌بایست منطبق با تاریخ طبیعی و هویتی در چارچوب طرح جامع شهری تدوین شود. این یافته‌ها هم‌راستا با اهداف پژوهش حاضر، بر لزوم تلفیق اصول زیبایی‌شناسی، بوم‌شناسی و برنامه‌ریزی شهری در طراحی منظر آزادراه‌ها تأکید دارند. براین‌اساس، پژوهش حاضر با اتکا به این مبانی، به بررسی و ارائه راهکارهای علمی و عملی برای آزادراه کرج-قزوین می‌پردازد تا هم‌زمان پایداری محیط‌زیست، ایمنی کاربران و کیفیت ادراکی مسیر ارتقا یابد.

مرور نظام‌مند پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که این مطالعات عمدتاً در سه دسته قابل‌تقسیم‌بندی هستند: پژوهش‌های مهندسی ترافیک با تأکید بر ایمنی و کاهش تصادفات (Dumbaugh & Rae, 2009)؛ مطالعات بوم‌شناسی راه با تمرکز بر اثرات محیط‌زیستی زیرساخت‌های خطی (Forman et al., 2013)؛ و پژوهش‌های طراحی منظر با رویکرد زیبایی‌شناختی (Karkhaneh et al., 2023). باوجود ارزش هر یک، هیچ‌یک رویکردی یکپارچه برای تلفیق هم‌زمان این سه مؤلفه ارائه نداده‌اند. پژوهش حاضر با شناسایی این شکاف دانشی، مدلی تحلیلی ارائه می‌دهد که در آن داده‌های میدانی، تحلیل SWOT و راهبردهای طراحی به‌طور نظام‌مند پیوند می‌خورند تا ضمن پاسخگویی به هر سه حوزه، چارچوبی عملیاتی برای طراحی آزادراه‌های کشور فراهم آورد.

روش‌شناسی پژوهش

پژوهش پیش‌رو با هدف تدوین راهبردهای طراحی منظر ایمن، پایدار و یکپارچه برای آزادراه کرج-قزوین، بر پایه رویکردی ترکیبی و مبتنی بر طراحی زمینه‌محور^۱ شکل گرفته است. این آزادراه (شکل ۱) که بخشی از شریان اصلی شماره ۲ (تهران-تبریز) به شمار می‌رود، به طول ۱۳/۳ کیلومتر، دو استان البرز و قزوین را به هم متصل می‌کند. با وجود اهمیتی که به‌عنوان یک محور ترانزیتی دارد، متأسفانه آمار تصادفات در این مسیر همواره نگران‌کننده بوده و آن را به پرتصادف‌ترین آزادراه کشور تبدیل کرده است، تا جایی که شورای ترافیک کشور ناچار به کاهش سرعت مجاز در بخش تهران تا پس از هشتگرد از ۱۲۰ به ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت شده است. از سوی دیگر، عبور این مسیر از پهنه‌های طبیعی و کشاورزی و نیز تنوع چشمگیر کاربری‌های حاشیه آن، ضرورت نگاهی فراتر از اقدامات صرفاً ترافیکی را آشکار می‌سازد و همین امر، انتخاب آن را به‌عنوان مطالعه موردی این پژوهش توجیه می‌کند.

روش تحقیق در این مقاله، ترکیبی از مراحل منسجم و به‌هم‌پیوسته است که در ادامه تشریح می‌شود. نخستین گام، به مطالعات کتابخانه‌ای و بررسی نقشه‌های پایه اختصاص یافت تا ضمن شناسایی کاربری‌های هم‌جوار نظیر پارک‌ها، باغ‌های خصوصی، رودخانه، زمین‌های بایر، تقاطع‌ها و سایر زیرساخت‌ها، موقعیت مکانی هر یک با دقت ثبت

^۱ Context-Sensitive Design

و در سامانه اطلاعات جغرافیایی ذخیره شود. گام بعدی، پیمایش میدانی و عکس‌برداری نظام‌مند در تمام طول مسیر بود که طی آن، عواملی چون خط آسمان، ترکیب نماها، کیفیت بصری منظر پیرامون و همچنین درک رانندگان و عابران پیاده از فضا، مستند و تحلیل شدند. این مشاهدات میدانی، زمینه‌ساز ارزیابی کیفی مبتنی بر شناسایی نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدهای منظر آزادراه گردید. در مرحله بعد، تمام داده‌های گردآوری‌شده در قالبی یکپارچه، به نقشه پتانسیل‌ها و محدودیت‌های طراحی در طول مسیر تبدیل شد و بر مبنای آن، یک طرح راهبردی جامع برای کل آزادراه تدوین گردید. در پایان، بخشی از این طرح به‌عنوان نمونه انتخاب و به مرحله طراحی اجرایی رسید و نقشه‌های دوبعدی آن ترسیم شد تا قابلیت عملیاتی‌شدن راهبردهای پیشنهادی به محک آزمون گذاشته شود. اتخاذ چنین رویکرد زمینه‌محوری، این امکان را فراهم آورد که راهکارهای طراحی برای هر بخش از مسیر، متناسب با ویژگی‌های خاص همان بازه تدوین شوند و از این رهگذر، درکی واقع‌گرایانه از پیچیدگی‌های منظر آزادراه و راهبردهایی همسو با واقعیت‌های محیطی، عملکردی و ادراکی حاصل شود.



شکل ۱. آزاد راه کرج-قزوین (google earth, 2025)

Figure 1. Karaj-Qazvin Freeway

یافته‌ها و بحث

خط آسمان

در تمامی طول مسیر کرج-قزوین، خط آسمان طبیعی کوه‌ها به‌عنوان یکی از عناصر شاخص منظر مسیر قابل‌مشاهده است (شکل ۲). همچنین در طول مسیر، خط آسمان درختان به‌صورت متناوب و منقطع دیده می‌شود. در بخش‌هایی از مسیر، خط آسمان مصنوعی شامل ساختمان‌های مسکونی با ریتمی منظم و در برخی موارد با ریتمی نامنظم مشاهده می‌شود. بااین‌حال، به دلیل فاصله زیاد ساختمان‌ها از بزرگراه و وجود دیوارهای بتنی جداکننده در مسیر کرج-قزوین، در برخی قسمت‌ها خط آسمان مصنوعی این فضاها دیده نمی‌شود.





شکل ۲. تحلیل خط آسمان

Figure 2. Skyline Analysis

دید و منظر

آزادراه کرج- قزوین با عبور از میان چشم‌اندازهای طبیعی کوهستانی، اراضی کشاورزی و پوشش‌های سبز، از ظرفیت‌های بصری قابل توجهی برای ارتقای کیفیت فضایی و تجربه سفر برخوردار است (شکل ۳). با این وجود، وجود عناصر ناهمگون مانند دیوارهای بتنی، ساخت‌وسازهای صنعتی و عدم طراحی یکپارچه در جداره‌های مسیر، به گسست دیداری و کاهش انسجام منظر انجامیده‌است. طراحی منظر این محور باید با رویکردی زمینه‌محور و چندلایه، ضمن حفظ پیوستگی بوم‌شناختی، به هدایت بصری، کاهش خستگی رانندگان و افزایش ایمنی بینجامد. در این صورت، این آزادراه علاوه بر کارکرد حمل‌ونقلی، می‌تواند واجد کیفیت‌های زیبایی‌شناختی و محیط‌زیستی نیز باشد.





شکل ۳. تحلیل دید و منظر

Figure 3. View and landscape analysis

تحلیل نمای ساختمانی و سازه های انسان ساز حاشیه اتوبان

نمای ساختمانی حاشیه آزادراه کرج-قزوین (شکل ۴)، با وجود تنوع عملکردی و بصری، فاقد انسجام با بستر طبیعی هستند. ساخت وسازه های صنعتی، انبارها، دیوارهای بتنی و ساختمان های مسکونی با نمای ناهماهنگ، موجب آشفتگی دیداری و گسست در تجربه بصری مسافران شده اند. علت اصلی این مسئله، نبود ضوابط طراحی برای جداره های بزرگراهی و بی توجهی به مؤلفه هایی چون مصالح، رنگ، مقیاس و فرم است که نه تنها کیفیت منظر را کاهش داده، بلکه تعامل میان زیرساخت حمل و نقل و محیط پیرامونی را نیز مختل کرده است. از این رو، طراحی یکپارچه و زمینه محور این سازه ها می تواند به ارتقای هویت بصری، کاهش آلودگی دیداری و تقویت پیوستگی فضایی در این مسیر کمک شایانی نماید.



شکل ۴. تحلیل نما ساختمانی حاشیه بزرگراه

Figure 4. Analysis of the building facade along the highway

بر اساس مدل تحلیلی تشریح‌شده (جدول ۱)، ابتدا امکانات و محدودیت‌های هر بخش بررسی گردید (جدول ۲)، سپس پتانسیل و ممنوعیت طراحی هر بخش مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۳)، بعد از آن راهبردهای طراحی به صورت هدفمند و با تطابق میان مؤلفه‌های SWOT و پتانسیل‌های هر بخش تدوین گردید (جدول ۴). یافته‌ها نشان می‌دهد که هر راهبرد در پاسخ به یک یا چند مسئله مشخص از SWOT و با بهره‌گیری از فرصت‌های موجود در همان بخش شکل گرفته است. به عنوان نمونه، در بخش A، زیرگذرهای بوم‌شناختی در پاسخ به گسست زیستگاهی ناشی از قطعه‌قطعه شدن زیستگاه‌ها و مشاهده میدانی تردد حیات وحش، و با بهره‌گیری از پتانسیل راهروهای طبیعی رودخانه کرج و مجاورت با باغ گیاه‌شناسی انتخاب شدند؛ همچنین پارک خطی حاشیه رودخانه در پاسخ به زمین‌های بایر و آشفته‌گی بصری و با بهره‌گیری از پتانسیل دید مطلوب و حریم رودخانه تدوین گردید؛ و طراحی فضای سبز تقاطع‌ها در پاسخ به محدودیت دید رانندگان سر پیچ‌ها و با استفاده از اراضی خالی اطراف تقاطع‌ها پیشنهاد شدند. در بخش B، پل‌های عابر پیاده در پاسخ به نبود دسترسی ایمن ساکنین باغات اطراف و مشاهده مستقیم عبور خطرناک عابران از عرض جاده، و با استفاده از فرصت وجود جاذبه‌های فرهنگی-مذهبی همچون امام‌زاده و ترمینال شهید کلانتری تدوین گردیدند؛ همچنین دیوارهای محافظ با پوشش گیاهی هدایت‌کننده در پاسخ به نزدیکی اماکن مسکونی به بزرگراه و آلودگی صوتی و با بهره‌گیری از دیوارهای بتنی موجود به عنوان زیرساخت اولیه شکل گرفتند؛ و کمان خطی سبز در پاسخ به نیاز به افزایش امنیت ساکنین و کاهش خستگی رانندگان طراحی شد. در بخش C نیز استراحتگاه‌های بین‌راهی در پاسخ به یکنواختی بصری و کاهش خستگی رانندگان در بخش‌های طولانی مسیر و با بهره‌گیری از زمین‌های کشاورزی و بایر دارای دید مطلوب پیشنهاد شدند؛ کاشت ردیفی درختان و گیاهان پوششی جداکننده در پاسخ به نیاز به هدایت بصری رانندگان برای پیش‌بینی پیچ‌های مسیر و با بهره‌گیری از زمین‌های کشاورزی مجاور طراحی شد. بدین ترتیب، کلیه راهبردهای ارائه‌شده، خروجی منطقی فرآیند تحلیل می‌باشند.

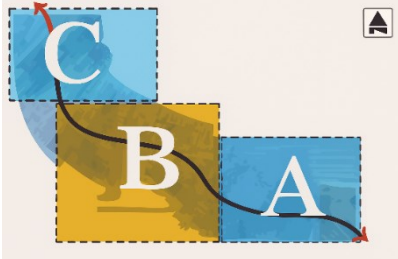
جدول ۱. بررسی نقاط قوت، ضعف، تهدید و فرصت

Table 1. Review of Strengths, Weaknesses, Threats, and Opportunities

فرصت	تهدید	ضعف	قوت
-احیای اراضی کنار دست آزادراه -امکان تعبیه جایگاه سوخت‌گیری وسایل نقلیه -امکان ارتقای وضع موجود پوشش گیاهی محدوده در جهت بالابردن کیفیت زندگی -کاشت گونه‌های مناسب در بخش Median -دیوارهای حائل بتنی موجود امکانی برای افزایش پوشش گیاهی جهت کاهش آلودگی صوتی -امکان طراحی استراحتگاه در بخش کشاورزی -زمین‌های بایر به علت امکان طراحی بالا -امکان طراحی حاشیه رود کرج -ارتقا کیفیت بصری نمای ساختمان‌های حاشیه بزرگراه با استفاده از تکنیک نقاشی دیواری	-گسترش آلودگی‌های محیطی ایجاد شده به واسطه تردد وسایل نقلیه سنگین -ساخت‌وساز در اطراف بزرگراه و احتمال آسیب به محیط -وجود مترو به دلیل وجود حریم آن که باعث از بین رفتن قسمت‌هایی از حاشیه راه می‌شود -نزدیکی اماکن مسکونی به بزرگراه -عدم وجود فضای کافی در حاشیه بزرگراه برای طراحی منظر -فقدان هماهنگی نهادی در مدیریت منظر و زیرساخت‌ها	-آسفالت نامناسب در برخی قسمت‌ها -آبیاری سنتی (دستی) -نصب بلوک بتنی در بخش Median -دیوار حائل بتنی در کنار آزادراه که بیش از حد فضا را سخت نشان می‌دهد -جدول‌های آسیب‌دیده کنار آزادراه -آلودگی صوتی برای ساکنین نزدیک به آزادراه -فضای آشفته و نامنظم -استقرار مسافران اتوبوس -منظر نازیبا و طراحی نشده در برخی فواصل -عدم تعبیه مسیر عابر پیاده -عدم رعایت حریم برای بزرگراه -نبود دسترسی کندرو به مناطق مجاور	-طراحی مناسب و از پیش برنامه‌ریزی شده در برخی نقاط -باغ گیاه‌شناسی در اطراف آزادراه که باعث بالابردن پتانسیل بوم‌شناختی و محیط‌زیستی منطقه شده -نصب تابلوهای راهنما -وجود امام زاده کنار بزرگراه -زمین کشاورزی به دلیل استفاده از دید مطلوب سبز -وجود ترمینال برای جذب جمعیت -وجود عناصر فرهنگی و مذهبی در مجاورت مسیر باعث تقویت حس تعلق مکان و ایجاد نقطه کانونی می‌شود. -وجود چشم‌اندازهای سبز کشاورزی و باغ گیاه‌شناسی ظرفیت بالایی برای ارتقای کیفیت بصری، افزایش تنوع زیستی و بهره‌گیری از خدمات بوم‌سازگانی در طراحی منظر فراهم می‌سازد.

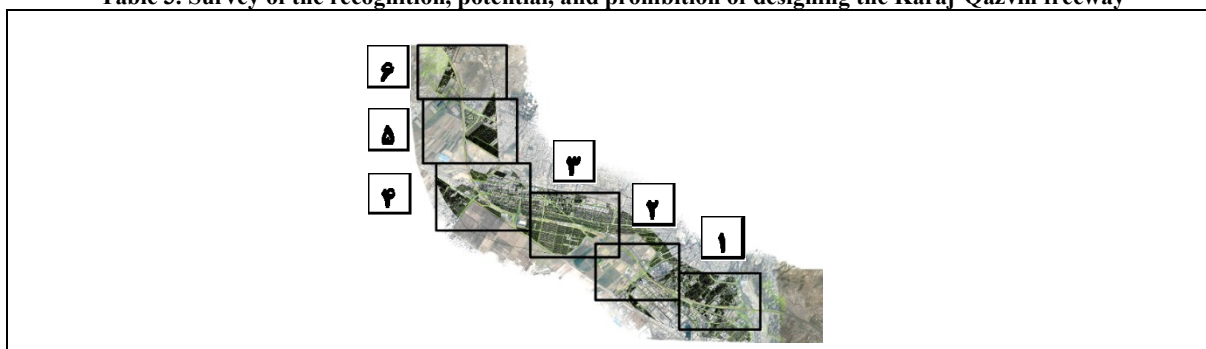
جدول ۲. بررسی امکانات و محدودیت های آزادراه کرج-قزوین

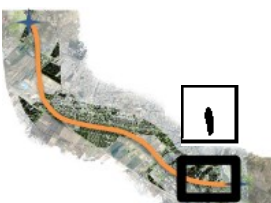
Table 2. Review of the Facilities and Limitations of the Karaj-Qazvin Freeway

		
امکانات	محدودیت	
-بیشترین فضای با دید مطلوب در این بخش -پتانسیل بالا طراحی (زمین‌های بایر) -امکان بازطراحی فضاهای سبز موجود -عبور رود کرج از این بخش -امکان ساخت استراحتگاه کنار آبی -وجود دو تقاطع که امکان طراحی یا بازطراحی دارند	-آلودگی صوتی ناشی از ترافیک شهری و وسایل نقلیه سنگین	قسمت A
-امکان طراحی زمین‌های بایر -عبور از کنار زمین‌های کشاورزی با دید مطلوب -پتانسیل طراحی در تقاطع موجود	-مجاورت در نتیجه دید کلی به مناطق مسکونی -آلودگی صوتی ناشی از مناطق صنعتی هم‌جوار	قسمت B
-عبور از کنار زمین‌های کشاورزی -امکان استفاده از دید مطلوب سبز -زمین‌های کشاورزی در طراحی -امکان طراحی استراحتگاه در این بخش -حداقل آلودگی صوتی	-وجود منطقه صنعتی	قسمت C

جدول ۳. بررسی شناخت، پتانسیل و ممنوعیت طراحی آزادراه کرج-قزوین

Table 3. Survey of the recognition, potential, and prohibition of designing the Karaj-Qazvin freeway

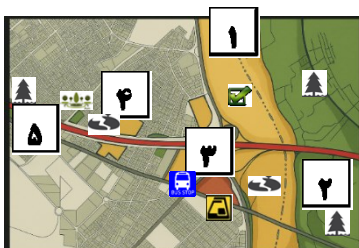




مترو - پتانسیل طراحی

فضای سبز خصوصی - ایستگاه اتوبوس

زمین خالی - پارک



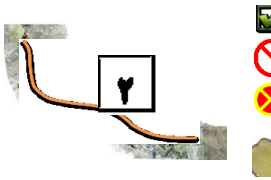
۱- رود کرج: -حفظ و گسترش حریم رودخانه -ایجاد دالان زیر گذر برای عبور حیات وحش

۲- فضای سبز خصوصی: راهبرد: - ایجاد پل عابر پیاده برای افزایش ایمنی ساکنین باغ‌ها -ایجاد دالان زیر گذر بوم‌شناختی برای حرکت ایمن حیات وحش -ایجاد دیوار محافظ به همراه طراحی کاشت استاندارد حریم جاده جهت جلوگیری از عبور ساکنین باغ‌های اطراف و هدایت آن‌ها به سمت پل عابر پیاده

۳- تقاطع برگ شبدری: راهبرد: -طراحی فضای سبز تقاطع برای جلوگیری از محدودیت دید رانندگان سر پیچ‌ها -گیاهان با نگهداری بسیار کم برای ایمنی کارگران فضای سبز

۴- راهبرد: -طراحی پارک در روی جاده برای اتصال لکه‌های سبز و افزایش کارکرد بوم‌شناختی و افزایش اکسیژن و جلوگیری از خستگی راننده

۵- طراحی کمان خطی سبز برای افزایش امنیت ساکنین و هوشیاری

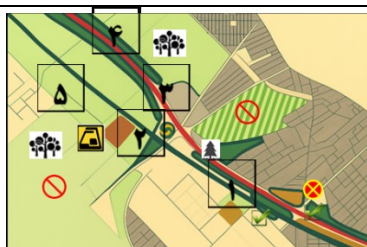


مترو - پتانسیل طراحی

زمین کشاورزی - ممنوعیت طراحی

فضای سبز - ایستگاه آتش‌نشانی

موسسه اصلاح بذر - آموزشگاه محیط‌زیست



۱- راهبرد: -طراحی کمان خطی و ساماندهی فضای سبز حاشیه برای افزایش امنیت ساکنین

۲- راهبرد: -طراحی فضای سبز تقاطع با توجه به ضوابط طراحی کاشت تقاطع‌ها برای جلوگیری از محدودیت دید رانندگان سر پیچ‌ها -استفاده از گیاهان با نگهداری بسیار کم برای ایمنی کارگران فضای سبز -تعبیه تاسیساتی مثل آبیاری در هر بخش برای نگهداری بهتر

۳- ترمینال شهید کلانتری: دارای فرصت طراحی در لبه جاده به عنوان حریم و محافظ جاده و ایجاد امنیت هم برای عابرین و هم رانندگان

۴- راهبرد: -کنترل دید راننده بوسیله کاشت ردیفی درختان برای پیش بینی پیچ و مسیر -استفاده از گیاهان پوششی جداکننده به منظور جلوگیری توقف ماشین‌ها کنار زمین کشاورزی در نتیجه امنیت بیشتر

۵- راهبرد: -به علت وجود حیوانات در زمین کشاورزی وجود دالان زیر گذر برای عبورشان از زیر جاده و ریل مترو الزامی است.



فضای سبز - پمپ گاز

زمین کشاورزی - باغ سیب

ممنوعیت طراحی - پتانسیل طراحی



۱- ممنوعیت طراحی در زمین کشاورزی به علت حفظ کاربری ارزشمند موجود. راهبرد: -کنترل دید راننده بوسیله کاشت ردیفی درختان برای پیش بینی پیچ و مسیر -استفاده از گیاهان پوششی جداکننده به منظور جلوگیری توقف ماشین‌ها کنار زمین کشاورزی در نتیجه امنیت بیشتر

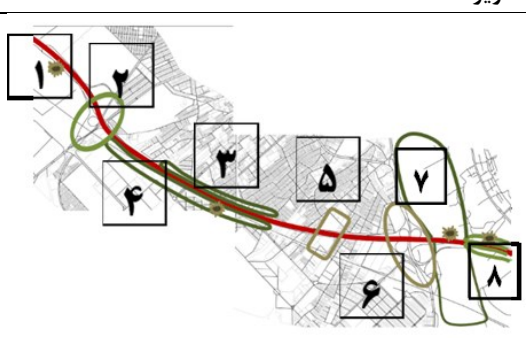
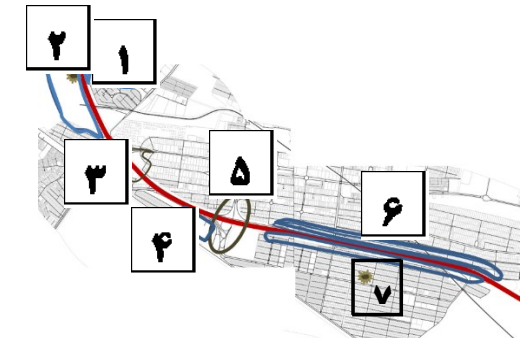
۲- پتانسیل برای ایجاد پارک خطی: -ساماندهی دید و منظر در پارک خطی با تاکید بر ایجاد تنوع کاشت در عین حال دارای وحدت و قطع منظم در طراحی کاشت برای ایجاد پنجره دید -ساماندهی مسیر تاکسی برای افزایش ایمنی با ایجاد کند راه و طراحی کاشت. راهبرد: -طراحی پارک خطی و ساماندهی فضای سبز حاشیه جاده برای افزایش امنیت ساکنین - ایجاد پل عابرین پیاده روی پارک خطی - ایجاد مسیر رفت و برگشت دوچرخه - ایجاد مسیر کندرو برای افزایش ایمنی مسیر در پارک -ایجاد پل بوم‌شناختی و دالان‌های زیستی برای افزایش امنیت حیات وحش و گذر جانوران از جاده



بر اساس یافته‌های تحلیل SWOT و پیمایش میدانی در جدول ۳، پتانسیل‌ها و ممنوعیت‌های طراحی در طول مسیر شناسایی شدند که مبنای تدوین راهبردهای جدول ۴ قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین پتانسیل‌ها عبارت‌اند از: حریم رودخانه کرج در بخش A برای ایجاد دالان زیرگذر و پارک خطی؛ فضاهای سبز خصوصی و باغات در بخش B برای احداث پل عابر پیاده و دیوارهای محافظ؛ و اراضی کشاورزی در بخش C برای کاشت ردیفی درختان و گیاهان پوششی جداکننده. در مقابل، ممنوعیت‌های طراحی شامل حفظ کاربری ارزشمند اراضی کشاورزی و رعایت حریم جاده می‌باشند.

جدول ۴. راهبردهای پیشنهادی آزادراه کرج-قزوین

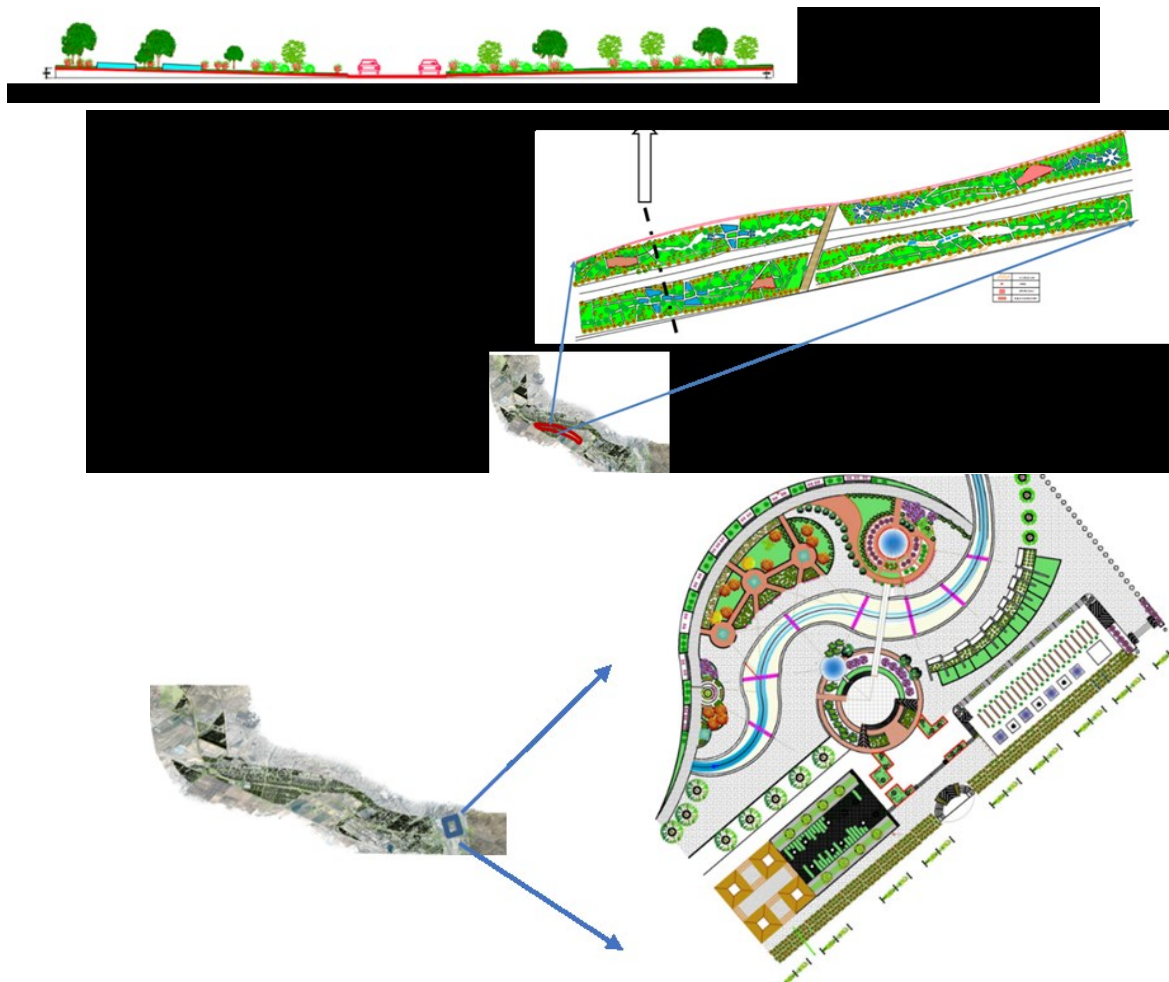
Table 4. Proposed Strategies for the Karaj-Qazvin Freeway

تصویر	راهبرد
	۱- دالان زیر گذر ۲- تقاطع ۳- کاشت ردیفی درختان گیاهان پوششی جداکننده ۴- کمان خطی ۵- پارک در روی جاده ۶- تقاطع برگ شدیدی ۷- طراحی حریم رودخانه ایجاد دالان زیر گذر ۸- پل عابر پیاده، دالان زیر گذر، دیوار سبز محافظ
	۱- استراحتگاه بین راهی ۲- دالان زیر گذر ۳- تقاطع و پل ۴- بهسازی حریم امامزاده ۵- تقاطع ۶- پارک خطی ۷- دالان زیر گذر
	۱- دالان زیر گذر ۲- استراحتگاه بین راهی

طراحی

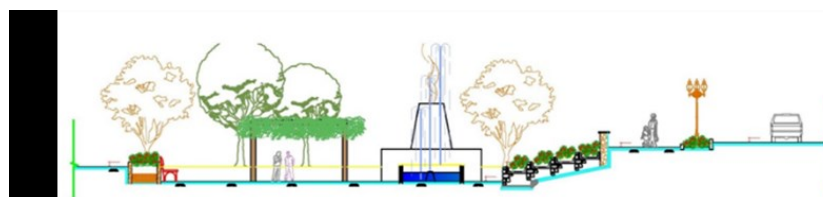
بر اساس تحلیل‌های میدانی و ماتریس SWOT، نقشه‌های طراحی اجرایی برای بخش‌های منتخب آزادراه ترسیم گردیدند که تجسم عینی راهبردهای ارائه شده هستند. شکل ۵، پلان پارک خطی را در بخش B نشان می‌دهد که در پاسخ به سه مسئله اصلی تدوین گردیده است: نزدیکی اماکن مسکونی به بزرگراه که با کمان خطی سبز و دیوارهای محافظ با پوشش گیاهی هدایت کننده مرتفع شده؛ عدم تعبیه مسیر عابر پیاده که با طراحی پل‌های عابر و مسیرهای دوچرخه‌سواری تأمین گردیده؛ و فضای آشفته و نامنظم که با ساماندهی فضای سبز حاشیه به ارتقای کیفیت منظر انجامیده است. شکل ۶، پلان حریم رودخانه کرج را در بخش A به تصویر می‌کشد که با بهره‌گیری از پتانسیل رودخانه به عنوان راهروهای طبیعی و ایجاد زیرگذرهای بوم‌شناختی در نقاط بحرانی، امکان عبور ایمن حیات وحش را فراهم ساخته و با ساماندهی مسیرهای پیاده‌روی و دوچرخه‌سواری در کنار رودخانه، به افزایش ایمنی عابران و کاهش خستگی رانندگان کمک نموده است. شکل ۷ نیز نقشه کاربری اراضی اطراف آزادراه را در سه بخش A، B و C نمایش می‌دهد که مبنای تحلیل SWOT قرار گرفته است؛ بر اساس این نقشه، زمین‌های کشاورزی به عنوان کاربری دارای ارزش، ممنوعیت طراحی تلقی شده و راهبردها در این اراضی صرفاً به کاشت ردیفی درختان و گیاهان پوششی جداکننده برای

هدایت بصری رانندگان محدود گردیده است؛ در مقابل، زمین‌های بایر به‌عنوان فرصت‌های طراحی، محل استقرار پارک‌های خطی، استراحتگاه‌های بین‌راهی و فضاهای سبز تقاطع‌ها در نظر گرفته شده‌اند که پیشنهادات طراحی کاشت نیز در این بخش آمده است.



شکل ۵. پلان پارک خطی-مقطع

Figure 5. Linear Park Plan-Section



شکل ۶. پلان پارک حریم رودخانه-مقطع (نویسندگان، ۱۴۰۴)

Figure 6. Riverine Park Plan - Section (Authors, 2025)

طراحی کاشت

طراحی کاشت در حاشیه بزرگراه‌ها، فراتر از یک اقدام صرفاً زیبایی‌شناختی، رویکردی چندعملکردی است که اهداف ایمنی، زیست‌محیطی، اقلیمی و ادراکی را به‌طور هم‌زمان پیگیری می‌کند. از منظر ایمنی، شواهد پژوهشی نشان می‌دهد که طراحی مناسب منظر حاشیه راه‌ها می‌تواند با ایجاد حس مرزبندی و افزایش توجه رانندگان، به کاهش

چشمگیر تصادفات در میان بلوک‌ها کمک کند (Mok et al., 2006). همچنین، پوشش گیاهی مناسب در حاشیه راه‌ها به‌عنوان عاملی مؤثر در جذب آلاینده‌های هوا و ذرات معلق عمل می‌کند؛ به‌گونه‌ای که تحقیقات نشان داده است خاکریزهای سبز پوشیده از گیاهان علفی و رودرال می‌توانند غلظت ذرات معلق را تا ۷۱٪ کاهش دهند و خطرات بوم‌شناختی ناشی از عناصر کمیاب را تا ۴۲٪ کاهش دهند (Nawrocki et al., 2025). در همین راستا، پژوهش‌های اخیر بر روی گونه‌های چوبی حاشیه راه‌ها در شهر چونگجو کره جنوبی نشان داده است که گونه‌هایی نظیر کاج ژاپنی و زلک‌وای ژاپنی توانایی بالایی در جذب ذرات معلق و فلزات سنگین دارند و می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های مؤثر در طراحی کاشت حاشیه بزرگراه‌ها مدنظر قرار گیرند (Park et al., 2025). این پوشش گیاهی همچنین می‌تواند زیست‌گاه ارزشمندی برای گونه‌های گیاهی و جانوری فراهم آورد و به‌عنوان راهروهای سبز برای حرکت حیات‌وحش عمل کند، هرچند مدیریت این فضاها باید به‌گونه‌ای باشد که بین اهداف ایمنی، حفاظت از تنوع زیستی و جلوگیری از تبدیل شدن به تله‌های بوم‌شناختی تعادل برقرار شود (Milton et al., 2015). تأثیر زیرساخت‌های جاده‌ای بر کریدورهای حیات‌وحش، به‌ویژه در جنگل‌های بارانی هاینان، نشان داده است که طراحی نامناسب راه‌ها می‌تواند موجب گسستگی زیست‌گاه‌ها و افزایش تلفات جاده‌ای حیات‌وحش گردد؛ از این‌رو، احداث زیرگذرهای بوم‌شناختی و حفظ پیوستگی پوشش گیاهی در حاشیه راه‌ها، از ضروریات طراحی منظر پایدار محسوب می‌شود (Xiong et al., 2025). رویکردهای مبتنی بر طبیعت مانند حوضچه‌های رسوب‌گذاری پوشیده از گیاه نیز راه‌حلی پایدار برای مدیریت روان‌آب‌های سطحی و کاهش آلودگی‌های ناشی از ترافیک ارائه می‌دهند که با کنترل کمیت و کیفیت روان‌آب، به افزایش تاب‌آوری بوم‌سازگان در برابر تغییرات اقلیمی و بار آلودگی کمک می‌کنند (Mooselu et al., 2022). بر این اساس، طراحی کاشت در بزرگراه‌ها نیازمند رویکردی نظام‌مند و زمینه‌محور است که هم‌زمان به بوم‌شناسی منطقه، کاربری‌های مجاور، سرعت و ایمنی و نیز انتظارات بصری استفاده‌کنندگان توجه داشته باشد. در پژوهش حاضر، این اصول بر روی آزادراه کرج-قزوین به کار گرفته شده‌اند که یافته‌های آن در ادامه تشریح می‌شود.

حاشیه بزرگراه‌ها اغلب از زمین‌های خالی یا کشاورزی تشکیل شده (شکل ۷) و پوشش گیاهی کمی دارند. این وضعیت علاوه بر کاهش کیفیت منظر، می‌تواند بر ایمنی و محیط‌زیست نیز اثر منفی بگذارد. بنابراین، طراحی کاشت در این فضاها باید هم‌زمان به نیازهای زیباشناختی، ایمنی و حتی اقتصادی توجه کند. یکی از ظرفیت‌های مهم، استفاده از زمین‌های پیرامونی برای کشاورزی شهری است. پیشنهادهایی مانند «کشاورزی شهری» در حاشیه راه‌ها، با هدف بهره‌وری از فضاهای بلااستفاده و تقویت اقتصاد محلی، در محافل علمی و طراحی مطرح شده‌اند و نمونه‌های عملی مانند تبدیل بخش‌هایی از بزرگراه‌های متروکه به مزارع شهری، نشان‌دهنده قابلیت اجرایی این ایده‌هاست (Fletcher Studio, 2013). چنین رویکردی ضمن بهینه‌سازی مصرف آب، به اقتصاد محلی نیز کمک می‌کند. بزرگراه کرج-قزوین به دلیل موقعیت خاص خود، پتانسیل بالایی برای اجرای این ایده دارد.

انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب مانند سدر، توت، شمشاد، زبان‌گنجشک، سرو نقره‌ای، چنار، افرا و کاج، می‌تواند در بهبود منظر و کاهش اثرات منفی ترافیک مؤثر باشد. در قوس‌های مسیر، کاشت ردیفی درختان تأکید بصری ایجاد می‌کند. همچنین رعایت فاصله ایمن از مسیر بزرگراه و استفاده از یک‌لایه بوته‌ای فشرده در کنار درختان، علاوه بر زیبایی، نقش حفاظتی دارد. در میانه بزرگراه نیز باید گونه‌هایی کاشته شوند که با ایجاد مانع بصری، از خیرگی ناشی از چراغ خودروهای مقابل جلوگیری کرده و تمرکز رانندگان را افزایش دهند.

به طور خلاصه، هم‌پیوندی فضای سبز با مؤلفه‌های کشاورزی شهری، بهره‌گیری از گونه‌های گیاهی بومی و مقاوم، و رعایت اصول ایمنی در کاشت، می‌تواند به طور معناداری به ارتقای کیفیت بصری و عملکردی منظر بزرگراه‌ها بینجامد و آن‌ها را به زیرساخت‌هایی پایدار، سازگار با محیط و کارآمد در نظام شهری تبدیل نماید.



شکل ۷. کاربری زمین اطراف آزادراه کرج-قزوین

Figure 7. Land use around Karaj-Qazvin Freeway

نتیجه‌گیری

آزادراه کرج-قزوین به‌عنوان یکی از شریان‌های حیاتی کشور، نمونه‌ای بارز از تقابل میان ظرفیت‌های بوم‌شناختی و فشارهای توسعه شهری-صنعتی است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد فعلی به این محور، عمدتاً مبتنی بر کارکرد حمل‌ونقلی صرف بوده و از ابعاد زیباشناختی، بوم‌شناختی و اجتماعی غفلت شده‌است. بررسی‌ها نشان می‌دهد مسئله اصلی تنها "ایمنی فنی" یا "کارکرد انتقالی" این آزادراه نیست، بلکه "کیفیت محیطی و تجربه بصری" به عاملی کلیدی در ارتقای ایمنی، کاهش خستگی رانندگان و تقویت خوانایی مسیر بدل شده‌است. راه‌حل پیشرو، خروج از نگرش جزیره‌ای و حرکت به سمت "طراحی یکپارچه منظر" با تأکید بر اصول زمینه‌محوری، کاهش آلودگی دیداری و هدایت بصری است. در این صورت، آزادراه کرج-قزوین می‌تواند از یک گذرگاه صرفاً عملکردی، به یک «راهروهای طبیعی-فرهنگی» تبدیل شود که هم‌زمان با برآوردن نیازهای حمل‌ونقلی، افزایش ایمنی، بیانگر هویت منطقه و ارتقادهنده کیفیت زندگی و سفر باشد.

مطالعه حاضر با تأیید یافته‌های (Van Der Ree et al., 2015) در خصوص نقش زیرگذرها و روگذرهای حیات‌وحش در کاهش تکه‌تکه‌شدن زیستگاه‌ها، افزایش ایمنی ساکنین و حیوانات، بر ضرورت طراحی این سازه‌ها در مقیاس بوم‌سازگان تأکید می‌کند. همچنین همسو با (Tzoulas et al., 2007)، این پژوهش نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی زیرساخت‌های سبز نه تنها به ارتقای کیفیت بصری می‌انجامد، بلکه خدمات بوم‌سازگانی ارزشمندی از جمله کاهش آلودگی صوتی و بهبود شرایط میکروکلیم را به همراه دارد که این خود باعث افزایش پایداری محیط‌زیست می‌شود. در حوزه طراحی کاشت، استفاده از گونه‌های مقاوم و بومی ضمن ارتقای زیبایی بصری، در کاهش آلودگی هوا و صوت نقش دارد. با این وجود، چالش‌هایی مانند آلودگی صوتی ناشی از ترافیک و توسعه بی‌ضابطه صنعتی از موانع اصلی محسوب می‌شوند که با یافته‌های (Sreetheran et al., 2011) همسو است.

با وجود پتانسیل‌های رویکرد یکپارچه طراحی منظر در ارتقای ایمنی و پیوستگی زیستگاه‌ها، تحقق عملی آن مستلزم فراهم‌سازی پیش‌نیازهایی فراتر از طراحی است که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از: استقرار سازوکار هماهنگی میان‌نهادی میان وزارت راه و شهرسازی، سازمان حفاظت محیط‌زیست و شهرداری‌ها؛ تأمین منابع مالی پایدار از طریق تخصیص بودجه‌های مستقل به مؤلفه‌های غیرسازه‌ای نظیر طراحی بوم‌شناختی منظر؛ و ایجاد نظام پایش و ارزشیابی مستمر مبتنی بر شاخص‌های کمی همچون شمارش تصادفات، تردد حیات‌وحش و کیفیت بصری. بدیهی است که بدون تأمین این پیش‌نیازها، حتی بهترین راهبردهای طراحی نیز در مرحله اجرا با کاستی‌های جدی مواجه خواهند شد. با

این حال، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که مداخلات هدفمند و مبتنی بر تحلیل علمی، حتی با وجود این محدودیت‌ها، می‌تواند گام‌های مؤثری در جهت کاهش تعارض میان زیرساخت‌های حمل‌ونقل و محیط‌زیست بردارد. در صورت تحقق حداقلی پیش‌نیازهای یادشده، رویکرد ارائه‌شده در این پژوهش قابلیت تعمیم به سایر آزادراه‌های کشور با شرایط مشابه را داشته و می‌تواند الگویی برای تحول در طراحی زیرساخت‌های خطی از منظر پایداری و انسان‌محوری باشد.

پیشنهادهای

پیشنهادهایی برای بهبود وضع موجود

این راهکارها بر اساس افق زمانی اجرا، در سه بازه کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت طبقه‌بندی شده‌اند. در بازه کوتاه‌مدت (شش تا دوازده ماه)، با توجه به تأثیر مستقیم پیکربندی پوشش گیاهی بر ایمنی راه و کاهش خطای ادراکی رانندگان، نصب حصارهای هدایت‌کننده موقت و کاشت ردیفی درختان با ارتفاع و فاصله‌گذاری بهینه در بخش‌های B (مناطق مسکونی) و C (اراضی کشاورزی) به‌عنوان نخستین اقدام پیشنهاد می‌شود. همچنین، ساماندهی بصری میانه آزادراه در بخش‌های A و B با هدف کاهش خیرگی و خستگی رانندگان، می‌تواند به افزایش تمرکز و ایمنی کمک کند. در بازه میان‌مدت (یک تا سه سال)، با بهره‌گیری از تجارب مؤثر زیرگذرهای بوم‌شناختی در کاهش تلفات حیات‌وحش و حفظ راهروهای زیستی، احداث زیرگذرهای بوم‌شناختی در بخش A (حریم رودخانه کرج) و بخش C (اراضی کشاورزی) به‌منظور تسهیل حرکت حیات‌وحش و کاهش تعارضات جاده‌ای پیشنهاد می‌شود. احداث پل‌های عابر پیاده در بخش B (باغات مسکونی) و بخش C (امام‌زاده و ترمینال) نیز از دیگر اقدامات میان‌مدت است که با ایجاد دسترسی ایمن، به ارتقای ایمنی عابران کمک می‌کند. اجرای نمونه پارک خطی در بخش A و سپس توسعه آن به سایر بخش‌ها، گامی عملی در جهت تبدیل حاشیه‌های بلااستفاده به فضاهای سبز عمومی و ایجاد راهروهای سبز پیوسته خواهد بود؛ رویکردی که نمونه‌های موفق آن در تبدیل رمپ‌های بزرگراهی به پارک‌های خطی فراگیر در شهرهای مختلف جهان به اثبات رسیده است. در بازه بلندمدت (سه تا پنج سال)، احداث استراحتگاه‌های بین‌راهی کامل در بخش‌های A و C با هدف تأمین نیازهای استراحت و خدمات رانندگان و نیز فراهم‌آوردن بستری برای تعامل کیفی کاربران با منظر پیرامون، پیشنهاد می‌شود. همچنین، توسعه یکپارچه پارک‌های خطی در امتداد کل مسیر و اتصال لکه‌های سبز موجود، ضمن پیوستگی بخشی به سیمای سبز، به ایجاد راهروهای بوم‌شناختی و بهبود کیفیت بصری منظر کمک خواهد کرد. ایجاد نظام پایش مستمر شامل دوربین‌های پایش حیات‌وحش، سامانه ثبت تصادفات و ارزیابی کیفیت بصری در تمامی بخش‌ها، به‌عنوان بستر پایش و ارزیابی عملکرد راهکارهای اجراشده، در دستور کار بلندمدت قرار می‌گیرد.

پیشنهادهایی برای انجام مطالعات آتی

با توجه به پیچیدگی‌های منظر آزادراه و تنوع عوامل مؤثر بر ایمنی، کیفیت بصری و پایداری زیست‌محیطی، انجام پژوهش‌های تکمیلی در حوزه‌های زیر ضروری به‌نظر می‌رسد. نخست، تهیه نقشه حساسیت تعارض حیات‌وحش-وسيله نقلیه با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل‌های پیش‌بینی‌کننده، می‌تواند به اولویت‌بندی دقیق‌تر نقاط بحرانی و تخصیص بهینه منابع کمک کند. همچنین، بررسی تأثیر عناصر طراحی تعاملی از قبیل تابلوهای آموزشی، ایستگاه‌های استراحت و فضاهای دیدبانی بر آگاهی عمومی و رفتار رانندگان، می‌تواند بینش ارزشمندی در خصوص چگونگی بهبود تجربه کاربران از منظر آزادراه فراهم آورد. از سوی دیگر، با توجه به نقش چشمگیر پوشش گیاهی در جذب آلاینده‌ها و کاهش ذرات معلق، ارزیابی کمی عملکرد منظر چندلایه (ترکیب درختان، درختچه‌ها و گیاهان پوششی بومی) در کاهش آلودگی صوتی، افزایش ایمنی و تقویت پایداری بوم‌شناختی، به‌عنوان یکی از اولویت‌های پژوهشی آتی پیشنهاد می‌شود.

References

- Balzan, M. V., Zulian, G., Maes, J., & Borg, M. (2021). Assessing urban ecosystem services to prioritise nature-based solutions in a high-density urban area. *Nature-Based Solutions*, 1, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2021.100007>
- Bird, I. (2024). Journeys in Persia and Kurdistan. BoD-Books on Demand. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2021.100007>
- Clevenger, A. P., & Huijser, M. P. (2011). Wildlife crossing structure handbook: design and evaluation in North America. https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/41646/dot_41646_DS1.pdf
- Dumbaugh, E., & Rae, R. (2009). Safe urban form: Revisiting the relationship between community design and traffic safety. *Journal of the American Planning Association*, 75(3), 309-329. <https://doi.org/10.1080/01944360902950349>
- Fardanesh, F., & Arefian, F. F. (2021). Persian Paradises at Peril: Landscape planning and management in contemporary Iran. Springer Nature.
- Ferguson, B. K. (2005). Porous pavements. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420038439>
- Fletcher Studio. (2013). Productive freeway landscapes: TERRABANK. In Proceedings of the ACSA Fall Conference.
- Forman, R. T. T., Sperling, D., Bissonette, J. A., Clevenger, A. P., Cutshall, C. D., Dale, V. H., Fahrig, L., France, R., Goldman, C. R., Heanue, K., Jones, J. A., Swanson, F. J., Turrentine, T., & Winter, T. C. (2003). Road ecology: Science and solutions. Island Press.
- Forman, R. T., Sperling, D., Bissonette, J. A., Clevenger, A. P., Cutshall, C. D., Dale, V. H., Fahrig, L., France, R. L., Goldman, C. R., & Heanue, K. (2013). Road ecology: science and solutions. Princeton University Press.
- Gao, H., Bakar, S. A., Suhardi, M., Guo, Y., Yusof, M. J. M., Mundher, R., Zhuo, Y., & Qi, J. (2025). Constructing a conceptual framework: Interpreting visual preference and visual pollution factors among viewers in highway landscapes. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 31, 101399. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101399>
- Gholampour, S., Mansouri, S., & Shahcheraghi, A. (2022). Landscape design of roads and environmental ethics. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22517634.1401.17.1.2.2>
- Habibi, M., Chitsazzadeh, E., & Mosavi, A. (2022). Green resources for safety improvement and sustainable landscape design: The case of a dangerous tehran-dizin road bend. *Resources*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/resources11020019>
- Huijser, M., Ament, R. J., Bell, M., Clevenger, A., Fairbank, E., Gunson, K., & McGuire, T. (2021). Animal vehicle collision reduction and habitat connectivity pooled fund study–Literature review. <https://pooledfund.org/Document/Download?id=11857>
- Johnson, C. D., Matthews, T., Burke, M., & Jones, D. (2022). Planning for fauna-sensitive road design: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 959918. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.959918>
- Karkhaneh, G., Sahraeinejad, N., & Mousavi Fatemi, H. (2023). A Study on Proposed Urban Highways Landscape Design Elements and Indicators with a Landscape Resilience Enhancement Approach. *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 15(41), 153-168. <https://doi.org/10.22034/AAUD.2022.304259.2547>
- Kim, K., Kim, S., & Song, E. (2024). Analysis of Mammal Usage Relative to Compliance Rates of Wildlife Crossing Structures in South Korea. *Journal of forest and environmental science*, 40(4), 394-412. <https://doi.org/10.7747/JFES.2024.40.4.394>
- Laube, P., Ratnaweera, N., Wróbel, A., Kaelin, I., Stephani, A., Reifler-Baechtger, M., Graf, R. F., & Suter, S. (2023). Analysing and predicting wildlife–vehicle collision hotspots for the Swiss road network. *Landscape Ecology*, 38(7), 1765-1783. <https://doi.org/10.1007/s10980-023-01655-5>

- Milton, S. J., Dean, W. R. J., & Sielecki, L. E. (2015). The function and management of roadside vegetation. In R. van der Ree, D. J. Smith, & C. Grilo (Eds.), *Handbook of road ecology* (pp. 373–381). Wiley Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118568170.ch46>
- Mok, J. H., Landphair, H. C., & Naderi, J. R. (2006). Landscape improvement impacts on roadside safety in Texas. *Landscape and Urban Planning*, *78*(3), 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.09.002>
- mokhles, f., Keramati, E., & Nozari, B. (2015). Highway Landscape Evaluation of Two Highway Landscapes in Tehran. *MANZAR, the Scientific Journal of landscape*, 7(31), 110-115. http://www.manzar-sj.com/article_12777_553c3741e8d893fe9789a3eb8a162821.pdf
- Mooselu, M. G., Liltved, H., Alizadeh, M. R., & Meland, S. (2022). Optimal design of nature-based solutions in highway runoff management based on resilience to climate and pollution load changes. *EGU General Assembly* 2022. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2022EGUGA..24.1425G/doi:10.5194/egusphere-egu22-1425
- Nawrocki, A., Przybysz, A., Moniuszko, H., Wójcik-Gront, E., Sikorski, P., & Popek, R. (2025). Understanding spatial patterns of traffic pollutant reduction by vegetated earth berms. *Building and Environment*, *225*, 113878. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113878>
- Park, J., Bui, H. T., Lee, E., & Park, B. J. (2025). Evaluating particulate matter and heavy metal accumulation, and air pollution tolerance in roadside woody plants, Cheongju City, South Korea. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(10), 1133. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14614-1>
- Popp, J. N., Boyle, S. P., & Alexander, S. M. (2023). Road ecology in an era of rapid global change: Challenges and opportunities. *Biological Conservation*, 277, 109853.
- Rashidpour, N., Tabibiyani, M., & Habibi, M. (2023). Reading the Hieroglyph of Modern Metropolis of Tehran Based on the Constitutive Factors of Mental Landscape (Case Study: Analysis of the Constructed Landscape of Tehran in the Minds of Taxi Drivers). *Soffeh*, *33*(1), 85-101. <https://doi.org/10.52547/sofeh.33.1.85>
- Sreetheran, M., Adnan, M., & Khairil Azuar, A. (2011). Street tree inventory and tree risk assessment of selected major roads in Kuala Lumpur, Malaysia. *Arboriculture and Urban Forestry*, 37(5), 226. <https://doi.org/10.48044/jauf.2011.030>
- Su, H., Wang, Y., Yang, Y., Tao, S., & Kong, Y. (2023). An analytical framework of the factors affecting wildlife–vehicle collisions and barriers to movement. *Sustainability*, 15(14), 11181. <https://doi.org/10.3390/su151411181>
- Sukhontapatipak, C., Saralamba, C., Piyapan, P., Duangta, P., Klubchum, T., & Sawangproh, W. (2025). Global wildlife roadkill research: a bibliometric synthesis of historical trends, thematic gaps, and future directions. *Urban Ecosystems*, 28(4), 130. <https://doi.org/10.1007/s11252-025-01747-x>
- Tafida, A., Alaloul, W. S., Zawawi, N. A. B. W., Musarat, M. A., & Abubakar, A. S. (2024). A review of eco-friendly road infrastructure innovations for sustainable transportation. *Infrastructures*, 9(12), 216. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9120216>
- Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kaźmierczak, A., Niemela, J., & James, P. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *Landscape and urban planning*, 81(3), 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.001>
- Van Der Ree, R., Smith, D. J., & Grilo, C. (2015). *Handbook of road ecology*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118568170>
- Xiong, G., Yang, F., Wang, T., He, R., & Li, L. (2025). Impact of road infrastructure on wildlife corridors in Hainan rainforests. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 139, 104539. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104539>



Assessment and Selection of an Appropriate Oil Spill Response Method in Gulf of Oman

Saeed Karimi^{a*}, Ehsan Talebi^a, Mahnaz Jadidi^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/0000-0002-8465-6052>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	The Gulf of Oman is one of the most important marine areas in southern Iran, with considerable economic and environmental significance due to its fisheries resources, maritime transportation capacities, trade, and tourism potential. However, extensive vessel traffic, particularly by commercial vessels and oil tankers, increases the risk of oil pollution and its associated consequences. Oil spills and petroleum products can have extensive adverse effects on marine ecosystems, coastal areas, aquatic organisms, fisheries, and tourism activities. Therefore, selecting an appropriate and effective method for responding to oil spills, considering the environmental conditions of the region, is of particular importance. The aim of this study was to determine and prioritize the most appropriate method for responding to oil spills in the Gulf of Oman using the Analytic Hierarchy Process based on the physical characteristics of seawater. In this study, six criteria, including temperature, salinity, turbidity, water-current velocity, depth, and dissolved oxygen, were considered as decision-making criteria. First, a pairwise comparison matrix was constructed to determine the relative importance of the criteria and calculate their weights. The consistency of the pairwise comparisons was also evaluated using the Consistency Ratio. Subsequently, based on the criterion with the highest relative weight, different oil-spill response methods were compared and prioritized according to the selected criterion. The results showed that temperature, with a weight of 0.40, had the highest relative importance among the criteria considered. The Consistency Ratio of the pairwise comparison matrix was 0.0416, indicating an acceptable level of consistency. Furthermore, based on temperature as the dominant criterion, adsorption, with a weight of 0.354, ranked first among the oil-spill response methods, followed by chemical dispersants (0.271), mechanical methods (0.209), in situ burning (0.113), and bioremediation (0.057). The findings indicate that the Analytic Hierarchy Process can provide a systematic framework for weighting environmental criteria and prioritizing oil-spill response methods in the Gulf of Oman.
Article history: Received: 2026/05/04 Received in revised form: 2026/05/14 Accepted: 2026/06/09 Available online: 2026/06/15	
Keywords: Oil pollution, Oman Sea, Adsorption method, Decision support system, Analytical Hierarchy Process (AHP).	

Cite this article: karimi, S., Talebi, E., & Jadidi, M. (2026). Assessment and Selection of an Appropriate Oil Spill Response Method in Gulf of Oman. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 2(1), 114-126. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252691>



Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252691>

Introduction

The coastal zone of the Gulf of Oman, extending from Gwadar Bay to the eastern shores of Bandar Abbas, is an ecologically and economically important marine region that supports fisheries, maritime transportation, trade, tourism, and other marine-based activities. Intensive maritime traffic, particularly the movement of commercial vessels and oil tankers, increases the risk of oil spills and their associated environmental and economic consequences. Oil pollution can adversely affect marine ecosystems, coastal areas, aquatic organisms, fisheries, and tourism activities. Therefore, selecting an appropriate response method that is compatible with the environmental conditions of the study area is essential for effective oil-spill management.

Various methods have been developed to respond to oil spills, including mechanical recovery, in-situ burning, chemical dispersants, bioremediation, and adsorption. The effectiveness of these methods can vary depending on environmental conditions and the characteristics of the spilled oil. Consequently, selecting an appropriate response method is a multi-criteria decision-making problem that requires systematic evaluation of relevant environmental parameters. The Analytic Hierarchy Process (AHP) is a widely used multi-criteria decision-making technique that enables the relative importance of decision criteria and alternatives to be determined through pairwise comparisons. Accordingly, the present study aimed to determine and prioritize an appropriate oil-spill response method for the Gulf of Oman using AHP and considering the physical characteristics of seawater. Six physical parameters, including temperature, salinity, turbidity, current velocity, water depth, and dissolved oxygen, were considered as decision-making criteria. The study further sought to identify the criterion with the highest relative importance and subsequently prioritize available oil-spill response methods based on that criterion.

Method

A multi-criteria decision-making framework based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) was employed. First, a pairwise comparison matrix was developed for six physical seawater parameters, including temperature, salinity, turbidity, current velocity, depth, and dissolved oxygen. Pairwise comparisons were performed using the fundamental AHP scale from 1 to 9. The relative weight of each criterion was then calculated based on the pairwise comparison matrix. To assess the consistency of the judgments, the Consistency Ratio (CR) was calculated using the Consistency Index (CI) and Random Index (RI). The obtained CR value was also used to determine whether the pairwise comparisons had an acceptable level of consistency.

After identifying the criterion with the highest relative weight, a second pairwise comparison was conducted among five oil-spill response methods, including adsorption, chemical dispersants, mechanical recovery, in-situ burning, and bioremediation. Importantly, the ranking of these response methods was performed based on the dominant criterion identified in the first stage, rather than through an integrated weighting of all six physical parameters. Thus, the second stage of the analysis was specifically designed to determine the priority of response methods under the dominant environmental criterion identified by the AHP framework.

Results

The AHP results showed that temperature had the highest relative weight among the six physical seawater parameters, with a weight of 0.40, followed by salinity (0.25), turbidity (0.15), current velocity (0.08), depth (0.07), and dissolved oxygen (0.05). The Consistency Ratio of the pairwise comparison matrix was calculated as 0.0416, which is below the commonly accepted threshold of 0.10 and indicates an acceptable level of consistency in the pairwise judgments. Although the Gulf of Oman is not necessarily among the warmest marine regions, the relatively high weight assigned to temperature in this study does not indicate that the region has the highest absolute seawater temperature. Rather, the weight represents the

relative importance of temperature within the decision-making structure of the present AHP model. Temperature can influence several processes relevant to the fate and behavior of oil spills, including changes in oil viscosity and evaporation of volatile components. It may also affect the performance of certain oil-spill response methods and biological processes involved in hydrocarbon degradation. Therefore, the relatively high weight of temperature can be interpreted in terms of its potential influence on oil-spill behavior and response effectiveness rather than simply its absolute value. Based on temperature as the dominant criterion, adsorption obtained the highest priority among the evaluated response methods, with a weight of 0.354. Chemical dispersants ranked second (0.271), followed by mechanical recovery (0.209), in-situ burning (0.113), and bioremediation (0.057). Thus, within the decision-making structure of this study and specifically under the temperature criterion, adsorption was identified as the highest-priority response method. The results indicate that the ranking presented in this study should be interpreted within the defined AHP framework. In particular, the ranking of response methods reflects their priority according to the dominant criterion identified in the first stage and does not represent an overall ranking obtained by simultaneously aggregating all six physical seawater criteria.

Conclusions

The present study employed the Analytic Hierarchy Process (AHP) to systematically evaluate the relative importance of physical seawater parameters and prioritize oil-spill response methods in the Gulf of Oman. Among the six physical parameters considered, temperature received the highest relative weight (0.40), indicating its dominant position within the decision-making structure of the study. The Consistency Ratio ($CR = 0.0416$) confirmed the acceptable consistency of the pairwise comparisons. Based on the dominant temperature criterion, adsorption achieved the highest priority (0.354) among the evaluated oil-spill response methods, followed by chemical dispersants, mechanical recovery, in-situ burning, and bioremediation. The results suggest that adsorption can be considered a high-priority response option under the decision conditions defined in this study. However, this finding should not be interpreted as a universal superiority of adsorption over other response methods, since the ranking was derived specifically from the dominant temperature criterion identified through the AHP procedure. Overall, the findings demonstrate that AHP can provide a systematic framework for incorporating environmental considerations into oil-spill response decision-making. The proposed approach can assist environmental managers in prioritizing response options under specific environmental conditions in the Gulf of Oman. Future studies may improve the framework by incorporating additional environmental and operational criteria, performing sensitivity analysis, and validating the AHP results using field observations and real oil-spill response data.



ارزیابی و انتخاب روش مناسب مقابله با لکه های نفتی در دریای عمان

سعید کریمی^{a*}، احسان طالبی^a، مهناز جدیدی^a

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

*نویسنده مسئول: سعید کریمی karimis@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	دریای عمان یکی از مهم ترین پهنه های دریایی جنوب ایران است که به دلیل برخورداری از منابع شیلاتی، ظرفیت های حمل و نقل دریایی، تجارت و گردشگری، از اهمیت اقتصادی و زیست محیطی قابل توجهی برخوردار است. با این حال، تردد گسترده شناورها و نفتکش ها، احتمال وقوع آلودگی های نفتی و پیامدهای ناشی از آن را افزایش داده است. انتخاب روش مناسب برای مقابله با لکه های نفتی مستلزم توجه به شرایط محیطی و ویژگی های فیزیکی آب دریا است. از این رو، هدف پژوهش حاضر، تعیین و اولویت بندی مناسب ترین روش مقابله با لکه های نفتی در دریای عمان با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و با در نظر گرفتن معیارهای فیزیکی آب دریا است. در این پژوهش، شش معیار شامل دما، شوری، کدورت، سرعت جریان، عمق و اکسیژن محلول به عنوان معیارهای تصمیم گیری در نظر گرفته شدند. ابتدا با تشکیل ماتریس مقایسه زوجی، اهمیت نسبی معیارها تعیین و وزن هر یک محاسبه شد. سپس، با توجه به معیار دارای بیشترین وزن، گزینه های مختلف مقابله با آلودگی نفتی بر اساس معیار منتخب مورد مقایسه و اولویت بندی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که دما با وزن ۰/۴۰ بیشترین اهمیت نسبی را در میان معیارهای مورد بررسی دارد. همچنین، در رتبه بندی گزینه ها بر اساس معیار دما، روش جذب سطحی با وزن ۰/۳۵۴ در رتبه نخست قرار گرفت و پس از آن پخش کننده های شیمیایی با وزن ۰/۲۷۱، روش های مکانیکی با وزن ۰/۲۰۹، سوزاندن درجا با وزن ۰/۱۱۳ و زیست پالایی با وزن ۰/۰۵۷ در رتبه های بعدی قرار گرفتند. بر اساس نتایج، استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی می تواند چارچوبی نظام مند برای وزن دهی معیارهای محیطی و اولویت بندی روش های مقابله با آلودگی نفتی در دریای عمان فراهم کند.
کلیدواژه ها: آلودگی نفتی، دریای عمان، روش جذب سطحی، سیستم پشتیبان تصمیم گیری، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP).	

استناد به این مقاله: کریمی، سعید؛ طالبی، احسان و جدیدی، مهناز. (۱۴۰۵). ارزیابی و انتخاب روش مناسب مقابله با لکه های نفتی در دریای عمان. راهبردهای

علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، ۲(۱)، ۱۱۴-۱۲۶. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252691>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252691>

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

دریای عمان، به عنوان یکی از پهنه های مهم آبی جنوب ایران، از نظر جغرافیایی در محدوده ای از خلیج گواتر تا سواحل شرقی بندرعباس امتداد دارد و با طولی در حدود ۵۴۵ کیلومتر، از ظرفیت های قابل توجه اقتصادی، زیست محیطی و گردشگری کشور برخوردار است. وجود منابع شیلاتی، ظرفیت های بالقوه گردشگری و امکان توسعه فعالیت های مرتبط با ورزش های آبی، به ویژه در فصول سرد سال، بر اهمیت اقتصادی و اجتماعی این پهنه آبی افزوده است (Al-Shidhani et al., 2026). با این همه بروز آلودگی نفتی حاصل از حمل و نقل کشتی ها و همچنین آب توازن می تواند از جمله عوامل آسیب رسان مطرح باشد (AlKaabi et al., 2020; Haridharan et al., 2022; Ratchagar & Hemalatha, 2013). چراکه علاوه بر اثرات مخرب بر بوم سازگان و بروز آلودگی منظر می تواند موجبات مشکلات اقتصادی را فراهم سازد. بنابراین در زمان بروز آلودگی نفتی ناگزیر می بایست در جهت پاسخ به موقع اقدام نمود چراکه رسیدن لکه نفتی به ساحل و بروز تاربال^۱ شرایط را بغرنج می نماید. در زمینه مقابله با آلودگی نفتی روش های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می توان به روش های بیولوژیکی فیزیکی و شیمیایی اشاره نمود که در میان آن ها روش مکانیکی به لحاظ پاسخ به موقع در شرایط اضطراری دارای مرتبه بالاتری است. با این حال انتخاب روش بهینه پاسخ قطعی به لکه نفتی همیشه با چالش هایی روبه رو می باشد (Chitrakar et al., 2019; Nabavi et al., 2021; Wang et al., 2015).

امروزه روش هایی مثل سوزاندن درجا که زمانی تنها برای لکه های نفتی دور از ساحل مورد استفاده قرار می گرفتند تحت شرایطی خاص به عنوان جایگزینی برای روش های مکانیکی مورد استفاده قرار می گیرند. در زمینه سوزاندن درجا روش هایی مانند پایرو بوم^۲ که عملکرد خود را در پاسخ به لکه نفتی دیپ و آتر هاریزون^۳ در خلیج مکزیک به اثبات رسانده اند دارای کارایی منحصر به فردی می باشند و تنها ابزاری است که کارایی خود از قطب تا مناطق گرمسیری به اثبات رسانده است. یا از دیگر روش های مقابله با آلودگی نفتی زیست پالایی است که در این روش می توان نفت را با استفاده از میکروارگانیسم های تجزیه کننده نفت به ترکیباتی با خطر کمتر تبدیل کرد (Bôto et al., 2021; Kabyl et al., 2018; Mabile, 2018; al., 2022). براساس تحقیقات انجام شده باکتری هایی چون *Alcanivorax* و *Marinobacter*، *Oleispira*، *Cycloclasticus*، *Pseudomonas* در پالایش آلودگی های نفتی نقش دارند. مواد پخش کننده شیمیایی از دیگر روش های مقابله با آلودگی نفتی هستند. این مواد شامل بر حلال ها و سورفاکتانت ها هستند، در این میان حلال ها کمک می کنند مواد شیمیایی مخلوط شده و در نفت حل شود و سورفاکتانت ها روند ترکیب نفت و آب با یکدیگر را تسهیل می کنند (Baqar, 2024; Lessard & DeMarco, 2000; Macaulay & Rees, 2014).

روش دیگر در مقابله با لکه نفتی استفاده از جاذب ها است که در این میان مواد نانو حفره ای به دلیل ویژگی های فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد خود کاربرد فوق العاده ای در این زمینه دارند. با این همه انتخاب روش مناسب از میان روش های مذکور کاری مشکل به نظر می رسد. چرا که علاوه بر اینکه هر روش کارایی خود را دارد شرایط محیطی در دریای عمان نیز ویژگی های خاص خود را دارا می باشد. تحلیل سلسله مراتبی (AHP) از روش های کارآمد در زمینه وزن دهی و انتخاب گزینه های بهینه است که در این تحقیق، جهت انتخاب بهترین روش جهت مقابله با آلودگی نفتی در دریای عمان مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه به تعدادی پژوهش های صورت گرفته با این روش که دال بر اهمیت و کارایی آن دارد اشاره خواهد شد (Guidi et al., 2016; Ha, 2018; Khodadoust et al., 2026).

^۱ - Tarball^۲ - PyroBoom^۳ - Deepwater Horizon

برخی مطالعات صورت گرفته با استفاده از روش AHP

روش AHP دارای کارایی منحصر به فردی در تصمیم‌سازی در زمینه‌های مختلف ایمنی بهداشت و محیط‌زیست است. در زمینه تحقیقات انجام شده با استفاده از این روش (Moradirad et al., 2019) با هدف انتخاب بهترین روش کنترل صدا در یک پالایشگاه، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی FAHP استفاده کردند. آن‌ها ابتدا منابع اصلی تولید صدا در پالایشگاه را شناسایی نموده، سپس با استفاده از پرسشنامه و روش دلفی ۵ معیار و ۱۰ روش کنترل صدا را تعیین نمودند و در ادامه با کمک روش FAHP وزن هر معیار و امتیاز هر روش کنترل را محاسبه نمودند. نهایتاً نتایج نشان داد که کارایی مهم‌ترین معیار برای انتخاب روش کنترل صدا است. (Tarkian et al., 2014) در مطالعه‌ای در پژوهشگاه صنعت نفت با هدف انتخاب مناسب‌ترین روش تصفیه فاضلاب، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP و نرم‌افزار Expert Choice استفاده نمودند. در این مقاله چهار گزینه شامل MBR، SBR ثابت، MBR چرخان و لجن فعال با هوادهی گسترده را براساس معیارهای زیست‌محیطی، اقتصادی، فنی و مدیریتی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که MBR چرخان مناسب‌ترین گزینه بوده است و درجه ناسازگاری ۰/۰۷ نشان‌دهنده سازگاری خوب مقایسه‌ها بوده است. (Chompook et al., 2023) در پژوهشی به انتخاب روش بهینه فناوری تصفیه فاضلاب با استفاده از روش AHP در چارچوب تصمیم‌گیری چند معیاره پرداختند. در این مقاله تمرکز اصلی ایشان بر روی بهینه‌سازی فرآیند تصفیه فاضلاب در شهرداری دجران در مقدونیه شمالی بوده است. در این مقاله سه راهکار مختلف برای بهبود ظرفیت تصفیه فاضلاب بررسی شدند که معیارهای انتخاب شامل بر تحلیل وضعیت سیستم در فصل گردشگری و غیر از آن ارزیابی عملکرد تصفیه خانه فعلی و ترکیب آن با یک تصفیه خانه جدید، کارایی تصفیه با فناوری‌های مختلف، فضای مورد نیاز و پارامترهای مالی است. در این مقاله کاربرد روش AHP نشان می‌دهد که فناوری راکتور بیوفیلمی بستر متحرک MBBR^۱ به عنوان یک راهکار مدرن و موثر برای تصفیه فاضلاب با قابلیت حذف مواد آلی، فسفر و نیتروژن و با فضا و مشکلات کمتر نسبت به سیستم‌های سنتی، انتخاب مناسبی است (Ćetković et al., 2023). (Nabavi et al., 2021) در مطالعه‌ای با هدف انتخاب بهترین روش برای تصفیه شیرابه حاصل از ضایعات مزارع تره‌بار، از فرآیند تحلیل AHP استفاده کردند. آن‌ها با بررسی معیارهایی مانند BOD، COD، TSS، TDS، PH، TOC و زمان روش‌های مختلف تصفیه را ارزیابی و مقایسه نمودند. نتایج نشان داد در صورت بی‌اهمیت بودن زمان، روش‌های زیستی عملکرد بهتری دارند. اما زمانی که سرعت تصفیه اهمیت دارد، روش‌های شیمیایی به‌ویژه ازن بعلاوه GAC و ازن به‌علاوه H₂O₂ موثرتر هستند. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از AHP می‌تواند تصمیم‌گیری بهینه در انتخاب روش‌های تصفیه شیرابه را تسهیل نماید.

با توجه به تأثیر شرایط محیطی بر رفتار لکه‌های نفتی و کارایی روش‌های مختلف مقابله با آلودگی، انتخاب روش مناسب برای مقابله با لکه‌های نفتی در دریای عمان نیازمند رویکردی نظام‌مند و چندمعیاره است. از این رو، هدف اصلی پژوهش حاضر، تعیین و اولویت‌بندی مناسب‌ترین روش مقابله با لکه‌های نفتی در دریای عمان با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و با در نظر گرفتن شرایط فیزیکی آب دریا است. در این راستا، معیارهای فیزیکی آب دریا شامل دما، شوری، کدورت، سرعت جریان، عمق و اکسیژن محلول مورد ارزیابی قرار گرفته و اهمیت نسبی هر یک از معیارها تعیین می‌شود. سپس، روش‌های مختلف مقابله با آلودگی نفتی بر اساس معیار دارای بیشترین اهمیت اولویت‌بندی می‌شوند. همچنین، به منظور بررسی رابطه میان پارامترهای فیزیکی آب دریا و وزن‌های محاسبه شده و ارزیابی قابلیت پیش‌بینی وزن‌ها بر اساس این پارامترها، از آزمون همبستگی پیرسون و رگرسیون

^۱ - Moving Bed Biofilm Reactor

خطی استفاده می شود. در نهایت، پژوهش حاضر با هدف ارائه چارچوبی نظام مند برای انتخاب روش مناسب مقابله با آلودگی نفتی متناسب با شرایط محیطی دریای عمان انجام شده است.

روش‌شناسی پژوهش

در پژوهش حاضر، به منظور انتخاب مناسب‌ترین روش مقابله با آلودگی نفتی در دریای عمان، از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و تحلیل‌های آماری استفاده شد. در این راستا، ابتدا معیارهای فیزیکی مؤثر بر شرایط محیط دریایی شناسایی و سپس اهمیت نسبی آن‌ها و تأثیرشان بر انتخاب روش مقابله با آلودگی نفتی مورد ارزیابی قرار گرفت. مراحل اجرای پژوهش به شرح زیر است. با توجه به اهمیت شرایط محیطی در رفتار لکه نفتی و کارایی روش‌های مقابله با آلودگی، شش معیار فیزیکی شامل دما، شوری، کدورت، سرعت جریان، عمق و اکسیژن محلول به‌عنوان معیارهای مؤثر در فرآیند تصمیم‌گیری در نظر گرفته شدند. انتخاب این معیارها بر اساس اهمیت آن‌ها در تعیین شرایط فیزیکی محیط دریایی و تأثیر احتمالی آن‌ها بر انتشار، جابه‌جایی و کنترل لکه نفتی انجام شد.

در مرحله نخست، ماتریس مقایسه زوجی معیارهای فیزیکی تشکیل شد. در این ماتریس، اهمیت نسبی هر یک از معیارها در مقایسه با سایر معیارها تعیین گردید. برای انجام مقایسه‌های زوجی از مقیاس نه‌درجه‌ای AHP، در دامنه ۱ تا ۹، استفاده شد (Tayebi & Fetanat, 2023). در این مقیاس، عدد ۱ بیانگر اهمیت یکسان دو معیار و اعداد بالاتر نشان‌دهنده افزایش اهمیت نسبی یک معیار نسبت به معیار دیگر هستند. پس از تشکیل ماتریس مقایسه زوجی، وزن نسبی معیارهای فیزیکی محاسبه شد. این وزن‌ها بیانگر میزان اهمیت هر یک از پارامترهای محیطی در فرآیند تصمیم‌گیری برای مقابله با آلودگی نفتی هستند. در ادامه، با استفاده از تحلیل مبتنی بر هوش مصنوعی، رابطه میان معیارهای فیزیکی و وزن‌های محاسبه‌شده مورد بررسی قرار گرفت و معیار دارای بیشترین اهمیت به‌عنوان معیار ارجح برای مرحله انتخاب روش مقابله با آلودگی نفتی تعیین شد.

پس از تعیین معیار دارای بیشترین وزن، روش‌های مختلف مقابله با آلودگی نفتی بر اساس معیار منتخب مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این مرحله، ماتریس مقایسه زوجی مربوط به گزینه‌های مقابله با آلودگی نفتی تشکیل شد و گزینه‌های موجود بر اساس میزان انطباق با شرایط محیطی و معیار منتخب با یکدیگر مقایسه شدند. در نهایت، وزن و اولویت هر یک از روش‌ها محاسبه و مناسب‌ترین روش برای مقابله با لکه نفتی در شرایط مورد مطالعه تعیین شد.

به‌منظور بررسی روابط بین معیارهای فیزیکی آب دریا و وزن‌های محاسبه شده، تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام گرفت. ابتدا آزمون همبستگی پیرسون به‌منظور تعیین شدت و جهت رابطه بین متغیرهای مورد مطالعه به کار گرفته شد. سپس، با استفاده از رگرسیون خطی، قابلیت پیش‌بینی وزن‌های محاسبه‌شده بر اساس متغیرهای فیزیکی آب دریا ارزیابی شد. در تحلیل رگرسیون، میزان ارتباط متغیرهای مستقل با متغیر وابسته و توان مدل در پیش‌بینی تغییرات متغیر وابسته مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها در کنار نتایج حاصل از AHP، به منظور ارزیابی نقش معیارهای فیزیکی در انتخاب روش مناسب مقابله با آلودگی نفتی مورد استفاده قرار گرفتند (Hung et al., 2018; Vafai et al., 2013).

یافته‌ها و بحث

مشخصات ماتریس زوجی برای متغیرهای فیزیکی آب دریا از قبیل اکسیژن محلول، عمق آب، سرعت جریان آب دریا، کدورت آب، شوری و دما به شکل زیر محاسبه شد.

جدول ۱. ماتریس مقایسات زوجی معیارهای فیزیکی آب دریا در فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

Table 1. Pairwise Comparison Matrix of Seawater Physical Parameters in the Analytical Hierarchy Process (AHP)

متغیر	دما	شوری	کدورت	سرعت جریان	عمق	اکسیژن
دما	۱	۳	۵	۷	۵	۹
شوری	۱/۳	۱	۳	۵	۳	۷
کدورت	۱/۵	۱/۳	۱	۳	۱	۵
سرعت جریان	۱/۷	۱/۵	۱/۳	۱	۱/۳	۳
عمق	۱/۵	۱/۳	۱	۳	۱	۵
اکسیژن	۱/۹	۱/۷	۱/۵	۱/۳	۱/۵	۱

به‌منظور ارزیابی سازگاری قضاوت‌های انجام‌شده در ماتریس مقایسه زوجی، نرخ ناسازگاری^۱ (CR) محاسبه شد. ابتدا بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس مقایسه زوجی برابر با $2578/6$ به دست آمد. سپس، شاخص سازگاری^۲ (CI) از رابطه زیر محاسبه شد:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n(n-1)}$$

که در آن، $(\lambda_{\max})$ بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس و (n) تعداد معیارها است. با توجه به شش معیار مورد بررسی، مقدار CI برابر با $0.516/0$ محاسبه شد. سپس با در نظر گرفتن مقدار شاخص تصادفی سازگاری (RI) برابر با $24/1$ برای ماتریس شش‌معیاره، نرخ ناسازگاری از رابطه زیر به دست آمد:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

بر این اساس، مقدار نرخ ناسازگاری برابر با 0.0416 ($4/16$ درصد) به دست آمد. از آنجا که مقدار CR کمتر از 0.10 است، میزان سازگاری مقایسه‌های زوجی قابل‌قبول ارزیابی شد. وزن‌های محاسبه‌شده برای متغیرهای فیزیکی آب به قرار زیر می‌باشد که پارامتر دما دارای بیشترین وزن تعیین‌شده می‌باشد.

جدول ۲. وزن نهایی متغیرهای فیزیکی آب دریا بر اساس فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

Table 2. Final weight of seawater physical variables based on the Analytic Hierarchy Process (AHP)

معیار	وزن
دما	0.457
شوری	0.242
کدورت	0.111
سرعت جریان	0.111
عمق	0.051
اکسیژن محلول	0.027

اگرچه دریای عمان از نظر میانگین دمای سالانه لزوماً گرم‌ترین پهنه دریایی محسوب نمی‌شود و دمای آب آن در محدوده تقریبی ۲۵ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد قرار دارد، اهمیت معیار دما در پژوهش حاضر به مقدار مطلق دمای منطقه یا مقایسه آن با سایر مناطق جغرافیایی محدود نمی‌شود. در چارچوب فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، وزن هر

¹ - Consistency Ratio

² - Consistency Index

معیار بیانگر اهمیت نسبی آن در مسئله تصمیم‌گیری مورد مطالعه است. بنابراین، وزن ۴۰ درصدی دما حاصل مقایسه‌های زوجی معیارهای مورد بررسی و نشان‌دهنده اهمیت نسبی این پارامتر در انتخاب روش مقابله با آلودگی نفتی است.

از نظر فرآیندهای مرتبط با سرنوشت لکه نفتی، دما می‌تواند از طریق تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نفت، از جمله ویسکوزیته و نرخ تبخیر ترکیبات فرار، بر رفتار و پراکنش لکه نفتی اثرگذار باشد. همچنین، تغییرات دما می‌تواند بر کارایی برخی روش‌های مقابله با آلودگی نفتی، از جمله جذب سطحی، پراکنش شیمیایی و زیست‌پالایی، تأثیر بگذارد. به‌ویژه در روش زیست‌پالایی، دما یکی از عوامل مؤثر بر فعالیت و رشد میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده هیدروکربن‌ها محسوب می‌شود. از این منظر، اهمیت بالاتر دما در مدل حاضر را می‌توان ناشی از نقش چندوجهی آن در فرآیندهای مؤثر بر سرنوشت و کنترل آلودگی نفتی دانست، نه صرفاً بالا بودن دمای آب دریای عمان. با این حال، وزن ۴۰ درصدی دما باید به‌عنوان یک نتیجه وابسته به ساختار مقایسه‌های زوجی و چارچوب تصمیم‌گیری این پژوهش تفسیر شود و نمی‌توان آن را به‌صورت یک رابطه عمومی و مستقل از شرایط محیطی به همه مناطق دریایی تعمیم داد. با توجه به نتایج حاصل از وزن‌دهی معیارهای فیزیکی، دما با وزن ۰/۴۰ به‌عنوان معیار دارای بیشترین اهمیت نسبی تعیین شد. بنابراین، در مرحله دوم فرآیند تصمیم‌گیری، گزینه‌های مختلف مقابله با لکه نفتی بر اساس معیار دما مورد مقایسه و اولویت‌بندی قرار گرفتند. در نتیجه، رتبه‌بندی ارائه‌شده در جدول ۳ حاصل مقایسه گزینه‌ها بر مبنای معیار دما است و نشان‌دهنده رتبه‌بندی تلفیقی گزینه‌ها بر اساس هر شش معیار فیزیکی آب دریا نیست.

جدول ۳. اوزان نهایی روش‌های مقابله با لکه نفتی در دریای عمان بر اساس معیار دما و روش (AHP)

Table 3. Final weights of oil spill response methods in the Sea of Oman based on temperature and AHP criteria

روش	وزن نهایی
جذب سطحی	۰/۳۵۴
پخش‌کننده‌های شیمیایی	۰/۲۷۱
روش‌های مکانیکی	۰/۲۰۹
سوزاندن	۰/۱۱۳
زیست‌پالایی	۰/۰۵۷

بر این اساس، روش جذب سطحی با وزن ۰/۳۵۴ در رتبه نخست، پخش‌کننده‌های شیمیایی با وزن ۰/۲۷۱ در رتبه دوم، روش‌های مکانیکی با وزن ۰/۲۰۹ در رتبه سوم، سوزاندن با وزن ۰/۱۱۳ در رتبه چهارم و زیست‌پالایی با وزن ۰/۰۵۷ در رتبه پنجم قرار گرفتند. بنابراین، بر اساس ساختار تصمیم‌گیری این پژوهش و با در نظر گرفتن دما به‌عنوان معیار منتخب، روش جذب سطحی بالاترین اولویت را برای مقابله با لکه نفتی نشان داد. لازم به ذکر است که رتبه‌بندی ارائه‌شده در جدول ۳ بر اساس معیار دما به‌عنوان معیار غالب انتخاب‌شده در مرحله نخست انجام شده است و نباید به‌عنوان رتبه‌بندی تلفیقی گزینه‌ها بر اساس تمامی شش معیار فیزیکی تفسیر شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP به‌عنوان رویکردی چندمعیاره برای وزن‌دهی به متغیرهای فیزیکی آب دریای عمان و اولویت‌بندی روش‌های مقابله با آلودگی نفتی، نتایج مهمی را ارائه نمود. نتایج ماتریس زوجی پارامترهای فیزیکی نشان داد که دما به‌عنوان پارامتری کلیدی بیشترین وزن را در ساختار تصمیم‌گیری به خود اختصاص داده‌است (Hung et al., 2018; Vafai et al., 2013). این امر با توجه به نقش دما در تغییر خصوصیات

ترمودینامیکی نفت و فرآیندهای انتقال جرم در محیط آبی از جمله انحلال، تبخیر و فرآیندهای بیوشیمیایی وابسته به دما کاملاً توجیه‌پذیر است. از سوی دیگر در ارزیابی روش‌های مقابله با آلودگی نفتی، روش جذب سطحی یا Adsorption از نظر معیار دما بیشترین اولویت را کسب کرده‌است. این یافته با توجه به توانایی بالای روش جذب سطحی در حذف ترکیبات نفتی با توجه به وابستگی فرآیند جذب به شرایط دمایی، حاکی از برتری این روش نسبت به سایر روش‌ها مانند استفاده از پخش‌کننده‌های شیمیایی، جمع‌آوری مکانیکی، سوزاندن و زیست‌پالایی است. این موضوع تأکیدی است بر ضرورت تطبیق روش مقابله‌ای با شرایط محیطی متغیر به‌ویژه پارامتر دما که می‌تواند کارایی فرآیندهای مهار آلودگی را تحت‌تأثیر قرار دهد (Askari et al., 2025; Tian et al., 2025). در این مقاله همچنین تحلیل همبستگی بین وزن‌های تخصیص‌یافته به پارامترهای فیزیکی و روش‌های مقابله با آلودگی نفتی با نرم‌افزار SPSS26 انجام شد. نشان‌دهنده وجود رابطه معنی‌دار آماری $P\text{-value} < 0/05$ بین این دو مجموعه متغیر است. این همبستگی بیانگر آن است که وزن‌های تعیین‌شده برای هر روش مقابله‌ای قابلیت پیش‌بینی قابل اتکایی براساس متغیرهای فیزیکی آب داشته و در واقع می‌توان از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌عنوان ابزاری جامع برای تطبیق بهینه روش‌های مهار آلودگی با شرایط محیطی بهره برد (Hazar et al., 2025; Hung et al., 2018; Vafai et al., 2013). در این مقاله یافته‌ها بر اهمیت ارزیابی جامع پارامترهای فیزیکی آب و تأثیرات متقابل آن‌ها بر روی کارایی روش‌های مقابله با آلودگی نفتی تأکید دارد. همچنین نتایج حاکی از این است که توسعه مدل‌های تصمیم‌گیری براساس AHP به همراه تحلیل آماری می‌تواند نقش موثری در بهینه‌سازی استراتژی‌های مدیریت آلودگی دریایی به‌ویژه در اکوسیستم‌های حساس و متغیر مانند دریای عمان ایفا نماید (Hazar et al., 2025; Lee et al., 2023; Luan et al., 2019; Wang et al., 2023; Wei et al., 2014).

References

- Al-Shidhani, M., Al-Masroori, H., & Dutta, S. (2026). Socio-economic and environmental assessment of marine recreational fishing in the Sultanate of Oman. *Discover Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-02537-3>
- AlKaabi, N., Al-Ghouti, M. A., Jaoua, S., & Zouari, N. (2020). Potential for native hydrocarbon-degrading bacteria to remediate highly weathered oil-polluted soils in Qatar through self-purification and bioaugmentation in biopiles. *Biotechnology Reports*, 28, e00543. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00543>
- Askari, E., Alipour, V., & Rahmanian, O. (2025). Synthesis and Application of Adsorbent Pads for Removal of Oil Pollutants from Water. *Heliyon*, 11, e42885. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42885>
- Baqar, M. (2024). Circumstances of Oil Spills in Libyan Coastal Waters: Recent Advancement for Cleanup Techniques. 5(10), 13-23.
- Bôto, M. L., Magalhães, C., Perdigão, R., Alexandrino, D. A., Fernandes, J. P., Bernabeu, A. M., Ramos, S., Carvalho, M. F., Semedo, M., & LaRoche, J. (2021). Harnessing the potential of native microbial communities for bioremediation of oil spills in the Iberian Peninsula NW coast. *Frontiers in microbiology*, 12, 633-659. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.633659>
- Ćetković, J., Knežević, M., Vujadinović, R., Tombarević, E., & Grujić, M. (2023). Selection of wastewater treatment technology: AHP method in multi-criteria decision making. *Water*, 15(9), 1645. <https://doi.org/10.3390/w15091645>
- Chitrakar, P., Baawain, M. S., Sana, A., & Al-Mamun, A. (2019). Current status of marine pollution and mitigation strategies in arid region: a detailed review. *Ocean Science Journal*, 54(3), 317-348. <https://doi.org/10.1007/s12601-019-0027-5>

- Chompook, P., Roemmontri, J., & Ketsakorn, A. (2023). The application of analytic hierarchy process (AHP) for selecting community problems: Multicriteria decision-making approach on environmental health aspects. *Journal of Sustainability Science and Management*, 18(10), 138-149. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107619>
- Guidi, G., Sliskovic, M., Violante, A. C., & Vukic, L. (2016). Best available techniques (BATs) for oil spill response in the Mediterranean Sea: calm sea and presence of economic activities. *Environmental science and pollution research*, 23(2), 1944-1953. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5543-y>
- Ha, M.-J. (2018). Modeling for the allocation of oil spill recovery capacity considering environmental and economic factors. *Marine pollution bulletin*, 126, 184-190. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.006>
- Haridharan, N., Sundar, D., Kurrupasamy, L., Anandan, S., Liu, C. H., & Wu, J. J. (2022). Oil spills adsorption and cleanup by polymeric materials: A review. *Polymers for Advanced Technologies*, 33(5), 1353-1384. <https://doi.org/10.1002/pat.5636>
- Hazar, C., Mollaoglu, M., & Töz, A. C. (2025). Fuzzy-Based Evaluation of the Air Bubble Barrier as an Alternative Oil Spill Response Equipment. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(8), 485. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08115-7>
- Hung, P. V., Kim, K.-S., Tien, L. Q., & Cuong, N. M. (2018). Distribution of oil spill response capability through considering probable incident, environmental sensitivity and geographical weather in Vietnamese waters. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 2(1), 31-41. <https://doi.org/10.1080/25725084.2018.1511240>
- Kabyl, A., Yang, M., Shah, D., & Ahmad, A. (2022). Bibliometric analysis of accidental oil spills in ice-infested waters. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(22), 15190. <https://doi.org/10.3390/ijerph192215190>
- Khodadoust, H., Vafaie, F., & Hadipour, V. (2026). Evaluating shoreline vulnerability to oil spills using multi-criteria approaches: The case of Bushehr Province, Iran. *Marine pollution bulletin*, 222, 118865. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118865>
- Lee, J., Piao, L., & Park, H. (2023). Characterization of the physical and weathering properties of low sulfur fuel oil (LSFO) and its spreading on water surface. *Journal of hazardous materials*, 453, 131444. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131444>
- Lessard, R. R., & DeMarco, G. (2000). The significance of oil spill dispersants. *Spill Science & Technology Bulletin*, 6(1), 59-68. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(99\)00061-4](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(99)00061-4)
- Luan, G., Chu, S., Li, X., & Ma, G. (2019). Comprehensive Evaluation of Oil Sorbent Based on AHP Method. *International Conference on Sustainable Development of Water and Environment, Environmental Science and Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16729-5_12
- Mabile, N. (2018). In-Situ Burning Operations during the Deepwater Horizon Spill. In *In-Situ Burning for Oil Spill Countermeasures* (pp. 247-284). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429506376-4>
- Macaulay, B. M., & Rees, D. (2014). Bioremediation of oil spills: a review of challenges for research advancement. *Annals of environmental Science*, 8, 9-37.
- Moradirad, R., Haghighat, M., Yazdanirad, S., Hajizadeh, R., Shabgard, Z., & Mousavi, S. M. (2019). Selection of the most suitable sound control method using fuzzy hierarchical technique. *J Health Saf Work*, 8 (4) :371-382. <http://jhsw.tums.ac.ir/article-1-5960-en.html>
- Nabavi, E., Sabour, M., & Dezvareh, G. A. (2021). Selection of the best leachate treatment method for the waste of leek fields using Analytic Hierarchy Process (AHP). *Advances*

- in Environmental Technology, 7(3), 153-170. 10.22104/aet.2021.4967.1339. <https://doi.org/10.22104/aet.2021.4967.1339>
- Ratchagar, N. P., & Hemalatha, S. (2013). Study of Oil Spill on the Sea Surface in the Presence of Thermal and Concentration Buoyancy Effects. International Journal of Mathematical Modelling & Computations, 3(3), 157-168. (in persian). <https://civilica.com/doc/1590142>
- Tarkian, F., Ghaderi, S., Isfahani, M., Sharifi, A., & Mashhoon, F. (2014). Selection of the best wastewater treatment alternative for RIPI based on analytical hierarchy process (AHP) and expert choice software. Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab, 25(2), 114-121. (in persian). https://www.wwjjournal.ir/article_4565.html?lang=en
- Tayebi, M., & Fetanat, A. (2023). Sustainability and capability-based assessment of marine oil spill response technologies using a decision support system under decomposed fuzzy set. Environmental Monitoring and Assessment, 195(12), 1455. <https://doi.org/10.1016/j.jhydene.2023.08.229>
- Tian, L., Zhang, Y., Liu, Y., & Zhang, S. (2025). Polyimide nanofiber aerogel with hierarchical porosity: a novel platform in high-temperature oil absorption. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 114, 287-295. <https://doi.org/10.1007/s10971-025-06694-9>
- Vafai, F., Hadipour, V., & Hadipour, A. (2013). Determination of shoreline sensitivity to oil spills by use of GIS and fuzzy model. Case study–The coastal areas of Caspian Sea in north of Iran. Ocean & Coastal Management, 71, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.10.001>
- Wang, H., Ren, J., Yang, J., & Wang, J. (2015). Evaluating the effectiveness of ERS for vessel oil spills using fuzzy evidential reasoning. Ocean Systems Engineering–An International Journal, 5(3), 161-179. <https://doi.org/10.12989/ose.2015.5.3.161>
- Wang, Y., Tang, C., Du, P., Liu, B., Li, Y., & Chen, C. (2023). Spatial Differentiation Assessment of the Vulnerability of Marine Protected Areas to Oil Spill Stress in the Bohai Sea. Journal of Marine Science and Engineering, 11(10), 1877. <https://doi.org/10.3390/jmse11101877>
- Wei, D. M., Zheng, H. B., & Zhang, S. S. (2014). The capacities evaluation of oil absorption materials. Applied Mechanics and Materials, 535, 666-670. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.535.666>



Economic Valuation of the Role of Rangeland Ecosystems in Soil Nutrient Conservation

Farshad Keivan Behjou^a

^aProfessor, Department of Forest Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

*Corresponding author: farshad.keivan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5581-8270>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Soil is one of the most important components of rangeland ecosystems, serving as the primary medium that supports the survival and growth of rangeland vegetation. Maintaining soil quality and its nutrient content plays a fundamental role in sustaining productivity, enhancing biodiversity, and preserving ecosystem services. Improper grazing management and overgrazing reduce soil fertility, accelerate soil erosion, and ultimately decrease the productive capacity of rangelands. Despite considerable research, significant challenges remain in quantifying the economic impacts of grazing intensity and understanding its consequences for rangeland ecosystems. This study aimed to economically evaluate the role of rangeland ecosystems in conserving key soil nutrients, with a particular emphasis on nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K), in the Moghan region. For this purpose, two rangelands with contrasting management conditions (well-managed and poorly managed) were selected. Using the transect sampling method, 30 soil samples were collected from each rangeland and transferred to the laboratory for the determination of N, P, and K concentrations. The annual soil erosion rate of the study area was estimated at $14.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, while the total rangeland area was calculated to be 115,000 ha. Statistical analyses included an independent t-test to compare soil nutrient concentrations between the two rangelands and logistic regression to estimate the probability of rangeland degradation. Finally, the economic value of the conserved soil nutrients was estimated using the replacement cost method. The results indicated that the rangeland capital value regarding soil nutrients conservation was estimated 449190000 Iranian Rials per hectare. These findings highlight the critical importance of sustainable rangeland management in reducing the loss of natural capital, maintaining soil fertility, and minimizing the economic costs associated with rangeland degradation. The results can provide valuable scientific evidence for policymakers and land managers in developing effective strategies for the conservation and sustainable utilization of rangeland ecosystems.
Article history: Received: 2026/05/04 Received in revised form: 2026/05/14 Accepted: 2026/06/09 Available online: 2026/06/15	
Keywords: Economic valuation, Rangeland ecosystem, Replacement cost method.	

Cite this article: Keivan Behjou, F. (2026). Economic Valuation of the Role of Rangeland Ecosystems in Soil Nutrient Conservation. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 2(1), 127-141. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252689>



Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252689>

Introduction

Rangeland ecosystems are among the most valuable terrestrial ecosystems, providing a wide range of ecological, economic, and social services. Beyond supporting livestock production, they play a fundamental role in maintaining biodiversity, regulating hydrological processes, preventing soil erosion, storing carbon, and sustaining rural livelihoods. Among the various components of rangeland ecosystems, soil represents the primary natural capital that determines ecosystem productivity and resilience. Healthy soils provide essential nutrients, water, and physical support for vegetation while simultaneously regulating numerous biogeochemical processes that maintain ecosystem stability. Consequently, any deterioration in soil quality directly threatens the sustainability of rangeland ecosystems and reduces their capacity to deliver ecosystem services. In many arid and semi-arid regions, inappropriate grazing practices and poor rangeland management have accelerated soil degradation. Excessive grazing intensity reduces vegetation cover, weakens root systems, exposes the soil surface to erosive forces, and increases nutrient losses through both water and wind erosion. These processes lead to a gradual decline in soil fertility, diminished forage production, and increased restoration costs. Although the ecological impacts of rangeland degradation have been extensively documented, the economic consequences associated with the loss of soil nutrients have received comparatively less attention. Assigning an economic value to ecosystem functions provides a practical framework for integrating environmental considerations into natural resource management and policy-making.

One of the most effective approaches for valuing ecosystem services is the Replacement Cost Method, which estimates the monetary value of ecosystem functions based on the cost required to replace lost natural resources or ecosystem services through artificial means. In the context of rangelands, this approach enables researchers to quantify the economic losses resulting from the depletion of essential soil nutrients such as nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K). These nutrients are indispensable for plant growth, primary productivity, nutrient cycling, and maintaining soil fertility. Their depletion not only reduces agricultural and rangeland productivity but also increases dependence on costly chemical fertilizers.

The Moghan Plain, located in northwestern Iran, represents one of the country's most important rangeland regions. However, increasing grazing pressure and land-use changes have raised concerns regarding soil degradation and nutrient depletion. Therefore, this study was conducted to evaluate the economic value of soil nutrient conservation provided by rangeland ecosystems under different management conditions. Specifically, the study aimed to compare nutrient concentrations between well-managed and poorly managed rangelands, estimate the probability of rangeland degradation using logistic regression, and quantify the economic value of conserved soil nutrients through the replacement cost method. The findings are expected to provide scientific evidence supporting sustainable rangeland management and informed environmental decision-making.

Method

This study was conducted to evaluate the economic value of soil nutrient conservation as an ecosystem service provided by rangelands in the Moghan region. Two rangeland sites with contrasting grazing management conditions were selected, including a well-managed rangeland and a poorly managed (degraded) rangeland. Soil sampling was performed using the transect method, and 30 soil samples were collected from each site, resulting in a total of 60 samples. The collected samples were transferred to the laboratory for the determination of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) concentrations using standard analytical procedures. The annual soil erosion rate in the study area was estimated at $14.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, and the total rangeland area was considered to be approximately 115,000 ha. Statistical analyses included an

independent samples t-test to compare soil nutrient concentrations between the two rangelands and logistic regression analysis to estimate the probability of rangeland degradation under different management conditions. The replacement cost method was subsequently applied to estimate the economic value of soil nutrients conserved by the rangeland ecosystem based on the costs of replacing nutrients lost through soil erosion with commercial fertilizers.

Results

The findings revealed significant differences in soil nutrient concentrations between the two rangelands, indicating that grazing management strongly influenced soil fertility. The well-managed rangeland maintained higher concentrations of nitrogen, phosphorus, and potassium than the poorly managed site, reflecting its greater capacity to conserve soil nutrients and resist degradation. Logistic regression analysis further confirmed that poor grazing management substantially increased the probability of rangeland degradation. Based on the estimated annual soil erosion rate and the nutrient concentrations measured in the soil samples, considerable quantities of nitrogen, phosphorus, and potassium were estimated to be lost each year through erosion processes. Economic valuation using the replacement cost approach showed that the total annual value of these lost soil nutrients across the study area was approximately 449190000 Iranian Rials, demonstrating the substantial economic costs associated with declining soil fertility and ecosystem degradation. The comparison between the two management systems also demonstrated that maintaining adequate vegetation cover plays a fundamental role in protecting soil resources against erosion and nutrient depletion. Higher vegetation density in the well-managed rangeland improved soil stability, reduced runoff, and enhanced the retention of essential nutrients within the ecosystem. In contrast, reduced plant cover in the degraded rangeland increased soil exposure to erosive forces, resulting in greater nutrient losses and lower soil fertility. These findings reinforce the ecological importance of sustainable grazing practices as an effective measure for maintaining soil quality and supporting long-term ecosystem productivity. Furthermore, expressing nutrient losses in economic terms makes the consequences of land degradation more tangible and facilitates comparisons between the costs of preventive management and those of ecosystem restoration.

Conclusions

The results demonstrate that sustainable grazing management plays a critical role in maintaining soil fertility, conserving essential nutrients, and reducing the economic losses associated with soil erosion. The considerable monetary value assigned to conserved soil nutrients highlights the importance of recognizing soil fertility conservation as a valuable ecosystem service. Integrating ecological assessments with economic valuation provides a practical framework for quantifying the hidden costs of rangeland degradation and supports evidence-based decision-making. The findings suggest that implementing appropriate grazing management practices, including controlled stocking rates and restoration measures, can significantly reduce nutrient depletion, preserve natural capital, and improve the long-term sustainability of rangeland ecosystems. These results provide valuable scientific evidence for policymakers and land managers to develop effective conservation strategies that simultaneously enhance ecological resilience and economic efficiency. From a broader perspective, this study highlights the importance of incorporating ecosystem service valuation into rangeland management and land-use planning. Economic valuation supports evidence-based decision-making by demonstrating the long-term environmental and economic benefits of sustainable management. Future research should integrate additional ecosystem services to provide a more comprehensive basis for conservation planning and sustainable natural resource management.



ارزش گذاری اقتصادی نقش اکوسیستم های مرتعی در حفظ عناصر غذایی خاک

فرشاد کیوان بهجو^{a*}

^aاستاد، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

* نویسنده مسئول: farshad.keivan@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	از اجزای مهم تشکیل دهنده اکوسیستم های مرتعی، خاک است که منبع زنده مان برای گیاهان مرتعی می باشد. حفظ کیفیت خاک و عناصر غذایی آن، نقش اساسی در پایداری تولید، افزایش تنوع زیستی و تداوم خدمات اکوسیستمی مراتع دارد. بهره برداری نامناسب و چرای بی رویه موجب کاهش حاصلخیزی خاک، افزایش فرسایش و در نهایت افت توان تولیدی مراتع می شود. برای تقویم اقتصادی شدت استفاده از مراتع و درک اثرات منفی آن بر روی اکوسیستم های مرتعی نقص های زیادی وجود دارد. این پژوهش با هدف تحلیل اقتصادی ارزش وجودی اکوسیستم مرتع بر نگهداشت برخی عناصر غذایی مهم خاک در منطقه مغان از استان اردبیل انجام شد. بدین منظور ابتدا دو منطقه مرتعی انتخاب (با مدیریت مناسب و با مدیریت بد) و با روش خط نمونه، ۳۰ نمونه خاک برای هر مرتع از منطقه نمونه برداری شد و به آزمایشگاه جهت اندازه گیری مقادیر N ، P و K منتقل گردید. مقدار فرسایش منطقه ۱۴/۷ تن بر هکتار در سال و همچنین مساحت مراتع منطقه ۱۱۵ هزار هکتار به دست آمد. تحلیل آماری برای مقایسه مقادیر عناصر غذایی مورد نظر در دو مرتع با روش آزمون t و آنالیز رگرسیون لجستیک برای تعیین تابع احتمال آسیب به مرتع اجرا شد. از روش هزینه جایگزینی برای برآورد ارزش سرمایه ای اکوسیستم مرتع بر اساس ارزش خدمت اکوسیستمی حفظ عناصر غذایی خاک استفاده شد. نتایج نشان داد ارزش سرمایه ای مرتع از محل حفظ عناصر غذایی خاک به ازای هر هکتار برابر با ۴۴۹۱۹۰ هزار ریال است. این یافته ها بیانگر اهمیت مدیریت اصولی مراتع در کاهش اتلاف سرمایه های طبیعی، حفظ حاصلخیزی خاک و کاهش هزینه های اقتصادی ناشی از تخریب اکوسیستم های مرتعی است و می تواند مبنایی برای تصمیم گیری های مدیریتی و سیاست گذاری در حوزه حفاظت و بهره برداری پایدار از مراتع باشد.

استناد به این مقاله: کیوان بهجو، فرشاد. (۱۴۰۵). ارزش گذاری اقتصادی نقش اکوسیستم های مرتعی در حفظ عناصر غذایی خاک. راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، ۱(۲)، ۱۴۱-۱۲۷. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252689>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252689>

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

حفظ حاصل‌خیزی خاک‌ها یکی از کارکردهای مهم اکوسیستم‌های مرتعی است به‌ویژه در مناطق پرشیب کوهستانی به میزان قابل‌توجهی آسیب‌پذیر به نظر می‌رسد. از بین رفتن پوشش گیاهی و در پی آن نابودی منابع خاک از جمله عوامل تهدیدکننده عرصه‌های مرتعی می‌باشد. دخالت نامعقول انسان در اکوسیستم‌های مرتعی موجب به هم خوردن تعادل آن‌ها می‌گردد که حاصل آن کاهش حاصل‌خیزی خاک مرتع و فقر عناصر غذایی می‌باشد. از طرفی اثبات شده است که از کارکردهای مهم غیرعلوفه‌ای پوشش گیاهی مراتع، حفاظت خاک و جلوگیری از فرسایش است (Eskandari et al., 2008). همچنین نتایج پژوهش‌ها ثابت نموده است که کاهش حاصل‌خیزی خاک در اثر فرسایش نه‌تنها میزان تولید را پایین می‌آورد، بلکه کیفیت محصول تولید شده را نیز کاهش می‌دهد. سه عنصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم، از عناصر بسیار مهم و حیاتی در فرآیند حاصل‌خیزی خاک مراتع محسوب می‌شود. در واقع میزان مواد آلی، نیتروژن، فسفر و پتاسیم، از جمله متغیرهایی است که بر میزان تولید علوفه تأثیر بسزایی می‌گذارند (Rastgar et al., 2015). بنابر آمار اعلام‌شده از سوی مسئولان سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، نرخ سالانه فرسایش خاک در کشور حدود ۱۶ تن در هکتار و در کل عرصه‌های کشور بالغ بر ۲ میلیارد تن در سال است. این در حالی است که بر اساس معیارهای جهانی نرخ متعادل سالانه فرسایش خاک باید ۶ تن در هکتار باشد. بنابراین، میزان فرسایش خاک در ایران حدود ۳ برابر متوسط شاخص جهانی است (Jafari et al., 1999).

در سال‌های اخیر، مراتع کشور به دلایل مختلف به‌طور فزاینده در معرض تخریب کمی و کیفی قرار گرفته‌اند تا جایی‌که که اصلاح و احیای مجدد آن‌ها نیاز به زمان زیاد و هزینه هنگفت دارد. در بسیاری از موارد این تخریب بیش از آنکه معلول عوامل طبیعی همچون خشک‌سالی و تغییر شرایط جوی باشد، معلول عملکرد غیرمعمول و غیرعلمی انسان در بهره‌برداری از این منابع است (Mousavi et al., 2014). بررسی منابع و نوشتارهای مربوط به بررسی‌های انجام‌شده در زمینه هدر رفت خاک و مواد مغذی آن، مبین این است که در ایران بیشتر تحقیقات انجام‌شده درباره مقدار فرسایش و میزان جابجایی خاک و مقادیر رسوب‌گذاری بوده‌است. در حالی‌که خسارات فرسایش به خارج شدن خاک از دسترس گیاه و پر شدن مخازن آب محدود نمی‌شود، بلکه هدر رفت و از دسترس خارج شدن عناصر غذایی موجود در خاک موجب کاهش حاصل‌خیزی خاک آن در اثر فرسایش می‌شود که موجب زیان‌های اقتصادی و اجتماعی ناشی از فرسایش به ویژه در دامنه‌های شیب‌دار می‌شود (Ghoddousi, 2007). با در نظر گرفتن لزوم و اهمیت روش‌های محاسبه هزینه‌های ناشی از فرسایش خاک، برخی از مهم‌ترین نتایج پژوهشی بدست‌آمده در جهان و ایران بدین شرح است. اولین بار Bennett (1933)، در آمریکا هزینه فرسایش خاک را با استفاده از روش هزینه جایگزین برآورد نمود. ایشان به منظور تخمین هزینه‌های فرسایش خاک، هزینه جایگزینی عناصر مغذی خاک را با استفاده از قیمت تجاری کودهای شیمیایی قابل‌جانشین برآورد نمود. در این روش، با برآورد هزینه هر تن هدررفت خاک، مقدار هدر رفت مواد آلی و مغذی خاک مشخص شد. Andreasen & Skovgaard (2009)، در تحقیقی که در مورد خاک‌های مناطق گرمسیری نیمه‌خشک انجام دادند نشان دادند که فرسایش و از دست رفتن مواد غذایی که به وسیله میزان زیاد رواناب ایجادشده بازدهی محصول را کاهش می‌دهد. Ahmed (2009)، اثر تغییر درپوشش جنگل بر روی وضعیت خاک را در حوضه کهمیل موردبررسی قرار دادند. هدف این مطالعه، کوشش برای نشان دادن وضعیت جنگل‌ها در کشمیر بود که تحت فشارهای خیلی زیاد انسانی قرار داشتند. نتایج نشان می‌دهد که جنگل‌زدایی در اثر فرسایش خاک تشدید شده‌است. همچنین ارزش اقتصادی فرسایش خاک را، براساس خاک فرسایش‌یافته و محتوای عناصر غذایی آن و با توجه به قیمت بازاری این عناصر در دو کاربری کشاورزی و مرتع در شمال شرق ترکیه، مطالعه کردند. ارزش اقتصادی خاک فرسایش یافته در اراضی مرتعی حدود ۵۹/۵۴ دلار در هکتار در سال و همچنین مقادیر هدر رفت N, P, K به

ترتیب ۵/۳، ۴/۸۳ و ۴۸/۳۳ دلار در هکتار در سال برآورد شد. [Gulati & Rai \(2014\)](#)، تخمین هزینه فرسایش خاک و هدررفت مواد مغذی را در حوزه آبخیز چوتاناگپور در هند انجام دادند. آن‌ها با برآورد ۵۹۰ کیلوگرم هدررفت مواد مغذی خاک از سطح حوزه آبخیز، هزینه هدررفت مواد مغذی خاک (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) را ۱۳۷ دلار در هکتار برآورد نمودند. [Rife \(2010\)](#)، به‌منظور تعیین ارزش خدمات اکوسیستمی در ایالت جنوب شرقی الغنی پنیسلوانیا آمریکا، هدررفت خاک را با استفاده از مدل USLE در محیط GIS محاسبه نمود. ایشان هزینه برداشت رسوب را ۱۲۹/۰۲۴ دلار در هکتار در سال برآورد نمودند. [Bakhtiari \(2007\)](#)، در تحقیقی که در زمینه ارزش‌گذاری اقتصادی کارکرد حفظ و نگهداشت عناصر غذایی خاک در جنگل‌های منطقه سبز کوه انجام دادند به این نتیجه رسیدند که ارزش اقتصادی سالانه جنگل در حفاظت از عناصر غذایی N, P, K و جلوگیری از هدررفت آن‌ها در منطقه موردبررسی، معادل ۹۹۶ هزار ریال در هکتار می‌باشد. [Panahi \(2015\)](#)، با تحقیق در زمینه ارزش جنگل‌های خزری در نگهداشت عناصر غذایی خاک به این نتیجه رسیده‌است که ارزش جنگل‌های موردبررسی از طریق حفاظت خاک و جلوگیری از رخداد فرسایش و در نتیجه هدررفت عناصر غذایی موجود در خاک سالانه حدود ۹۲/۶ میلیون ریال در هکتار می‌باشد. [Noor et al., 2013](#) تلفات اقتصادی فرسایش خاک در مراتع حوزه آبخیز لرستان را با استفاده از روش جایگزینی مواد غذایی برآورد نمودند. کل میزان فرسایش در منطقه با استفاده از روش MPSIAC، ۱۰۷۵۰۰/۶ تن در سال برآورد نمودند.

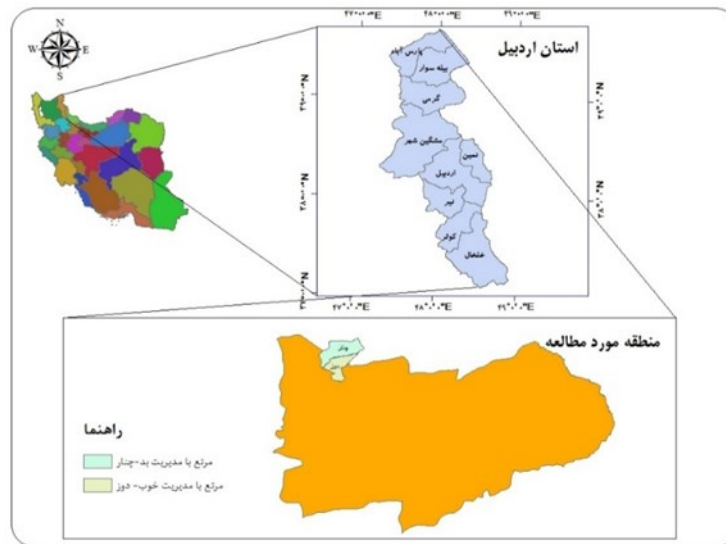
[Keyvan Behjou et al., 2016](#)، پژوهشی با هدف ارزش‌گذاری اقتصادی عناصر غذایی اصلی و با تاکید بر خاک جنگل‌های منتخب منطقه حفاظت شده شیمبار در استان خوزستان انجام دادند که در آن میزان فرسایش را با روش EPM، تعیین و سپس هدررفت سه عنصر غذایی مهم (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) را براساس اختلاف مقادیر عناصر غذایی دو تیمار شاهد و فرسایش‌یافته اندازه‌گیری شد. سپس ارزش پولی نگهداری عناصر غذایی خاک به وسیله پوشش جنگلی، بر اساس روش اقتصادی هزینه جایگزینی محاسبه گردید. نتایج تحقیق نشان داد که در محدوده مورد مطالعه به مساحت ۳۱۱۶ هکتار سالانه حدود ۵/۴۶۸ تن عناصر غذایی NPK در اثر فرسایش خاک از بین می‌رود که به معنای ایجاد هزینه‌ای معادل ۸۸۲۰۲۹۴۵۴۹۱ ریال به محیط زیست می‌باشد.

با توجه به مطالب عنوان‌شده در قسمت مقدمه و پیشینه تحقیق، مبنی بر اینکه مراتع استان اردبیل علاوه بر دامداری از لحاظ زنبورداری و تولید گیاهان دارویی و در کل از لحاظ اقتصادی حائز اهمیت می‌باشند، لذا ضرورت دارد تحقیقاتی در ارتباط با تحلیل اقتصادی ارزش وجودی اکوسیستم مرتع بر نگهداشت برخی عناصر غذایی مهم خاک در این استان انجام شود تا بتوان برای مدیریت بهتر و بهره‌برداری خوب و پایدار از این اکوسیستم در کنار حفظ آن راهکارهایی را ارائه نمود.

روش‌شناسی پژوهش

یکی از مناطق مهم در استان اردبیل منطقه مغان است که در شمال شرقی اردبیل و در ۴۸ درجه و ۶ دقیقه طول شرقی و ۳۹ درجه و یک دقیقه عرض شمالی واقع شده‌است. میزان مساحت آن، ۲۰۳۳۲۴ هکتار می‌باشد، که ۱۱۵ هزار هکتار از این مساحت را مراتع دشت مغان تشکیل می‌دهد (شکل ۱). مراتع این شهرستان علاوه بر دامداری، از لحاظ زنبورداری و تولید گیاهان دارویی حائز اهمیت است. به نظر می‌رسد شرایط اقلیمی مناسب و سودآوری بالای محصولات مرتعی حاصل از مرتع باعث شده این منطقه به‌عنوان یک قطب اقتصادی در تولید انواع محصولات بازاری مرتعی مطرح باشد که همین موضوع موجبات تخریب روزافزون مراتع این شهرستان را فراهم آورده است. با استناد به

گزارش فرسایش رسوب منطقه مغان (۱۳۸۹) مقدار فرسایش برآوردی با استفاده از مدل MPSIAC برای منطقه در حدود ۱۴/۱۷ تن بر هکتار در سال بدست آمده‌است (جدول ۱).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

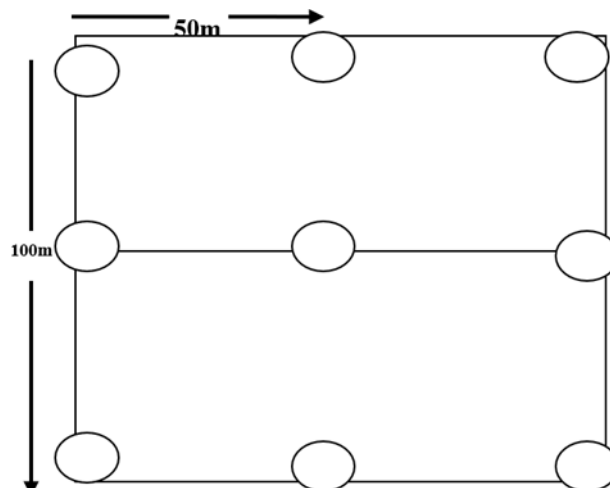
Figure 1. Location of the study area

جدول ۱. اطلاعات مربوط به فرسایش و رسوب منطقه مورد مطالعه

Table 1. Erosion and sedimentation information for the study area

منطقه	مساحت (هکتار)	میزان فرسایش (ton/ha.y)	میزان فرسایش (m3/ha.y)	رسوب (ton/ha.y)	رسوب (m3/ha.y)	% SDR	SDR
مغان	۱۱۵	۱۴/۷	۱۰/۴۲	۹/۱۶	۶/۷۳	۳/۹۱	۳۹۰/۹۱

برای نمونه‌برداری خاک در هر مترع با شروع تصادفی و به صورت سیستماتیک از طریق روش خط‌نمونه از خاک منطقه نمونه برداری شد، برای پیاده کردن خط‌نمونه یک نقطه به طور تصادفی به عنوان نقطه شروع خط انتخاب شد و بقیه خطوط به موازات این خط و با فواصل معین (۵۰ متر از یک‌دیگر) پیاده شد. در هر مترع به منظور پوشش دادن بحث تکرار در آمار، ۱۰ ترانسکت با طول ۱۰۰ متر پیاده شد. بر روی هر ترانسکت در نقاط ابتدا، وسط و انتها، پروفیل خاک به عمق ۲۰ سانتی‌متر حفر و نمونه‌برداری شد. با در نظر گرفتن طول ترانسکت و فاصله بین آن‌ها و نیز با توجه به ساختار پوشش گیاهی موجود در منطقه، نقاط نمونه نسبت به یکدیگر ۵۰ متر فاصله داشت. با لحاظ منطق آماری در بررسی جوامع برداشت ۳۰ نمونه می‌تواند گویای وضعیت جامعه مورد بررسی باشد (Rezai & Mirmohammadi, 2005). لذا در مجموع ۳۰ نمونه خاک از هر مترع برداشت‌شده و به آزمایشگاه جهت اندازه‌گیری K ، P ، N و نیز برخی خصوصیات فیزیکی (درصد رس، شن، سیلت و درصد رطوبت اشباع) و خصوصیات شیمیایی (اسیدیته، pH، TNV) منتقل گردید. در شکل ۲ نمونه برداری از سطح ۳ ترانسکت و ۹ نقطه نمونه به صورت شماتیک ارائه گردید.



شکل ۲. شکل شماتیک روش نمونه‌برداری از مراتع مورد مطالعه

Figure 2. Schematic diagram of the sampling method for the studied rangelands

روش اندازه‌گیری نیتروژن (N)

در این تحقیق برای به دست آوردن مقادیر نیتروژن نمونه‌های خاک از روش کجدال استفاده شد. در این روش، ازت آمونیاکی ($N-NH_4$) ماده آلی بر اثر ترکیب با اسید سولفوریک غلیظ به صورت سولفات آمونیوم درآمده، آمونیوم حاصل پس از ترکیب با سود غلیظ در دستگاه تقطیر به گاز آمونیاک تبدیل گشته و گاز حاصل سپس به وسیله اسید بوریک جمع‌آوری می‌شود. سرعت فعل و انفعالات فوق با افزایش دما و در حضور کاتالیزور فزونی می‌یابد. در عمل، به منظور افزایش دما، از سولفات پتاسیم و یا سولفات سدیم استفاده می‌شود. در پایان باز تشکیل شده با کمک اسید سولفوریک رقیق (۰/۰۵) تیتتر گردیده و بدین ترتیب مقدار کل ازت خاک تعیین می‌شود.

روش اندازه‌گیری فسفر (P)

برای تعیین مقدار فسفر در این پژوهش از روش آسن استفاده شد. در روش آسن، ابتدا ۵ گرم خاک را برداشته و داخل یک ارلن قرار داده می‌شود، سپس ۱۰۰ میلی‌لیتر بیکربنات کلسیم نیم مولار روی آن ریخته سپس سوسپانسیون ایجادشده به مدت نیم ساعت شیک‌شده و پس از آن توسط کاغذ صافی آن را صاف کرد تا عصاره زلالی حاصل گردد. ۱۵ سی‌سی از عصاره بدست‌آمده را در یک بالن ۲۵ پیپت نموده و به آرامی ۵ سی‌سی محلول آمونیوم مولیبدات به آن اضافه شد. بالن را به تدریج تکان داده تا گازهای دی‌اکسیدکربن خارج شوند. بعد از این مرحله مقدار ۱ سی‌سی کلرید قلع اضافه و بالن به حجم ۲۵ سی‌سی رسانده شد. شدت عبور نور (T) را پس از کالیبراسیون استانداردهای ۰/۹، ۰/۷، ۰/۱، ۰/۳ و صفر پی‌پی‌ام در طول موج ۶۶۰ نانومتر قرائت شد.

روش اندازه‌گیری پتاسیم (K)

برای جداسازی پتاسیم موجود در کانی‌های رسی از یون آمونیوم به علت تشابه بالا با پتاسیم در شعاع یونی، استفاده شد. میزان پتاسیم پس از استخراج به کمک دستگاه فیلم فوتومتری یا شعله سنجی اندازه‌گیری شد. اساس دستگاه به این صورت است که این دستگاه برای اندازه‌گیری فلزات قلیائی خاکی مخصوصاً Li, Na, K طراحی شده‌است. دلیل این موضوع نیز این است که این فلزات در دماهای پائین‌تری تحریک می‌شوند و با گاز متان و شعله معمولی این عناصر تحریک و تولید نور می‌کنند.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

به منظور تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با توجه به فرضیات تحقیق، از نرم افزار SPSS 22 استفاده شد. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف اسمیرنوف و شاپیروویلک در سطح احتمال ۵ درصد بررسی شد. جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها پس از انجام آزمون نرمالیت در صورت نرمال بودن داده‌ها از آزمون t مستقل (مقایسه میانگین بین گروه‌ها) جهت مقایسه مقادیر عناصر غذایی خاک در دو مرتع استفاده گردید. همچنین جهت تعیین تابع احتمال آسیب به مرتع از روش رگرسیون لجستیک استفاده شد.

ارزش سرمایه‌ای مرتع از محل حفظ عناصر غذایی خاک

در این تحقیق، برای تعیین ارزش سرمایه‌ای مرتع از محل حفظ عناصر غذایی خاک، ابتدا از روش هزینه جایگزینی برای ریالی نمودن مقادیر عناصر غذایی خاک استفاده شد (Aghili Kohnehshahri & Sadeghi, 2004). به عبارت دیگر از روش هزینه فرصت ازدست‌رفته جهت تقویم ارزش اقتصادی مقادیر هدر رفت خاک استفاده گردید. در این روش با برآورد هزینه‌های لازم جهت جایگزین نمودن عناصر ازدست‌رفته خاک (K+P+N) می‌توان به برآورد ارزش سرمایه‌ای مرتع از محل حفظ عناصر غذایی خاک اقدام نمود. به این منظور قیمت بازاری در سال انتشار پژوهش کنونی (۱۴۰۵) مربوط به سه نوع کود ازت، فسفر، پتاسیم به دست آمد که بر اساس نرخ‌نامه سال ۱۴۰۵ قیمت هر کیلوگرم کودهای نیترژنه، فسفات و پتاسه به ترتیب ۷۵۰ هزار ریال، ۱۴۳۲۱۷۰ ریال و ۱۳۷۰۰۰۰ ریال می‌باشد. در این تحقیق میزان نرخ تنزیل نیز ۱۰ درصد لحاظ شد. با داشتن Pn، Pp و Pk به‌عنوان قیمت بازاری کودهای مکمل مربوط به عناصر نیترژن، فسفر، پتاسیم در نظر گرفته شده است و نیز r که همان نرخ تنزیل است ۱۰ درصد لحاظ شد (کیوان بهجو و همکاران، ۱۳۹۵). ارزش فعلی خاک فرسایش یافته (B_T) در فاصله زمانی صفر (۰) تا بی نهایت (∞) از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$B_T = \int_{t=0}^{\infty} \frac{P_n D_{pn} + P_k D_{kn} + P_p D_{pn}}{(1+r)^n} dt \quad \text{رابطه ۱.}$$

یافته‌ها و بحث

به منظور بررسی مقادیر K و P، N و مقایسه مقادیر آن‌ها، سپس برآورد و مقایسه برخی از خصوصیات فیزیکی (نظیر توزیع ذرات شن، رس و سیلت) و شیمیایی (اسیدیته، قلیائیت، درصد رطوبت اشباع و میزان مواد خنثی‌شونده (TNV)) در خاک منطقه به روش آزمون T (آزمون t مستقل) و رگرسیون لجستیک در نرم افزار SPSS 22 انجام‌شده و سپس با استفاده از نتایج این بخش، به برآورد ارزش اقتصادی خاک در اکوسیستم مراتع مورد مطالعه اقدام شد (جدول ۴). پس از جمع‌آوری و ثبت داده‌ها برای تحلیل آماری از نرم‌افزار SPSS 22 استفاده شد. در جداول ۲ و ۳، آمار توصیفی (مقادیر میانگین، انحراف معیار و واریانس و ...) مربوط به مقادیر K و P، N در منطقه مورد مطالعه به ترتیب برای داده‌های اصلی و داده‌های نرمال شده ارائه شده‌است.

شده)های برداشت‌های مورد بررسی (با داده جدول ۲. آمار توصیفی پارامتر

Table 2. Descriptive statistics of the studied parameters (with collected data)

متغیر	واریانس	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
K	۷/۵۲×۱۰۴	۴۷۰	۲۷۴/۲۳	۵۸۳۴/۶۸
N	۷۸/۴۵	۳/۶۷	۸/۸۵	۲/۴۱
P	۱۴۵/۰۷	۹/۴۹	۱۲/۰۴	۱/۲۶

شده) های نرمال‌های مورد بررسی (با داده‌جدول ۳. آمار توصیفی پارامتر

Table 3. Descriptive statistics of the parameters studied (with normalized data)

پارامتر	واریانس	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
K	$7/52 \times 10^{-4}$	۴۷۰	۲۷۴/۲۳	۵۸۳۴/۶۸
N	۰/۰۸	۲/۷۶	۰/۲۹	۰/۱۰۵
P	۰/۲۷	۰/۶۶	۰/۵۲	۰/۷۸

جدول ۴. مقادیر اندازه‌گیری شده N, P, K برای مراتع با مدیریت خوب و مدیریت بد (ppm)

Table 4. Measured N, P, K values for well-managed and poorly managed pastures (ppm)

عدد نمونه	N		P		K	
	مدیریت خوب	مدیریت بد	مدیریت خوب	مدیریت بد	مدیریت خوب	مدیریت بد
۱	۰/۱۶	۰/۲۱	۱۵۴/۰۰	۷۸۰/۰۰	۱/۳۰	۲/۳۰
۲	۳۳/۰۰	۰/۱۴	۲۳۸/۰۰	۳۹۰/۰۰	۲۷/۰۰	۱/۵۰
۳	۰/۲۰	۰/۱۲	۱۳۳/۰۰	۷۰۰/۰۰	۴/۶۰	۱/۶۰
۴	۰/۱۰	۰/۱۳	۹۴/۰۰	۱۸۵/۰۰	۳/۲۰	۳/۳۰
۵	۳۳/۰۰	۰/۲۳	۲۳۸/۰۰	۷۶۸/۰۰	۲۷/۰۰	۴/۵
۶	۰/۰۸	۰/۲۰	۷۵/۰۰	۷۰۶/۰۰	۱/۶۵	۱/۲۷
۷	۲۱/۰۰	۰/۱۶	۲۲۲/۰۰	۷۴۲/۰۰	۳۴/۰۰	۲/۴۰
۸	۰/۰۳	۰/۱۷	۲۲۷/۰۰	۱۲۸۰/۰۰	۱/۱۴	۳/۲۰
۹	۰/۰۸	۰/۱۱	۷۰/۰۰	۱۰۰۰/۰۰	۱/۶۵	۴/۴۰
۱۰	۰/۱۴	۰/۱۴	۲۲۲/۰۰	۷۰۰/۰۰	۰/۴۷	۳/۲۰
۱۱	۰/۱۵	۰/۱۰	۶۱۰/۰۰	۴۸۰/۰۰	۳۵/۵۰	۱/۶۰
۱۲	۰/۱۱	۰/۱۴	۶۹۰/۰۰	۴۹۲/۰۰	۵/۰۰	۱/۲۰
۱۳	۰/۱۰	۰/۱۶	۳۵۰/۰۰	۴۳۰/۰۰	۵/۱۰	۱/۰۸
۱۴	۰/۱۲	۰/۱۹	۳۴۷/۰۰	۳۶۰/۰۰	۳/۶۵	۱/۰۲
۱۵	۰/۰۸	۰/۱۵	۲۸۴/۰۰	۴۷۹/۰۰	۳/۷۲	۱/۰۱
۱۶	۲۱/۰۰	۰/۱۳	۲۲۲/۰۰	۶۳۳/۰۰	۳۴/۰۰	۱۴/۰
۱۷	۲۱/۰۰	۰/۲۱	۲۲۲/۰۰	۵۱۰/۰۰	۳۴/۰۰	۶/۱۳
۱۸	۱۹/۰۰	۰/۵۷	۳۲۱/۰۰	۳۲۴/۰۰	۴۴/۰۰	۶/۵۳
۱۹	۰/۱۸	۰/۱۷	۵۰۰/۰۰	۶۹۰/۰۰	۱۴/۴۰	۵/۰۰
۲۰	۰/۲۳	۰/۳۱	۹۰۰/۰۰	۳۴۰/۰۰	۲۱/۰۰	۶/۴۰
۲۱	۱۷/۰۰	۰/۱۹	۳۶۵/۰۰	۵۵۰/۰۰	۲/۰۰	۵/۴۰
۲۲	۰/۶۳	۰/۱۷	۴۳۵/۰۰	۵۰۰/۰۰	۲۹/۰۰	۱۳/۶۰
۲۳	۱۷/۰۰	۰/۱۳	۴۴۰/۰۰	۴۳۰/۰۰	۰/۵۰	۲/۰۰
۲۴	۰/۱۲	۰/۱۶	۲۸۲/۰۰	۵۷۰/۰۰	۱/۱۷	۴/۴۰
۲۵	۰/۰۹	۰/۳۹	۵۰۲/۰۰	۵۴۰/۰۰	۱/۷۰	۴/۴۰
۲۶	۰/۱۳	۰/۱۶	۶۵۴/۰۰	۶۲۰/۰۰	۲۵/۶۷	۴/۴۰
۲۷	۰/۳۳	۰/۱۵	۲۳۸/۰۰	۵۴۰/۰۰	۲۷/۰۰	۳/۴۰
۲۸	۰/۰۳	۰/۱۴	۱۳۳/۰۰	۷۰۰/۰۰	۴/۹۰	۳/۲۰
۲۹	۰/۷۵	۰/۱۱	۱۳۰/۰۰	۱۰۰۰/۰۰	۹/۰۰	۴/۴۰
۳۰	۰/۱۳	۰/۱۷	۱۵۴/۰۰	۱۲۸۰/۰۰	۱/۱۰	۳/۲۰

مقادیر میانگین برای متغیرهای مورد بررسی در وضعیت‌های مدیریت خوب و مدیریت بد طبق جدول ۵ مقایسه شد که نشان داد متغیرهای فسفر و پتاسیم خاک تفاوت معنی‌داری را در عرصه‌های مرتعی داشته و تنها پارامتر نیتروژن

خاک در رویشگاه‌های مورد بررسی دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشند. این نتیجه با نتایج مطالعات Yousefi (2012) در تناقض است.

جدول ۵. مقایسه آماری مراتع مورد بررسی از لحاظ عناصر غذایی خاک

Table 5. Statistical Comparison of the Studied Rangelands in Terms of Soil Nutrient Elements

متغیر	مراتع با مدیریت خوب	مراتع با مدیریت بد	مقدار t	P
P	۰/۷۹۱±۰/۶۲	۰/۵۳±۰/۳۷	۱/۹۸۸*	۰/۰۴
K	۳۲۲±۲۰۲/۱۱	۶۲۳±۲۵۶/۲۳	-۵/۱۰۶**	۰/۰۰۰
N	۲/۷۵±۰/۳۹	۲/۷۸±۰/۱۱	-۰/۳۲۴ns	۰/۷۴

*: تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد، ns: فاقد تفاوت معنی‌دار

میانگین متغیرهای تغذیه‌ای خاک در وضعیت‌های مدیریت خوب و مدیریت بد مقایسه شد که در جدول ۶ نشان داده شده است متغیر فسفر در سطح معنی‌دار ۵ درصد و پتاسیم خاک در سطح معنی‌دار ۱ درصد اختلاف معنی‌داری را در عرصه‌ها داشته و تنها متغیر نیتروژن خاک در رویشگاه‌ها اختلاف آماری معنی‌داری را از خود نشان نداده است.

های فیزیکی خاک جدول ۶. مقایسه آماری مراتع از لحاظ پارامتر

Table 6. Statistical comparison of rangelands in terms of physical soil parameters

متغیر	مراتع با مدیریت خوب	مراتع با مدیریت بد	مقدار t	P
رس (%)	۲۸/۵۱±۱/۷۴	۲۳/۶۶±۱۱/۳۶	۲/۳۴۸*	۰/۰۲۲
شن (%)	۲۸/۸۷±۴/۳۲	۲۵±۱۰/۰۸	۱/۹۵ns	۰/۰۵
سیلت (%)	۴۲/۶۱±۴/۲۴	۵۱/۵۳±۱۰/۳۷	-۴/۴۲**	۰/۰۰۰
رطوبت اشباع (%)	۴۸/۲۵±۹/۰۰	۵۱/۵۰±۷/۵۴	-۱/۵۲۱ns	۰/۱۳۴

*: اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد، ns: فاقد اختلاف (اثر) معنی‌دار

جدول ۷. مقایسه آماری مراتع از لحاظ پارامترهای شیمیایی خاک

Table 7. Statistical comparison of rangelands in terms of soil chemical parameters

متغیر	مراتع با مدیریت خوب	مراتع با مدیریت بد	مقدار t	P
EC	۰/۹۰۷±۰/۱۶	۰/۷۳±۰/۳۰۱	**۲/۸۱	۰/۰۰۷
pH	۷/۱۶±۰/۵۱	۷/۵۶±۰/۵۰	**۳/۰۷	۰/۰۰۳
TNV	۸/۷۰±۲/۹۳	۶/۴۷±۴/۳۶	*۲/۳۵	۰/۰۲

*: اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد، ns: فاقد اختلاف (اثر) معنی‌دار

بر اساس نتایج حاصل‌شده در جداول ۶ و ۷، متغیرهای فیزیکی درصد شن و درصد رطوبت اشباع خاک در مراتع با وضعیت‌های مدیریتی خوب و بد تفاوت آماری معنی‌داری ندارند. این در حالی است که درصد رس در خاک این مراتع در سطح احتمال ۹۵ درصد و درصد سیلت در سطح ۹۹ درصد دارای اختلاف است. این تفاوت در ارتباط با پارامترهای اسیدیته و pH خاک در سطح احتمال ۹۹ درصد و در مورد مواد خنثی‌شونده در سطح ۹۵ درصد است. میانگین عددی درصد شن در مراتع با مدیریت خوب بالاتر از مراتع با مدیریت بد و فرسایش‌یافته بوده و این ارتباط در مورد درصد رطوبت اشباع برعکس است. Ghanbarian Alavijeh & Liaghat (2011) نیز در مطالعات خود عنوان کرده‌اند که با افزایش درصد ذرات شن، مقدار رطوبت اشباع خاک کاهش می‌یابد.

برآورد ارزش سرمایه‌ای مرتع از محل عناصر غذایی خاک

با برآورد هزینه‌های مورد نیاز برای جایگزینی مقادیر عناصر غذایی (N,P,K) از دست رفته خاک، برآورد ارزش اقتصادی خاک در اکوسیستم‌های مرتعی انجام شد.

مقادیر ارزش اقتصادی هدررفت عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم با بکارگیری تکنیک هزینه جایگزینی به ازای هر هکتار محاسبه شد که نتایج در جدول ۱۲ و ۱۳ آمده است. با محاسبه اختلاف مقادیر عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم در وضعیت‌های مدیریت خوب و مدیریت بد، مقدار اتلاف این سه عنصر غذایی برآورد شد. با لحاظ قیمت‌های بازاری عناصر فسفر، نیتروژن و پتاسیم (P_N , P_K , P_P) تحت عنوان قیمت بازاری کودهای مکمل مربوط به عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم و نیز میزان تنزیل اجتماعی (r) (نرخ تنزیل ۱۰ درصد لحاظ شد)، ارزش خاک فرسایش‌یافته (B_T) در فاصله زمانی ۰ تا ∞ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$B_T = \int_{t=0}^{\infty} \frac{(P_N D_{P_N} + P_K D_{K_N} + P_P D_{P_N})}{(1+r)^n} \quad \text{رابطه ۲}$$

میزان تولید رسوب با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Refahi, 2000):

* میزان فرسایش = تولید رسوب SDR

در این فرمول میزان فرسایش، از اختلاف فرسایش در اراضی دیم زارهای رهاشده یا مراتع تخریب شده و فرسایش در اراضی مرتعی خوب بدست می‌آید (جدول ۱). نسبت تحویل رسوب (SDR)، نشان دهنده نسبت میزان رسوب حمل‌شده از حوضه به میزان فرسایش بوده و براساس مساحت حوزه و بافت خاک و با استفاده از نمودارهای مربوطه (Refahi, 2000) و یا براساس مساحت حوزه قابل محاسبه است. (Bakhtiari, 2007)، جداگانه در مطالعاتی ارزش اقتصادی فرسایش خاک را، براساس خاک فرسایش‌یافته و محتوای عناصر غذایی آن و با توجه به قیمت بازاری این عناصر در دو کاربری کشاورزی و مرتع در شمال شرق ترکیه و جنگل‌های منطقه سبز کوه، مطالعه کردند.

جدول ۱۲. مقدار از دست رفتگی عناصر غذایی در منطقه

Table 12. Nutrient loss in the region

میانگین عناصر در مراتع با مدیریت بد			میانگین عناصر در مراتع با مدیریت خوب			اختلاف مراتع با مدیریت خوب و بد			مساحت (هزار هکتار)	هدر رفت ماده غذایی		
P	K	N	P	K	N	P	K	N		P	K	N
۰/۵۳	۲۲۶/۲۳	۲/۷۸	۰/۷۹	۲۶۳/۲۲	۲/۷۵	-۰/۲۶	۰/۰۳	۰/۰۳	۱۱۵	-	۳۴۵۰	۳۴۵۰

- عدم تفاوت معنی‌دار

جدول ۱۳. ارزش عناصر غذایی از دست رفته در اثر فرسایش

Table 13. Nutritional Value Lost Due to Erosion

مساحت منطقه کاری (هکتار)	مجموع عناصر غذایی هدررفته	قیمت عناصر غذایی هدررفته به ازای هکتار (ریال)	قیمت عناصر غذایی هدررفته به ازای کل مساحت منطقه (ریال)
۱۱۵۰۰۰	۶۹۰۰	۴۴۹۱۹۰۰۰	۵۱۶۵۶۸۵۰۰۰۰۰۰

نتیجه‌گیری

تجزیه و تحلیل آماری به‌منظور مقایسه مقادیر عناصر غذایی مورد نظر در وضعیت‌های مدیریتی خوب و بد با استفاده از آزمون t بین متغیرها انجام و همچنین آنالیز رگرسیون لجستیک به منظور تعیین تابع احتمال آسیب به مرتع انجام شد که در نهایت برآورد ارزش سرمایه‌ای مرتع از محل حفظ عناصر غذایی خاک انجام گرفت.

نتایج بدست‌آمده از آزمون t مستقل و تحلیل تفاوت میانگین مقادیر (N, K, P) در وضعیت‌های مدیریتی خوب و بد، حاکی از معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌های مقادیر عناصر غذایی فسفر و پتاسیم به ترتیب در سطوح ۹۵ درصد و ۹۹ درصد است که نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار هدر رفت عناصر غذایی مذکور در اثر فرسایش خاک است که خود از وجود یا نبود پوشش گیاهی به‌ویژه پوشش مرتعی تأثیر می‌پذیرد. مقدار میانگین عناصر فسفر و پتاسیم در وضعیت مدیریتی خوب به مراتب بالاتر از وضعیت مدیریتی بد بدست‌آمد. این در حالی است که مقدار نیتروژن در اثر تغییر وضعیت مدیریتی در مرتع، تفاوت معنی‌داری را از خود نشان نداد. میزان این عنصر در مراتع با مدیریت خوب کمتر از مراتع با مدیریت بد بدست‌آمد. میزان پتاسیم خاک در دو وضعیت مدیریتی مختلف اختلاف معنی‌داری را از خود نشان داد و در وضعیت مدیریتی خوب از میزان بالاتری برخوردار بود. بررسی خصوصیات فیزیکی خاک نشان از اختلاف معنی‌دار بین میزان رس و سیلت در دو وضعیت مدیریتی دارد.

براساس نتایج حاصله در تحقیق حاضر با توجه به وسعت منطقه مورد مطالعه که حدود ۱۱۵ هزار هکتار است، مقدار فرسایش حدود ۱۴/۷ تن بر هکتار در سال براساس مطالعات فرسایش و رسوب منطقه مورد مطالعه گزارش شده، که در مقایسه با استاندارد جهانی که ۵ تن در هکتار می‌باشد حدود سه برابر می‌باشد. این موضوع از سویی منعکس‌کننده روند تخریب خاک، منابع طبیعی و محیط‌زیست در این منطقه به واسطه تخریب پوشش گیاهی و فرسایش خاک است و از سوی دیگر، نشان‌دهنده لزوم حفاظت و احیای پوشش گیاهی در این منطقه و حفظ خاک به عنوان بستر تولید است. با اتکا به این اطلاعات و با انجام تجزیه و تحلیل آماری بر روی مقادیر عناصر غذایی بدست‌آمده از نمونه‌برداری‌های برداشت‌شده از مراتع منطقه مورد مطالعه (جدول ۴)، طبق نتایج ارزش سرمایه‌ای مرتع از محل عناصر غذایی خاک به ازای کل مساحت منطقه ۵۱۶۵۶۸۵۰۰۰۰ ریال برآورد شد.

References

- Aghili Kohnehsahri, L., & Sadeghi, H. (2004). Estimation of the economic impacts of soil erosion in Iran. *Journal of Economic Research*, 15 (3), 21–32. (In Persian)
- Ahmed, P. (2009). Integrating ethics in finance curriculum. *Independent Business Review*, 2 (2), 21–34.
- Andreasen, C., & Skovgaard, M. (2009). Crop and soil factors of importance for the distribution of plant species on arable fields in Denmark. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 133 (1–2), 61–67. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.05.003>
- Bakhtiari, F. (2007). Economic valuation of forest soil in the Zagros forests of the Sabzkoh Protected Area (Master's thesis, University of Tehran). (In Persian)
- Bennett, H. H. (1933). The cost of soil erosion. *Journal of the Ohio Society*, 33, 271–279.
- Eskandari, N., Alizadeh, A., & Mahdavi, F. (2008). Rangeland management policies in Iran. Pooneh Publications. (In Persian)
- Ghanbarian Alavijeh, B. and Liaghat, A. (2011). Evaluation of Pedotransfer Functions and Effect of Organic Matter in Prediction of Soil Saturated Water Content. *Water and Soil*, 25(5), 1016–1024. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i--.11212>
- Ghoddousi, J. (2007). Watershed management (Course notes). Tarbiat Modares University. (In Persian)
- Gulati, A., & Rai, S. C. (2014). Cost estimation of soil erosion and nutrient loss from a watershed of the Chotanagpur Plateau, India. *Current Science*, 106 (10), 1390–1396. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:91104314>

- Jafari, M., Nasrollahi, A., Sarmadian, F., & Azarnivand, H. (1999). Investigation of soil physicochemical properties and vegetation to identify indicator plant species in Vardavard, Karaj. *Journal of Environmental Studies*, 25(23), 40–48. (In Persian)
- Keyvan Behjou, F., Hashemian, A., Panahi, M., & Hassanzadeh, A. (2016). Economic valuation of soil nutrients in the Shimbar Protected Area using the replacement cost method. *Journal of Watershed Management Research*, 14(1), 1–8. (In Persian)
- Mousavi, S. A., Arzani, H., Sharzaei, G. A., Azarnivand, H., Farahpour, M., Engel, A., Alizadeh, A., & Nazari Samani, A. A. (2014). Economic valuation of the role of rangeland vegetation in soil conservation: A case study of the Central Taleghan watershed. *Rangeland and Watershed Management*, 67(2), 317–331. (In Persian)
- Noor, F., Nasri, M., Yeganeh, H., Moghimi Nejad, F., Ghasemi Aryan, Y., & Bani Neameh, J. (2013). Estimation of the economic losses caused by soil erosion in rangelands using the nutrient replacement cost method (NRCM). *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research*, 20(3), 522–530. (In Persian)
- Panahi, M. (2005). Economic valuation of Hyrcanian forests: Case studies of three forest management districts in Mazandaran Wood and Paper Company, Kheyroud Forest, and Guilan Wood and Paper Company (Doctoral dissertation). (In Persian)
- Rastgar, S., Barani, H., Darijani, A., Vahedbardi, S., Ghorbani, J., & Ghorbani, M. (2015). Estimation of the direct economic value of the soil conservation function of rangeland vegetation: A case study of the summer rangelands of the Noorroud watershed. *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research*, 20(3), 522–530. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jwmr.7.13.262>
- Refahi, H. (2000). Water erosion and its control. University of Tehran Press. (In Persian)
- Rife, T. L. (2010). A study on modeling the value of ecosystem services: Application to soil loss in southeastern Allegheny County (Master's thesis, Youngstown State University).
- Rezai, A.M., Mirmohammadi Meibodi, S.A.M. (2005). Statistics and Probability. University of Isfahan Press. (In Persian)
- Yousefi, A. (2012). Effects of deforestation and rangeland grazing on soil. *Journal of Forest and Rangeland Science*, 9(14), 2–7. (In Persian)

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



مجله 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
<u>Performance Evaluation of Chlor-Alkali Process Waste in Marl Soil Stabilization with Emphasis on Unconfined Compressive Strength</u>	1-18
Reza Mohammadzadeh, Mehran Moallemi, Alireza Dashti Rahmatabadib / 10.22034/jsesm.2026.252680	
<u>Spatiotemporal Analysis of Traffic-Related Pollutants at a Micro-Scale Using Stacked Ensemble Learning(A Case Study of Mahalati Highway)</u>	19-39
Nastaran Marzban Panah Maklavani / 10.22034/jsesm.2026.252609	
<u>Assessment of the Cumulative Impacts of Desalination Brine Discharge on Marine Ecosystems</u>	40-53
Masoud Sadrinassab, Neda Toraby / 10.22034/jsesm.2026.252693	
<u>Analysis of Neighborhood Livability Levels in Tehran District 12 within the Framework of Sustainable Urban Development</u>	54-69
Majid Karimpourreihan, shahrzad sharifjahed / 10.22034/jsesm.2026.252684	
<u>Performance Evaluation of the MIDREX Gas Processing System for Reducing Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions in the Steel Industry</u>	70-87
Mina yazdani, bahdor abolpor, Hanie Abbaslou / 10.22034/jsesm.2026.252687	
<u>Sustainable Landscape Design of the Karaj–Qazvin Freeway for Enhancing Safety and Maintaining Habitat Connectivity</u>	88-108
Mahdi Khansefid, zeinab ansari jaberi, saba arasteh / 10.22034/jsesm.2026.252692	
<u>Assessment and Selection of an Appropriate Oil Spill Response Method in Gulf of Oman</u>	109-120
Saeed karimi, Ehsan Talebi, Mahnaz Jadidi / 10.22034/jsesm.2026.252691	
<u>Economic Valuation of the Role of Rangeland Ecosystems in Soil Nutrient Conservation</u>	121-134
Farshad Keivan Behjou / 10.22034/jsesm.2026.252689	

18	Yaser Moareb	Assistant Professor, Imam Hossein University
19	Azadeh Mohajer Milani	Assistant Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
20	Naser Mehrdadi	Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
21	Kamaleddin Naseri	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
22	Gholamreza Nabi-Bidhendi	Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
23	Mahmoudreza Hemami	Professor, Isfahan University of Technology
24	Sohrab Alvaninejad	Associate Professor, Yasouj University
25	Mohammad Yazdi	Professor, Institute for Environmental Sciences, Shahid Beheshti University

List of Esteemed Journal Reviewers

(in alphabetical order)

No.	Full Name	Institutional Affiliation
1	Jahangbakhsh Balist	Assistant Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
2	Abbas Banaj Shafiei	Professor, University of Urmia
3	Puyan Boroumand	Assistant Professor, Shiraz University
4	Maryam Pazouki	Assistant Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
5	Alireza Pardakhti	Associate Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
6	Zabihollah Chaharrahayi	Assistant Professor, Faculty of Geography, University of Tehran
7	Mohammad-Mahdi Hosseinzadeh	Associate Professor, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University
8	Seyed Mohsen Hosseini	Professor, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University
9	Hassan Darabi	Associate Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
10	Lobat Zebardast	Associate Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
11	Vahid Zamani	Assistant Professor, University of Kurdistan
12	Rodabeh Samiei Zafarghandi	Assistant Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
13	Masoud Sadri-Nasab	Associate Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
14	Morteza Ghobadi	Associate Professor, Lorestan University
15	Abdolreza Karbasi	Professor, Faculty of Environment, University of Tehran
16	Houman Liaqat	Professor, Institute for Environmental Sciences, Shahid Beheshti University
17	Mohammad Meshari	Assistant 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.

Naghi Shabanian, PhD — Associate Professor, University of Guilan
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: Peyman Heidari, 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



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
Kamaleddin 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



**In the Name of God, the Most Compassionate, the Most
Merciful**

**Strategies in Engineering Sciences and
Sustainable Systems Management
(*Scientific Journal*)**

Volume 2, Issue 1, Spring 2025–2026



ENGINEERING SCIENCES STRATEGIES AND SUSTAINABLE SYSTEMS MANAGEMENT

Vol. 2 | No. 1 | Spring 2026

In This Issue

- Performance Evaluation of Chlor-Alkali Process Waste in Marl Soil Stabilization with Emphasis on Unconfined Compressive Strength
- Spatiotemporal Analysis of Traffic-Related Pollutants at a Micro-Scale Using Stacked Ensemble Learning(A Case Study of Mahalati Highway)
- Assessment of the Cumulative Impacts of Desalination Brine Discharge on Marine Ecosystems
Masoud Sadrinassab, Neda Toraby
- within the Framework of Sustainable Urban Development- 12 Analysis of Neighborhood Livability Levels in Tehran District
- Performance Evaluation of the MIDREX Gas Processing System for Reducing Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions in the Steel Industry
- Sustainable Landscape Design of the Karaj–Qazvin Freeway for Enhancing Safety and Maintaining Habitat Connectivity
- Assessment and Selection of an Appropriate Oil Spill Response Method in Gulf of Oman
- Economic Valuation of the Role of Rangeland Ecosystems in Soil Nutrient Conservation



**Iranian Solid
Waste Association**