



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره ۱، شماره ۴، پیاپی ۴
زمستان ۱۴۰۳، صفحات ۱۵-۱

"مقاله پژوهشی"

ارزیابی چالش‌های زیست محیطی در ایران در سال ۲۰۲۴ بر مبنای شاخص عملکرد زیست محیطی (EPI)

محمد مسافری^۱، زیبا بهشتی^{۲*}، ندا گیلانی^۳، سپیده نعمتی منصور^۴

^۱ مرکز تحقیقات سلامت و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

^۲ دانش آموخته دکترای تخصصی ارزیابی و آمایش سرزمین-محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۳ گروه آمار و اپیدمیولوژی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

^۴ کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: zibabeheshti64@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳)

چکیده

شاخص عملکرد زیست محیطی (EPI) ابزاری برای ارزیابی عملکرد کشورهای مختلف در زمینه محیط زیست است که شامل معیارها و داده‌هایی برای بررسی وضعیت محیط زیست و تأثیرات انسانی بر آن است. تحقیق حاضر به بررسی وضعیت EPI در ایران بر اساس آخرین نتایج سال ۲۰۲۴ پرداخته و نظرات خبرگان حوزه سلامت محیط زیست را در خصوص چالش‌های زیست محیطی کشور بررسی و ارائه می‌دهد. بر اساس نتایج، رتبه کلی ایران در بین ۱۸۰ کشور معادل ۱۱۳ و در منطقه خاورمیانه رتبه ۱۰ را دارد. در حوزه سلامت محیط زیست، آلودگی هوا، آلودگی محیط زیست به پسماند، آلودگی محیط زیست به آفت‌کش‌ها، کمبود آب در کشور، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، و نهایتاً عدم توجه به پایداری محیط زیست مواردی هستند که ذهن خبرگان را به شدت نگران نموده و به عنوان اولویت درجه یک مسائل زیست محیطی کشور مطرح هستند. همچنین از دیدگاه متخصصین، آلودگی هوا، آلودگی ناشی از پسماند، آفت‌کش‌ها، کمبود آب و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی به عنوان مهم‌ترین چالش‌ها مطرح هستند. بیش‌ترین نگرانی‌ها مربوط به حیطه هوا و اقلیم است. تقویت سیاست‌های زیست محیطی، شامل ایجاد قوانین مؤثر و توسعه برنامه‌های ملی، می‌تواند به بهبود شرایط محیط زیستی و EPI در کشور کمک کند.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی چالش‌های زیست محیطی، شاخص عملکرد زیست محیطی، بهداشت محیط، ایران

مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل روز جهان، مساله محیط زیست است؛ فاجعه محیط زیستی نه تنها آرامش و امنیت را از زندگی انسان می‌رباید بلکه موجودیت بشر را نیز تهدید می‌کند. بنابراین در محافل علمی و سیاسی بحث‌های محیط زیستی پُرسر و صداترین و جدی‌ترین بحث‌های روز هستند (۱). بر اساس شواهد موجود سیستم‌های حیاتی پشتیبان کره‌زمین که بشریت به آن‌ها وابسته است، در حال تخریب‌اند. وابستگی اقتصادی به سوخت‌های فسیلی منجر به آلودگی مداوم هوا و آب، اسیدی شدن اقیانوس‌ها و افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو می‌شود (۲). این تغییرات، بقای گونه‌هایی را تهدید می‌کند که به شدت از دست رفتن گستره زیستگاه خود رنج می‌برند و این امر آن‌ها را به سوی انقراض نزدیک‌تر می‌سازد. در مواجهه با این بحران‌های متراکم، اتخاذ یک رویکرد تجربی و مبتنی بر داده در سیاست‌گذاری زیست محیطی از همیشه ضروری‌تر است. شاخص‌های به دقت طراحی شده به سیاست‌گذاران و سایر ذینفعان این امکان را می‌دهند که روندها را رصد کرده، مداخلات موفق را شناسایی کنند، بهترین شیوه‌ها را به اشتراک بگذارند و بازده سرمایه‌گذاری‌های زیست محیطی را به حداکثر برسانند (۳). یکی از شاخص‌های بسیار مهم که وضعیت محیط زیست کشورها را نشان می‌دهد شاخص عملکرد محیط زیست (EPI)^۱ است (۴). شاخص عملکرد محیط زیست، شاخصی است که بر اساس مطالعه ۲۲ شاخص محیط زیستی، از جمله منابع

آب، آلودگی هوا، تنوع زیستی و تغییرات آب و هوایی تعیین و هر ساله توسط دانشگاه ییل اعلام می‌شود (۵). این شاخص عملکرد سیاست‌ها و برنامه‌های کشورها در زمینه کاهش معضلات محیط زیستی، حفاظت از محیط زیست و مدیریت منابع طبیعی را مورد سنجش و ارزیابی کمی قرار می‌دهد (۶). بنابراین، بررسی این شاخص و متغیرهای تبیین کننده آن می‌تواند گام بزرگی در رسیدن به اهداف توسعه پایدار باشد. آمارها نشان می‌دهد که آب‌های زیرزمینی، گونه‌هایی همچون رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و حتی اقیانوس‌ها آلوده شده‌اند و سیستم اکولوژیک آن‌ها در حال تغییر است (۷و۸). شاخص عملکرد محیط زیست از این جهت که تعامل بین زیر ابعاد محیط زیست را مورد بررسی قرار می‌دهد حائز اهمیت است. شناخت درست وضعیت محیط زیست برای تعیین تغییرات لازم در نحوه مدیریت و ارئه برنامه‌های مدیریتی نقشی مهم دارد (۹). به همین دلیل است که شاخص‌های متعددی برای نظارت بر فرآیند تخریب محیط زیست از سوی سازمان ملل متحد و دانشگاه‌های مختلف مطرح گردیده است که می‌توان به شاخص توسعه محیط زیست^۲ (۱۰)، شاخص آسیب پذیری محیط زیست^۳ (۱۱)، شاخص پایداری و رفاه اقتصادی^۴ (۱۲)، تولید خالص ملی سبز، ردپای اکولوژیکی^۵ و پس‌انداز خالص تعدیل شده^۶ (۱۳) اشاره کرد.

شاخص عملکرد محیط زیست، به‌عنوان یک عامل کمی در کنترل آلودگی‌ها و پیامدهای مدیریت منابع طبیعی، ابزار قدرتمندی جهت تصمیم‌گیری‌های محیط

^۲ Environmental Development Index^۳ Environmental Vulnerability Index^۴ Index of Sustainable Economic^۵ Ecological footprint^۶ Adjusted Net Savings^۱ Environmental Performance Index

زیستی برای مؤسسات تحلیلی فراهم می‌کند (۱۴). EPI نمراتی را برای چندین دسته اصلی سیاست زیست محیطی شناسایی می‌کند و می‌سنجد که کشورهای مختلف چگونه به این اهداف نزدیک می‌شوند. این شاخص به‌عنوان یک شاخص ترکیبی ساخته شده است که بر اساس شانزده شاخص کاملاً تجمیع‌شده که به‌طور متفاوتی وزن‌دهی شده‌اند و در برابر اهداف مطلق ارزیابی می‌شوند، طراحی شده است. علاوه بر انتشار شاخص ترکیبی و نمرات کشورهای فردی، یک رتبه‌بندی مقایسه‌ای کشورها نیز منتشر می‌شود (۱۵). شاخص عملکرد زیست محیطی به‌طور رسمی در سال ۲۰۰۲ توسط دانشگاه ییل و دانشگاه کلمبیا معرفی شد. هدف اصلی شاخص عملکرد زیست محیطی بهبود پایه داده‌های تجربی برای اقدامات حفاظت از محیط زیست در بلند مدت و تسهیل ارزیابی‌های تحلیلی به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است. نویسندگان شاخص عملکرد زیست محیطی به‌طور بسیار آگاهانه این شاخص را به‌عنوان یک شاخص سیاسی طراحی کرده‌اند که هدف آن تحریک یک بحث بین‌المللی در مورد روش‌ها و متدولوژی‌های تحلیلی صحیح و نحوه اندازه‌گیری عملکرد زیست محیطی کشورها به‌صورت کمی و بین‌کشوری است (۱۶). علاوه بر این، نویسندگان تلاش می‌کنند توجه را به پایه داده‌های بین‌المللی ناکافی برای بسیاری از مواد و مشکلات زیست محیطی جلب کنند و ضرورت بهبود جمع‌آوری داده‌های آماری و شاخص‌ها را برجسته کنند (۱۷). EPI به کشورها کمک می‌کند تا نقاط قوت و ضعف خود را در زمینه‌های مختلف مانند کیفیت آب، کیفیت هوا، تغییرات اقلیمی و حفاظت از تنوع زیستی شناسایی

کنند. با گذشت زمان، استفاده از EPI به‌عنوان یک ابزار ارزیابی در سطح جهانی گسترش یافته است. بسیاری از کشورها و شهرها از این شاخص برای شناسایی نقاط قوت و ضعف خود در زمینه‌های زیست محیطی استفاده می‌کنند. همچنین، سازمان‌های بین‌المللی و غیردولتی نیز از EPI به‌عنوان یک معیار برای ارزیابی عملکرد زیست محیطی کشورها استفاده می‌کنند.

استفاده از شاخص عملکرد محیط زیست در شهرها می‌تواند به بهبود کیفیت زندگی شهروندان و کاهش اثرات منفی زیست محیطی کمک کند (۱۸). با تجزیه و تحلیل داده‌های EPI، شهرها می‌توانند سیاست‌ها و برنامه‌های بهینه‌سازی را طراحی کنند. به‌عنوان مثال، اگر یک شهر در زمینه کیفیت هوا نمره پایینی دریافت کند، می‌تواند اقداماتی مانند کاهش ترافیک، گسترش حمل‌ونقل عمومی و افزایش فضای سبز را در دستور کار قرار دهد (۱۹).

مزایای به‌کارگیری EPI در شهرها شامل ارتقای آگاهی عمومی، بهبود همکاری میان نهادهای دولتی و غیردولتی، و تشویق به سرمایه‌گذاری در پروژه‌های پایدار است. این شاخص همچنین می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای مقایسه عملکرد زیست محیطی میان شهرها و شناسایی بهترین شیوه‌ها عمل نماید. در نهایت، بهره‌گیری از EPI می‌تواند به تسهیل فرایندهای تصمیم‌گیری و تخصیص منابع به سمت پروژه‌های زیست محیطی مؤثرتر کمک کند.

مطالعه حاضر با هدف تحلیل شاخص عملکرد محیط زیست ایران در سال ۲۰۲۴ همراه با نظرسنجی از اساتید متخصص در حوزه سلامت محیط زیست در مورد چالش‌های زیست محیطی ایران به انجام رسید.

روش تحقیق

- گردآوری داده‌ها در مورد EPI

مطالعه حاضر نوعی تحقیق توصیفی و کیفی است و در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول، برای تحلیل وضعیت EPI در ایران، از آخرین گزارش منتشر شده در این زمینه بهره گرفته شد. شاخص عملکرد زیست محیطی ۲۰۲۴ با استفاده از جدیدترین مجموعه داده‌ها، علم و فناوری به منظور ارائه جامع‌ترین ارزیابی از وضعیت پایداری در سطح جهانی طراحی شده است. این شاخص شامل ۵۸ معیار مختلف است که ۱۸۰ کشور را بر اساس پیشرفت آن‌ها در زمینه‌های کاهش تغییرات اقلیمی، حفاظت از اکوسیستم‌ها و ترویج سلامت محیط زیست رتبه‌بندی می‌کند. این مجموعه وسیع از شاخص‌ها به عنوان ابزاری کارآمد برای پیگیری پیشرفت به سوی اهداف توسعه پایدار سازمان ملل، اهداف کاهش تغییرات اقلیمی مندرج در توافق‌نامه پاریس ۲۰۱۵، و اهداف حفاظت از تنوع زیستی در چارچوب جهانی تنوع زیستی کونمینگ - مونترال عمل می‌کند. بررسی جزئیات فراتر از نمرات کلی - بررسی دسته‌های فردی، شاخص‌ها و مقایسه‌های هم‌تایان - درک دقیق‌تری از روندها و عوامل مؤثر بر عملکرد زیست محیطی ارائه می‌دهد.

- **نظرسنجی از متخصصین حوزه سلامت محیط زیست**
به منظور جمع‌آوری نظرات خبرگان در حوزه سلامت محیط زیست، از چک‌لیستی تحت عنوان "چک‌لیست ارزیابی نظرات متخصصین حوزه سلامت محیط زیست" (محیط زیست، بهداشت محیط، آمار و اپیدمیولوژی و اقتصاد) در خصوص آخرین وضعیت پارامترهای محیط زیست کشور استفاده شد. لازم به ذکر است در مطالعات کیفی با اهداف تحلیلی-

تخصصی، نمونه‌های محدود اما متمرکز (مانند ۱۷ متخصص این تحقیق) به جای نمونه‌های بزرگ اما سطحی، اعتبار و عمق بیشتری به نتایج می‌بخشند. این چک‌لیست شامل ۳۲ عبارت مرتبط با مسائل زیست محیطی کشور است. از اعضای پانل تخصصی که متشکل از ۱۷ نفر از اساتید برجسته از سراسر کشور بود خواسته شد تا ابتدا میزان موافقت خود را با هر عبارت درج شده در ردیف‌های چک‌لیست، با استفاده از طیف پنج‌تایی لیکرت و عبارات "کاملاً مخالف"، "مخالف"، "بی‌نظر"، "موافق" و "کاملاً موافق" مشخص نمایند.

در ستون دوم، پاسخ‌دهندگان میزان تأثیر هر پارامتر زیست محیطی بر سلامت جامعه را با درج نمره‌ای در طیف ۱ تا ۱۰ مشخص کردند، به‌طوری‌که نمره ۱ نمایانگر کمترین تأثیر و نمره ۱۰ نشان‌دهنده بیش‌ترین تأثیر آن پارامتر بر سلامت است. در ستون بعدی چک‌لیست، از افراد پاسخگو خواسته شد تا سطح نگرانی خود را در خصوص وضعیت هر پارامتر زیست محیطی با استفاده از طیف لیکرت و عبارات "فویاً غیر نگران"، "غیر نگران"، "خنثی"، "نگران" و "به شدت نگران" مشخص نمایند.

جهت ارزیابی روایی و پایایی آیت‌ها، پرسش‌نامه ابتدا در اختیار ۴ نفر از متخصصین حوزه سلامت محیط قرار گرفت و روایی صوری و محتوایی به صورت کیفی مورد بررسی قرار گرفت. در ارزیابی روایی صوری، هر گویه با توجه به سه گزینه تناسب و ارتباط آیت‌ها، ابهام و برداشت‌های نارسا و دشواری درک مفاهیم از منظر گروه هدف و متخصصین به صورت کیفی بررسی و بازخوردهای لازم در پرسش‌نامه اعمال گردید. همچنین، ارزیابی پایایی به

روش همسانی درونی آیت‌ها با استفاده از آلفای کرونباخ انجام شد.

پس از دریافت نظرات متخصصین در مورد روایی و پایایی پرسش‌نامه و انجام محاسبات مربوطه، این پرسش‌نامه به اعضای منتخب پانل (خبرگان حوزه سلامت محیط زیست) از طریق ایمیل ارسال گردید. پس از پیگیری‌های لازم به صورت تلفنی و ایمیل از تعدادی از متخصصین حوزه سلامت محیط زیست از مناطق مختلف کشور، نسبت به تکمیل و ارسال پرسش‌نامه اقدام نمودند. برخی از پاسخ‌دهندگان علاوه بر تکمیل پرسش‌نامه، نظراتی را در خصوص پرسش‌نامه و همچنین گزارش ارسالی ارائه نمودند که تمامی این بازخوردها در اصلاح و تکمیل گزارش مورد استفاده قرار گرفت.

پرسش‌نامه‌های تکمیل شده وارد برنامه IBM SPSS Statistics V.25 شد و تحت آنالیزهای آماری قرار گرفت. در ابتدا برای گزینه‌های میزان موافقت و میزان نگرانی، درصد فراوانی استخراج گردید. برای نمرات داده شده شاخص‌های آمار توصیفی محاسبه گردید.

در گام بعدی به منظور آنالیز آماری پیشرفته‌تر، "پارامترهای محیط زیستی" تأثیرگذار بر سلامت پس از بحث و تحلیل کارشناسی با همکاران طرح، به چهار حیطه تقسیم شد. دامنه پارامترهای محیط زیست مشتمل بر هوا و اقلیم، خاک، منابع آب و نهایتاً آلودگی و تخریب محیط زیست در نظر گرفته شد. نمرات طیف لیکرت برای میزان موافقت و میزان نگرانی از ۱

تا ۵ به ترتیب برای گزینه‌ها اختصاص یافت. نمره تأثیر بر روی سلامت جامعه نیز از ۱ تا ۱۰ قبلاً تعریف شده بود. پس از تعریف نمره‌ها بر پایه صد با استفاده از معادله ۱ و با در نظر گرفتن توزیع غیرنرمال نمرات (آزمون شاپیرو - ویلک، $p < 0.05$)، از آزمون فریدمن (Friedman Test) برای انجام مقایسه بین دامنه‌ها و تعیین تفاوت آماری و اهمیت آنها پیرو نمرات خبرگان استفاده گردید.

- آزمون شاپیرو - ویلک^۱

آزمون شاپیرو - ویلک یک روش آمار ناپارامتریک است که برای بررسی نرمال بودن داده‌ها استفاده می‌شود و کاربردی مشابه آزمون کولموگروف - اسمیرنوف دارد (۲۰). پس از بررسی عادی یا نرمال بودن چولگی و کشیدگی توزیع داده‌ها، می‌توان از این آزمون استفاده کرد. هنگام بررسی نرمال بودن داده‌ها ما فرض صفر مبتنی بر اینکه توزیع داده‌ها نرمال است را در سطح خطای ۵٪ تست می‌کنیم. بنابراین اگر آماره آزمون بزرگتر مساوی ۰/۰۵ به دست آید، در این صورت دلیلی برای رد فرض صفر مبتنی بر اینکه داده نرمال است، وجود نخواهد داشت. به عبارت دیگر توزیع داده‌ها نرمال خواهد بود. فرمول محاسبه آماره این آزمون در معادله (۱) ارایه شده است.

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)}\right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (1)$$

- آزمون فریدمن^۲

آزمون فریدمن یک آزمون آماری ناپارامتریک است که برای تشخیص تفاوت میان داده‌های مرتبط استفاده

^۱ Shapiro-Wilk test

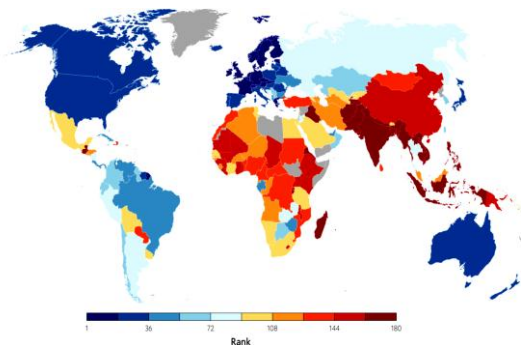
^۲ Friedman test

۲۰ خواهد بود. برای ستون اهمیت نیز حداقل و حداکثر برابر ۴ و ۴۰ خواهد بود.

نتایج و بحث

در بخش اول نتایج، وضعیت شاخص عملکرد محیط زیست در ایران بررسی و ارائه شده است. همچنین، بخش دوم، نتایج حاصل از نظرسنجی را تحلیل و ارائه می‌کند.

وضعیت EPI کشورهای مختلف در سال ۲۰۲۴ در شکل (۱) به تصویر کشیده شده و رتبه ایران در میان کشورهای خاورمیانه در جدول (۱) نمایش داده شده است تا امکان مقایسه فراهم شود. ایران در رتبه کلی ۱۱۳ از بین ۱۸۰ کشور دنیا قرار دارد (شکل (۲)) و در منطقه خاورمیانه نیز در میان کشورهای مختلف، رتبه ۱۰ را به خود اختصاص داده است. کشورهای استونی، لوکزامبورگ و آلمان به ترتیب رتبه‌های اول تا سوم را به دست آورده‌اند، درحالی‌که آمریکا در رتبه ۳۵ قرار دارد. همچنین، لائوس، پاکستان و ویتنام به ترتیب در پایین‌ترین رتبه‌ها قرار دارند.



شکل (۱): نمرات شاخص عملکرد محیط زیستی برای ۱۸۰ کشور در سال ۲۰۲۴

می‌شود. این آزمون توسط اقتصاددان و آماردان مشهور به نام میلتون فریدمن ارائه گردید (۲۰). فرمول محاسبه آماره این آزمون در معادله (۲) ارائه شده است. پژوهشگران ایرانی از این آزمون برای رتبه‌بندی اهمیت متغیرهای پژوهش استفاده می‌کنند. این آزمون معادل روش پارامتریک آنالیز واریانس دوعاملی است که در آن k تیمار به صورت تصادفی به n بلوک تخصیص داده شده‌اند.

$$F_r = \frac{12}{nk(k+1)} (T_1^2 + T_2^2 + \dots + T_k^2) - 3n(k+1) \quad (2)$$

معادله (۳) برای تعریف نمرات در مبنای ۱۰۰ استفاده شده است:

$$NS = \left(\frac{S - \min}{\max - \min} \right) * 100 \quad (3)$$

در معادله (۳) مقدار S نمره قابل اکتساب در دامنه، $\max$ و $\min$ به ترتیب نشان‌دهنده حداقل و حداکثر نمره قابل اکتساب در همان دامنه و NS نمره استاندارد شده در مقیاس صد است. برای محاسبه حداقل و حداکثر نمره کسب شده، تعداد پارامترهای دسته‌بندی شده در هر دامنه (تعداد سؤالات هر حیطه)، برای ستون‌های مربوط به میزان موافقت و میزان نگرانی (منطبق بر طیف لیکرت) به ترتیب در اعداد ۱ و ۵ ضرب می‌گردد. برای ستون اهمیت هر پارامتر نیز، تعداد پارامترهای دسته‌بندی شده در هر حیطه (تعداد سؤالات هر حیطه)، به ترتیب در اعداد ۱ و ۱۰ ضرب می‌گردد تا $\max$ و $\min$ مربوطه محاسبه گردد. به عنوان مثال اگر در یک حیطه چهار سؤال قرار گیرد مطابق با طیف پنج‌تایی لیکرت حداقل و حداکثر نمره برابر ۴ و

جدول (۱): مقایسه رتبه و نمره کشورهای خاورمیانه بر اساس شاخص EPI

رتبه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
امتیاز	۵۱/۶	۵۱/۳	۴۸	۴۷/۳	۴۶/۸	۴۵/۳	۴۴/۴	۴۳/۸	۴۲/۵	۴۱/۸	۴۱/۷	۳۹/۹	۳۹/۵	۳۹/۱	۱۵	۳۰/۳
کشور	امارات عربی	عمان	فلسطین	اردن	قطر	تونس	کویت	مصر	عربستان ایران	الجزایر	لبنان	مراکش	سودان	بحرین	عراق	

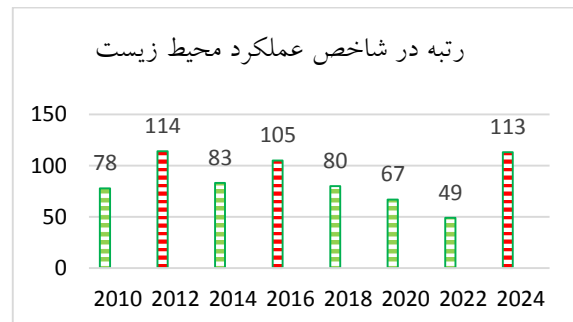
- نتایج نظرسنجی از خبرگان

بر اساس نظرسنجی‌های به‌عمل‌آمده و احصای نظرات خبرگان در مورد پارامترهای محیط زیستی و شاخص‌های بهداشت محیطی مبنی بر کاملاً موافق بودن در موضوع پارامترهای مطرح شده و نیز شدت نگرانی نسبت به آن موضوعات، نتایج حاکی از آن دارد که پارامترهای آلودگی هوا، آلودگی محیط زیست به زباله، آلودگی محیط زیست به آفت‌کش‌ها، کمبود آب در کشور، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و نهایتاً عدم توجه به پایداری محیط زیست مواردی هستند که ذهن خبرگان را به شدت نگران نموده و می‌توانند جزو چالش‌های اولیه محیط زیستی کشور مطرح گردند (شکل (۳)).

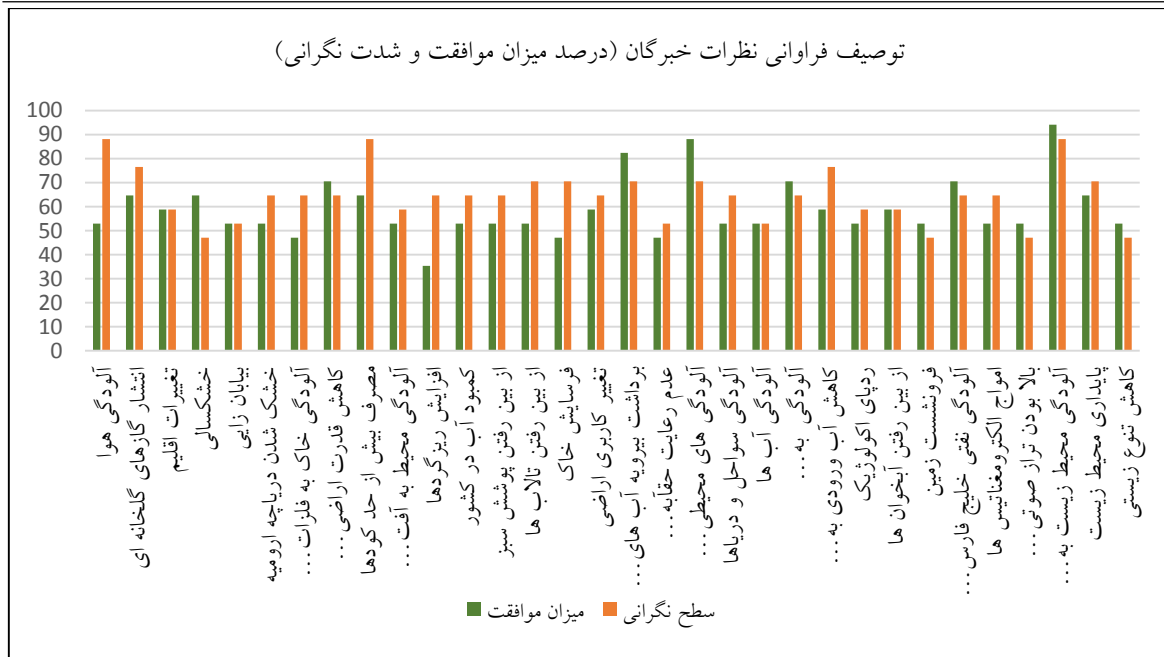
از نظر شاخص "بهداشت محیط"، ایران رتبه ۹۸ دنیا و ۱۱ خاورمیانه را دارد. کشورهای ایسلند، نروژ و فنلاند به ترتیب رتبه‌های اول تا سوم و کشورهای پاکستان و لسوتو نیز در ردیف‌های آخر قرار دارند.

از نظر شاخص "سرزندگی اکوسیستم"، رتبه ۱۱۸ دنیا و رتبه ۹ خاورمیانه به ایران اختصاص دارد. لوکزامبورگ، آلمان و لهستان در رتبه‌های اول تا سوم دنیا و کشورهای اریتره و جیبوتی در رتبه‌های آخر قرار دارند.

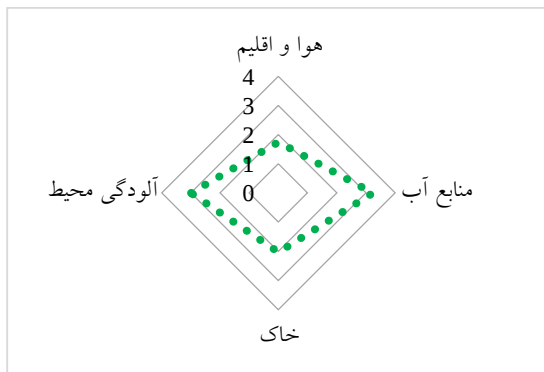
شاخص "تغییر اقلیم" به‌عنوان یک شاخص جدید در سال ۲۰۲۴ مطرح شده است. با در نظر گرفتن این شاخص ایران در رتبه ۱۳۲ دنیا و ۹ خاورمیانه جای گرفته است.



شکل (۲): رتبه ایران در شاخص عملکرد محیط زیست، ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴ (Rank)



شکل (۳): توصیف فراوانی نظرات خبرگان در خصوص "میزان موافقت" با عبارت مربوط در هر آیتم و همچنین سطح نگرانی در خصوص وضعیت پارامترهای محیط زیست



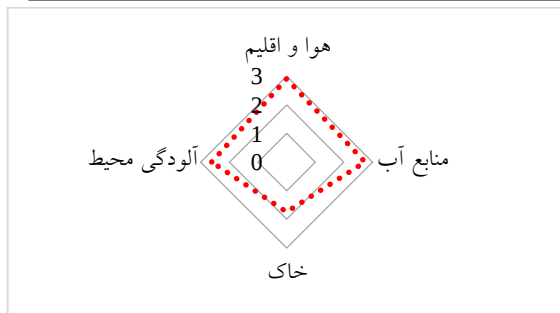
شکل (۴): نمایش اولویت دامنه‌های محیط زیستی از منظر خبرگان (میزان موافقت)

- اولویت پارامترهای محیط زیست بر اساس "میزان موافقت"

به منظور انجام تحلیل بیش‌تر آماری، ۳۲ پارامتر محیط زیستی در چهار دامنه "هوا و اقلیم"، "منابع آب"، "خاک" و "آلودگی محیط زیست" تقسیم گردید. برای مشخص نمودن اهمیت و اولویت حیطه‌ها از منظر نخبگان، و پس از نرمال‌سازی نمرات در مبنای صد، مقایسه حیطه‌های چهارگانه به عمل آمد که بر اساس نتایج آزمون فریدمن، با در نظر گرفتن "میزان موافقت"، ما بین حیطه‌های مربوط به پارامترهای محیط زیست از منظر خبرگان تفاوت معنادار آماری وجود دارد ($\chi^2(3) = 16.9, P = 0.001$). در شکل (۴) مقایسه اهمیت دامنه‌های پارامترهای محیط زیستی از نظر میزان موافقت نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود دامنه منابع آب در ابتدا و پس از آن آلودگی محیط زیست در رتبه بعدی اهمیت قرار دارد.

- اولویت پارامترهای محیط زیستی بر اساس "تأثیر در سلامت"

بر اساس نتایج آزمون فریدمن، در زمینه تأثیر بر سلامت، چهار دامنه شامل هوا و اقلیم، منابع آب، خاک و آلودگی محیط زیست، تفاوت معنادار آماری را از دیدگاه خبرگان نشان می‌دهند.



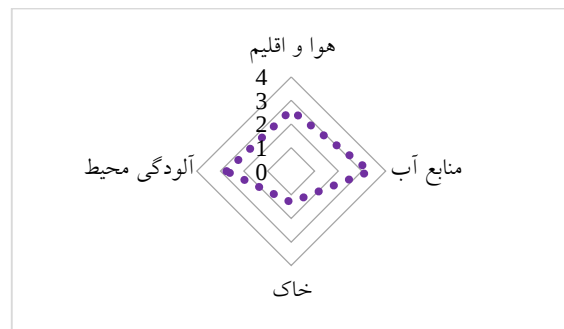
شکل (۶): نمایش اولویت دامنه پارامترهای محیط زیستی از منظر خبرگان (سطح نگرانی)

- اولویت پارامترهای محیط زیست بر اساس میانگین میزان موافقت، تأثیر بر سلامت و سطح نگرانی

در اولویت‌بندی حیطه‌های چهارگانه محیط زیستی و برای مشخص نمودن اهمیت و اولویت حیطه‌ها از منظر نخبگان، و پس از نرمال‌سازی نمرات در مبنای صد، مقایسه حیطه‌ها با در نظر گرفتن "میانگین میزان موافقت، تأثیر بر سلامت و میزان نگرانی" به عمل آمد. با در نظر گرفتن نتایج آزمون فریدمن، مابین حیطه‌های مربوط به پارامترهای محیط زیست از منظر خبرگان تفاوت معنادار آماری وجود دارد ($\chi^2(3)=32.8, P=0.001$) و حیطه آلودگی محیط زیست، بالاترین اولویت را به خود اختصاص می‌دهد. پس از آن، حیطه‌های هوا و اقلیم و خاک به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند و در نهایت، منابع آب در جایگاه پایین‌تری قرار دارد (شکل (۷)).

($\chi^2(3)=22.3, P=0.001$). در شکل (۵) مقایسه

اهمیت دامنه پارامترهای محیط زیستی از نظر میزان تأثیر بر سلامت قابل مشاهده است و همانگونه که مشخص است، دامنه منابع آب دارای بیش‌ترین تأثیر بر سلامت می‌باشد و پس از آن، آلودگی محیط زیست و هوا و اقلیم به ترتیب قرار دارند.



شکل (۵): نمایش اولویت دامنه پارامترهای محیط زیستی از منظر خبرگان (تأثیر بر سلامت)

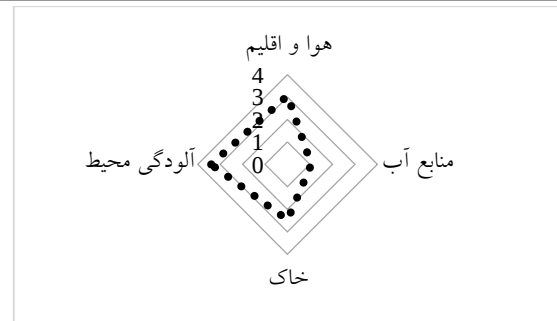
- اولویت پارامترهای محیط زیست بر اساس "سطح نگرانی" از منظر سطح نگرانی، چهار دامنه شامل هوا و اقلیم، منابع آب، خاک و آلودگی محیط زیست، بر اساس نتایج آزمون فریدمن، تفاوت معنادار آماری را در دامنه پارامترهای محیط زیست از دیدگاه خبرگان به نمایش می‌گذارند ($\chi^2(3)=8.6, P=0.035$). در شکل (۶) مقایسه اهمیت دامنه پارامترهای محیط زیستی از نظر "سطح نگرانی" نمایش داده شده است. بر اساس این شکل، بیش‌ترین نگرانی خبرگان مربوط به دامنه هوا و اقلیم بوده و منابع آب و آلودگی محیط زیست در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

گازهای گلخانه‌ای معرفی می‌کند. این شاخص‌های جدید، کشورها را بر اساس نرخ کاهش (افزایش) انتشار گازها نمره‌دهی می‌کنند و همچنین نزدیکی آن‌ها به هدف صفر خالص را در نظر می‌گیرند. پس از تغییرات اقلیمی، ازدست‌رفتن تنوع زیستی به‌عنوان جدی‌ترین و غیرقابل برگشت‌ترین بحران محیط زیستی مطرح شده است. دانشمندان هشدار می‌دهند که ممکن است ما ششمین انقراض جمعی در تاریخ کره زمین را آغاز کرده باشیم. با توجه به اینکه تنوع زیستی برای حیات اکوسیستم‌ها و خدمات حیات پشتیبانی که اکوسیستم‌ها ارائه می‌دهند، اساسی است، این بحران ثبات و تداوم رفاه انسانی را به خطر می‌اندازد.

نتیجه‌گیری

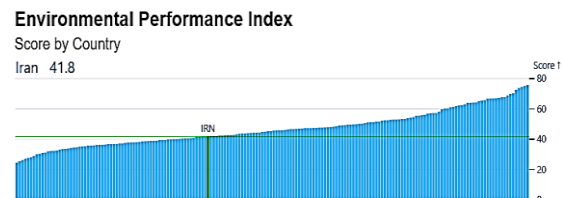
از منظر وضعیت کلی EPI، ایران در سال‌های اخیر به طور مستمر در ارزیابی‌های مربوط به این شاخص مشارکت داشته است. این ارزیابی‌ها شامل معیارهایی مانند کیفیت آب، کیفیت هوا، مدیریت پسماند و تنوع زیستی می‌شود. نتایج نشان‌دهنده چالش‌های جدی در زمینه‌های مختلف زیست محیطی و همچنین پیشرفت‌هایی در برخی حوزه‌ها بوده است.

برخی مطالعات در زمینه‌های مختلف شاخص‌ها نتایجی مشابه در عملکرد شاخص‌های محیط زیست در ایران را نشان می‌دهد؛ سعیدی‌نژاد و همکارانش در مطالعه‌ای با عنوان ارزیابی برنامه‌های توسعه سند چشم‌انداز ۱۴۰۴ ایران از منظر محیط زیستی بیان کردند که ایران در شاخص‌های محیط زیستی با چالش‌های جدی مواجه است. بر اساس EPI ۲۰۲۴، رتبه ایران ۱۳۲ از ۱۸۰ کشور است. غلظت ذرات PM2.5 به ۳۵ میکروگرم (۳/۵ برابر استاندارد جهانی)



شکل (۷): نمایش اولویت حیطه پارامترهای محیط زیستی از منظر خبرگان (میانگین موافقت، اثر و سطح نگرانی)

شکل (۸) وضعیت شاخص عملکرد محیط زیستی (EPI) را در ایران بر اساس آخرین نتایج این شاخص در سال ۲۰۲۴ ارائه می‌دهد.



شکل (۸): شاخص عملکرد محیط زیستی ۲۰۲۴ و جایگاه ایران

همچنین، این تحقیق برای نخستین بار نظرات خبرگان حوزه سلامت محیط زیست را در خصوص چالش‌های محیط زیستی در کشور مطرح می‌کند. از این رو، نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند در اتخاذ تصمیمات مدیریتی در حوزه محیط زیست مورد استفاده قرار گیرد. با وجود استقرار بی‌سابقه انرژی‌های تجدیدپذیر، انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) همچنان در حال افزایش است. ورود جهان به قلمرو اقلیمی ناشناخته، خطر عبور از نقاط عطف غیرقابل برگشت در سیستم اقلیمی کره زمین را افزایش می‌دهد. به‌منظور حمایت از اقدام مؤثرتر در زمینه تغییرات اقلیمی، EPI 2024 شاخص‌های بهبودیافته‌ای را برای پیگیری پیشرفت کشورها در کاهش انتشار

رسیده و سالانه ۴۰ هزار مرگ زودرس ایجاد می‌کند. برداشت آب ۲۰ میلیارد مترمکعب بیش از ظرفیت تجدیدپذیر است و ۸۰ درصد تالاب‌ها در معرض خشکی کامل قرار دارند. سهم انرژی‌های تجدیدپذیر تنها ۱/۲ درصد است (۲۱). مطالعه‌ای با عنوان مقایسه شاخص EPI در زمینه تغییرات آب و هوایی بین ایران و سایر کشورها در سال ۲۰۲۰ و ارتباط آن با GDP (۲۲)، نشان می‌دهد ایران با امتیاز ۴۸/۳ در رتبه ۱۱۴ از ۱۸۰ کشور قرار گرفته که پایین‌تر از میانگین جهانی (۵۶/۲) است. همسایگان ایران مانند ترکیه (رتبه ۹۹) و امارات (رتبه ۱۰۰) عملکرد بهتری داشته‌اند. بررسی ارتباط بین تولید ناخالص داخلی (GDP) و EPI نشان می‌دهد در حالی که همبستگی جهانی متوسط (۰/۶۲) وجود دارد، ایران با GDP سرانه ۵۵۰۰ دلاری عملکرد ضعیف‌تری نسبت به سطح پیش‌بینی شده دارد. این موضوع حاکی از مدیریت ناکارآمد منابع محیط زیستی در ایران است. گزارش انرژی ایران در سال ۲۰۲۴ (۲۳)، حاکی از این است که براساس گزارش EIA، ایران با ۲۰۸/۶ میلیارد بشکه نفت (رتبه ۳ جهانی) و ۳۴ تریلیون مترمکعب گاز (رتبه ۲) در ۲۰۲۴ روزانه ۳/۱۵ میلیون بشکه نفت تولید می‌کند و ۱/۴۵ میلیون بشکه صادر می‌شود. تولید گاز به ۲۶۵ میلیارد مترمکعب رسیده است. مصرف انرژی داخلی ۲/۸ برابر میانگین جهانی بوده و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر تنها ۳/۲٪ است. ایران برای توسعه بخش انرژی به ۱۵۰ میلیارد دلار سرمایه‌گذاری نیاز دارد. تحریم‌ها، راندمان ۷۸٪ پالایشگاه‌ها و فرسودگی ۶۵٪ تجهیزات از چالش‌های اصلی هستند؛ گزارش بعدی اکتبر ۲۰۲۵ منتشر می‌شود.

بر اساس این شاخص در سال ۲۰۱۰ رتبه ایران ۷۸ بود که در سال ۲۰۱۲ در میان ۱۳۲ کشور جهان با ۳۶ پله سقوط در رتبه ۱۱۴ جهان قرار گرفت. مشکلاتی مانند آلودگی هوا، کمبود آب و مدیریت ناکافی پسماندها از جمله عوامل مؤثر در این نمره بودند. این وضعیت نشان‌دهنده نیاز فوری به اقدامات اصلاحی و بهبود سیاست‌های زیست محیطی بود. در سال ۲۰۱۴ رتبه ایران بهبود یافته و برابر ۸۳ می‌شود که البته در سال ۲۰۱۶ مجدد با کاهش ۲۲ پله‌ای به ۱۰۵ رسیده است. در سال ۲۰۱۸ ایران در ردیف ۸۰ام کشورهای جهان قرار دارد و نسبت به سال ۲۰۱۶، ۲۵ پله صعود کرده است. در سال ۲۰۱۶، ایران به طور نسبی بهبودهایی در نمره EPI خود نشان داد. این بهبود به‌ویژه در زمینه مدیریت منابع آب و کاهش آلودگی هوا مشاهده شد. با این حال، هنوز چالش‌هایی در زمینه تنوع زیستی و کیفیت خاک وجود داشت که نیاز به توجه بیشتری دارد. در سال ۲۰۲۰، ایران به نمره‌ای بالاتر از سال‌های گذشته دست یافت، اما هنوز در مقایسه با بسیاری از کشورهای دیگر در سطح پایین‌تری قرار داشت. چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و بحران آب همچنان از مشکلات عمده بودند. همچنین، تأثیرات ناشی از فعالیت‌های صنعتی و شهرنشینی بر کیفیت هوا و آب نیز مشهود بود. در آخرین ارزیابی‌ها، ایران همچنان در تلاش برای بهبود نمره EPI خود بود. اقداماتی مانند افزایش آگاهی عمومی، توسعه فناوری‌های سبز و اجرای سیاست‌های پایدار به‌عنوان راهکارهایی برای بهبود وضعیت محیط زیست در نظر گرفته شدند. با این حال، مشکلاتی نظیر آلودگی شدید هوا و بحران آب همچنان چالش‌های جدی باقی ماندند. در سال ۲۰۲۴، رتبه کلی ایران در

بین ۱۸۰ کشور دنیا معادل ۱۱۳ است که جایگاه مطلوبی نیست. شاخص عملکرد محیط زیست طی سال‌های مختلف نشان‌دهنده چالش‌ها و پیشرفت‌های متناوب در زمینه‌های مختلف زیست محیطی است. نیاز به سیاست‌گذاری‌های مؤثر و همکاری‌های بین‌المللی برای بهبود وضعیت محیط زیست و دستیابی به توسعه پایدار در کشور احساس می‌شود.

فعالان محیط زیست در ایران، ضمن تأیید رتبه پایین کشور در شاخص‌های بین‌المللی، دلایل این نزول را به رویدادهایی نظیر خشک‌شدن دریاچه ارومیه و تبدیل ۳۹۰ هزار هکتار از اراضی آن به کویر نسبت می‌دهند. همچنین افت سفره‌های آب زیرزمینی، فرونشست دشت‌ها و تخریب جنگل‌ها از دیگر عوامل مؤثر بر کاهش رتبه ایران از سال ۲۰۱۰ به حساب می‌آید. مشکلاتی مانند آلودگی هوا و کم‌آبی، نیازمند برنامه‌ریزی میان‌مدت و بلندمدت هستند.

وضعیت محیط زیست ایران در چهار مؤلفه کلیدی شامل خاک، آب، هوا و تنوع زیستی به شدت نگران‌کننده است. ایران با بالاترین میزان فرسایش خاک در جهان، سهمی معادل ۲ میلیارد تن از ۲۴ میلیارد تن فرسایش جهانی را به خود اختصاص داده است که این رقم ۸ برابر میانگین جهانی است. کاهش سفره‌های زیرزمینی به طور متوسط ۲ متر در سال، منجر به بروز پدیده فرونشست زمین شده است؛ به طوری که ایران دو بار رکورد جهانی این پدیده را در قرن ۲۱ ثبت کرده است. نرخ بیابان‌زایی نیز به شدت در حال افزایش است و ۳۵ هزار روستا به دلیل کاهش حاصل‌خیزی خاک متروکه شده‌اند. در عرصه آلودگی هوا، این بحران همچنان جدی و نفس‌گیر است، به گونه‌ای که یکی از شهرهای ایران همواره در میان

۱۰ شهر آلوده جهان قرار دارد. علاوه بر منابع آلاینده موتوری، ریزگردها نیز به این معضل افزوده شده‌اند. این چالش‌ها ضرورت توجه و اقدام فوری برای نجات محیط زیست کشور را دوچندان می‌کند.

برای بهبود EPI در کشورهای جهان سوم، از جمله ایران، نیاز به اتخاذ اقدامات استراتژیک و عملی است. این اقدامات شامل تقویت قوانین زیست محیطی، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، مدیریت بهینه منابع آب، حفاظت از تنوع زیستی، آموزش عمومی، توسعه حمل و نقل پایدار، کاهش تولید پسماند و پایش مستمر کیفیت محیط زیست است (۲۴):

- تقویت سیاست‌های محیط زیستی مشتمل بر ایجاد و تقویت قوانین زیست محیطی برای حفاظت از منابع طبیعی و کاهش آلودگی، و توسعه برنامه‌های ملی از جمله طراحی برنامه‌های جامع برای مدیریت پسماند، حفاظت از آب و هوا، و حفظ تنوع زیستی.

- آگاهی‌بخشی و آموزش عمومی مشتمل بر برگزاری کارگاه‌ها و سمینارها جهت افزایش آگاهی عمومی درباره اهمیت محیط زیست و روش‌های حفاظت از آن و ادغام آموزش‌های محیط زیستی در سیستم آموزشی از مقطع ابتدایی تا دانشگاه.

- توسعه فناوری‌های پایدار مشتمل بر سرمایه‌گذاری در فناوری‌های سبز جهت تشویق به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و فناوری‌های کم‌مصرف و تحقیق و توسعه در راستای حمایت از پروژه‌های تحقیقاتی که به توسعه فناوری‌های پایدار و بهبود شرایط محیط زیست کمک می‌کنند.

- مدیریت منابع طبیعی مشتمل بر حفاظت از منابع آب از طریق اجرای برنامه‌های مدیریت منابع آب و جلوگیری از هدررفت آن و حفاظت از جنگل‌ها و

اساتید گران قدر که در انجام تحقیق مشارکت نمودند اعلام می‌دارد.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافع برای اعلام ندارند.

منابع

- [1] Oral, E., 2024, The environmental rule of law and the protection of human rights defenders: Law, society, technology, and markets, International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics, 24, 393.
- [2] Costopoulou, D., Leondiadis, L., Rose, M., 2024, Climate change influence on the trends of BFRs in the environment and food, Chemosphere, 367, 143578.
- [3] Njuguna, L., Uri, I., Beauchamp, E., 2024, National monitoring, evaluation, and learning systems for climate change adaptation: A comparative analysis of nine countries, International Institute for Sustainable Development.
- [4] Pinar, M., 2022, Sensitivity of environmental performance index based on stochastic dominance, Journal of Environmental Management, 310, 114767.
- [5] Karahan, M., Yildirim, Z., Yildirim, T., 2025, Comparative analysis of Turkey's environmental performance with Eastern European countries according to international EPI 2022 data, Green Technologies and Sustainability, 3, 100116.
- [6] Li, Q., Wang, X., Chen, Z., Arif, M., 2024, Assessing the conjunction of environmental sustainability and tourism development along Chinese waterways, Ecological Indicators, 166, 112281.
- [7] Bhadarka, M., Vaghela, D.T., Kamleshbhai, B.P., Sikotariya, H., Kharadi, N., Bamaniya, M., Makwana, K., Verma, P., 2024, Water pollution: Impacts on environment, In: Sustainable aquaculture: A step towards a green future in fish farming, Satish Serial Publishing House, pp. 163-182.
- [8] Amanambu, A.C., Obarein, O.A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S.S., Balogun, O., Oyebamiji, A.,

اکوسیستم‌ها با ایجاد مناطق حفاظت‌شده و برنامه‌های احیای جنگل‌ها.

- همکاری بین‌المللی مشتمل بر پیوند با سازمان‌های بین‌المللی و همکاری با سازمان‌های جهانی و منطقه‌ای برای تبادل دانش و تجربیات و همچنین جذب کمک‌های مالی و استفاده از کمک‌های مالی و فنی از کشورهای توسعه‌یافته برای پروژه‌های محیط زیست.

- پایش و ارزیابی مستمر از طریق ایجاد سیستم‌های پایش و راه‌اندازی سیستم‌های پایش و ارزیابی برای اندازه‌گیری پیشرفت در زمینه‌های مختلف محیط زیستی و انتشار گزارش‌های سالانه شفاف و قابل‌دسترس درباره وضعیت محیط زیست و EPI کشور.

- تشویق مشارکت جامعه و تقویت مشارکت جوامع محلی به مشارکت در پروژه‌های محیط زیستی و تصمیم‌گیری‌های مربوط به منابع طبیعی و حمایت از NGOها و تقویت و حمایت از سازمان‌های غیردولتی فعال در حوزه محیط زیست.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از طرح تحقیقاتی با عنوان تحلیل وضعیت کنونی و آینده‌نگاری نیروی انسانی متخصص، زیرساخت‌ها و دانش مورد نیاز در حوزه سلامت محیط زیست با رویکرد اکتشافی مصوب مرکز ملی تحقیقات راهبردی آموزش پزشکی و مشاوره کارگروه توسعه دانش سلامت محیط زیست، دبیرخانه کلان منطقه دو مستقر در دانشگاه علوم پزشکی تبریز به شماره قرارداد ۹۷۲۳۶۶ است. بدین‌وسیله، نویسندگان مقاله تشکر و قدردانی خود را از تمام

- [17] Lasisi, T.T., Alola, A.A., Muoneke, O.B., Eluwole, K.K., 2022, The moderating role of environmental-related innovation and technologies in growth-energy utilization nexus in highest-performing eco-innovation economies, *Technological Forecasting and Social Change*, 183, 121953.
- [18] Zhao, R., Fang, C., Liu, H., Liu, X., 2021, Evaluating urban ecosystem resilience using the DPSIR framework and the ENA model: A case study of 35 cities in China, *Sustainable Cities and Society*, 72, 102997.
- [19] Riffenburgh, R.H., Gillen, D.L., 2020, *Statistics in medicine*, 4th Edition, Academic Press.
- [20] Saeedinejad, F., Rezaee, A., Shirani Bidabadi, F., Keramatzadeh, A., Rezaei, H., 2024, Evaluation of Iran's vision document 2025 development plans from an environmental perspective, *Journal of Environmental Studies*, 50, 349. (in Persian)
- [21] Mortezaadeh, F., Amiri-Hoseini, S., Gholami-Borujeni, F., 2023, Comparison of EPI in the field of climate changes indexes in Iran and other countries in 2020 and the relationship between GDP and EPI, *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 10, 23.
- [22] U.S. Energy Information Administration, 2024, Country Analysis Brief: Iran, (Available online: <https://www.eia.gov>).
- [23] International Energy Agency, 2024, Energy system of Iran, (Available online: <https://www.iea.org/countries/iran>).
- [24] Mosafari, M., Ghayurdoost, F., Gilani, N., Nemati Mansour, S., 2023, Considerations for revising the educational content of environmental health: A survey of professors in the field, *Journal of Health Research in Community*, 9(4), 1. (in Persian)
- Ochege, F.U., 2020, Groundwater system and climate change: Present status and future considerations, *Journal of Hydrology*, 589, 125163.
- [9] Awewomom, J., Dzeble, F., Takyi, Y.D., Ashie, W.B., Ettey, E.N.Y.O., Afua, P.E., Sackey, L.N.A., Opoku, F., Akoto, O., 2024, Addressing global environmental pollution using environmental control techniques: A focus on environmental policy and preventive environmental management, *Discover Environment*, 2, 8.
- [10] EPI, 2024, Environmental Performance Index, (Available online: <https://epi.yale.edu>).
- [11] Anderson, L.B., Holm, R.H., Black, C., Biddle, D.J., Chiu, W.A., Bhatnagar, A., Smith, T., 2025, An environmental vulnerability index framework supporting targeted public health interventions at the census tracts level, *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, DOI: 10.1038/s41370-025-00763-5.
- [12] Sabermahani, M., Zeinaladeh, R., Jalaee Sfantabadi, S.A., Zayanderoodi, M., 2023, Investigating the shocks of real sectors of the economy on the welfare index in the Iranian economy, *Social Welfare Quarterly*, 22(87), 105. (in Persian)
- [13] Mirzaei, A., Azarm, H., 2024, Investigating the factors affecting natural disinvestment: A panel data regression approach, *Journal of Agricultural Economics & Development*, 37, 379.
- [14] Ahmed, R.R., Akbar, W., Aijaz, M., Channar, Z.A., Ahmed, F., Parmar, V., 2023, The role of green innovation on environmental and organizational performance: Moderation of human resource practices and management commitment, *Heliyon*, 9(1), e12679.
- [15] Libório, M.P., Ekel, P.I., Laudaes, S., da Silva Martins, C.A.P., 2024, A goal-based weighting for composite indicators constructed through Ordered Weighted Averaging (OWA) operator, *MethodsX*, 12, 102575.
- [16] Mosafari, M., 2022, Analysis of the current situation and foresight of skilled human resources, infrastructure, and required knowledge in the field of environmental health with an exploratory approach, Research Project Report, National Center for Strategic Research in Medical Education. (in Persian)

“Research article”

Assessment of environmental challenges in Iran: Findings from the 2024 environmental performance index and expert opinions

Mohammad Mosaferi¹, Ziba Beheshti^{*2}, Neda Gilani³, Sepideh Nemati Mansour⁴

¹Center for Health and Environment Research, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

²Land Evaluation and Environmental Planning, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

³Department of Statistics and Epidemiology, School of Public Health, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

⁴Student Research Committee, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

*Corresponding author: zibabeheshti64@gmail.com

(Received: 4 February 2025, Accepted: 12 April 2025)

Abstract

The Environmental Performance Index (EPI) is an essential tool for evaluating countries environmental performance, incorporating diverse criteria and data to assess both environment conditions and the impact of human activities. This study investigates Iran's current standing in the 2024 EPI and presents insights experts opinions in environmental health to identify the country's major environmental challenges. Iran ranks 113th out of 180 countries and 10th in the Middle East. Key issues affecting environmental health include air pollution, waste-related environmental contamination, pesticide pollution, water scarcity, excessive groundwater extraction, and a general disregard for environmental sustainability. These challenges are of serious concern to experts and are regarded as top national priorities. Air pollution, waste-related contamination, pesticide use, water scarcity, and unsustainable groundwater extraction are consistently highlighted as the most pressing concerns. The most critical problems relate to air quality and climate change. Addressing these challenges requires strengthening environmental governance through effective regulations and the development of comprehensive national programs. Such measures are essential for improving environmental conditions and Iran's EPI performance.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Evaluation of environmental challenges, Environmental performance index, Environmental health, Iran



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره ۱، شماره ۴، پیاپی ۴
زمستان ۱۴۰۳، صفحات ۳۲-۱۷

"مقاله پژوهشی"

پهنه‌بندی نوسانات کیفی فاضلاب در شبکه جمع‌آوری شهر بیرجند

هومن بهمن‌پور^{۱*}، فرخنده احراری^۲

^۱ گروه مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست (HSE)، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

^۲ کارشناس ارشد مهندسی شیمی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: h.bahmanpour@sbiau.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۹، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۱/۰۷)

چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی وضعیت کیفی شبکه فاضلاب شهر بیرجند و ترسیم مدل پهنه‌بندی مربوط به آن بوده است. در طی سه دوره نمونه‌برداری، ۱۰ پارامتر کیفی در ۱۹ نقطه از شبکه فاضلاب شهری اندازه‌گیری شد. پس از تحلیل آماری داده‌ها به منظور استفاده از روش‌های درون‌یابی، تحلیل واریوگرام با استفاده از نرم‌افزار GS+ انجام شد و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.1 و جعبه ابزار Geostatistical Analyst پهنه‌بندی مناسب با استفاده از روش Cross Validation انجام گرفت. به منظور انتخاب روش مناسب بین داده‌های برآورد شده در شبکه فاضلاب با مقادیر واقعی آن‌ها از دو روش آماری تحلیل حساسیت انجام پذیرفت. همبستگی میان داده‌ها به روش اسپیرمن صورت گرفت که در کلیه موارد دقت روش بیزین کریجینگ را در پهنه‌بندی بالاتر از سایر روش‌ها برآورد نمود. نتایج نشان داد دو پارامتر نیتريت و هدایت الکتریکی روند کاهشی و سایر پارامترها روند افزایشی داشته‌اند. نتایج پهنه‌بندی با استفاده از روش کریجینگ بیزین در شبکه فاضلاب حاکی از بالا بودن غلظت BOD و COD در منطقه شمال شهر، بالا بودن میزان EC، افزایش نیتريت، کاهش نیتريت، بالا بودن TDS و pH در انتهای شبکه فاضلاب بود. براساس نتایج بالا بودن غلظت BOD و COD در شبکه فاضلاب رو مشخص می‌شود که تجزیه مواد آلی به کندی انجام شده و به منظور تسریع بخشیدن در تجزیه بیولوژیکی اعمال راهکارهای مدیریتی به ویژه اصلاحات در سیستم هیدرولیکی در شبکه فاضلاب شهر بیرجند بسیار ضروری و مهم می‌باشد تا از این طریق بتوان فرآیند تصفیه را زودتر آغاز کرد.

واژه‌های کلیدی: شبکه فاضلاب، درون‌یابی، پهنه‌بندی فاضلاب، شهر بیرجند

مقدمه

یکی از مهمترین زیرساخت‌های شهری، شبکه‌های فاضلاب هستند که بی‌توجهی نسبت به وضعیت آن‌ها باعث ایجاد حوادث، خسارت‌های غیرقابل جبران و یا مشکلات بهداشتی و محیط زیستی متعددی می‌شود. در سه دهه اخیر، بحث جمع‌آوری و انتقال صحیح فاضلاب شهری از اجزای مهم برنامه‌ریزی و عمران مناطق شهری بوده است. از طرفی با توجه به سرعت رشد مناطق شهری، وجود بافت‌های قدیمی در شهرها، عدم کفایت شبکه زهکشی و جمع‌آوری رواناب سطحی و نبود طرح‌های جامع کنترل سیلاب شهری در اغلب شهرهای ایران، مشکلات مربوطه را دوچندان کرده است (۱ و ۲). این در حالی است که جنبه تغییرات کیفیت فاضلاب جاری در شبکه و فعل و انفعالات بیولوژیکی که در فاضلاب و در طول مدت زمان انتقال آن بوقوع می‌پیوندد، به ندرت مورد توجه طراحان بوده است (۳). بر این اساس لازم است تا به منظور دستیابی به یکپارچگی هر چه بیش‌تر در مدیریت تاسیسات فاضلاب شهری و به حداقل رساندن مشکلات تصفیه‌خانه‌ها در زمان بهره‌برداری از آن‌ها، در مرحله طراحی علاوه بر جنبه‌های هیدرولیکی، به جنبه‌های فرایندی و تغییرات کیفیتی به وقوع پیوسته در فاضلاب جاری در شبکه تا زمان رسیدن آن به تصفیه‌خانه نیز توجه ویژه‌ای نمود (۴). این امر بدان معناست که تغییرات بیولوژیکی و کیفیتی به وقوع پیوسته در فاضلاب در حال انتقال می‌باید به صورت یکپارچه و در تعامل با فرایندهای تصفیه‌خانه فاضلاب مورد بررسی قرار گیرد. این یکپارچگی مدیریت بین شبکه و تصفیه‌خانه منجر به ایجاد سیستمی کارآمد با حداقل مشکلات بهره‌برداری در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

خواهد شد (۵ و ۳). در مدت زمان حرکت فاضلاب‌های خانگی، از محل تخلیه تا محل تصفیه‌خانه، تغییراتی در ویژگی‌های آن‌ها حاصل می‌شود و فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی طبیعی درون سیستم انتقال رخ می‌دهد (۶).

شبکه‌های انتقال آب یا فاضلاب با افزایش سن، معمولاً فرسوده و تخریب می‌شود. عامل‌های موثر بر روند آسیب‌پذیری را می‌توان به سه دسته اصلی فیزیکی، عملیاتی و عوامل محیط زیستی تقسیم نمود (۷). توسعه شهرنشینی باعث افزایش خطر بالازدگی فاضلاب و آلودگی بیشتر در سامانه‌های گردآوری رواناب سطحی می‌شود. همچنین، شبکه فاضلاب به علت مدفون بودن اجزا در زیر زمین، نسبت به تغییرپذیری‌های زمینی گذرا، رانش، زلزله و تغییر شکل دائمی زمین آسیب‌پذیر است (۸). سامانه‌های فاضلاب و رواناب سطحی، در سراسر جهان دارای مسئله‌هایی مانند ظرفیت نامناسب، شکست‌های ساختاری و خرابی لوله‌ها هستند که منجر به آسیب‌های ساختاری همچون نشت فاضلاب، اختلال‌های ترافیکی، فرسایش خیابان، آلودگی آب‌های محلی و ... می‌شوند (۹). عملکرد نامناسب سامانه‌های فاضلاب می‌تواند به شدت به روی تاب‌آوری جامعه تاثیرگذار باشد (۱۰). هدف اصلی مهندسی طراحی تاسیسات جمع‌آوری و دفع فاضلاب، رساندن فاضلاب خام تازه به محل تصفیه‌خانه است، در غیر این صورت علاوه بر مشکل بو، مساله تصفیه بیولوژیکی فاضلاب نیز با دشواری‌های فراوانی روبرو خواهد شد (۳). ترکیب فاضلاب خانگی و شهری به طور قابل توجهی به مکان و زمان بستگی دارد. دلیل این امر تا حدی به علت نوسانات در میزان مواد تخلیه

شده می‌باشد (۱۱). شبکه‌ها و تاسیسات فاضلاب از جمله تاسیسات زیربنایی هر منطقه محسوب می‌شوند که با صرف هزینه‌های سنگین طراحی، اجرا و بهره‌برداری می‌شوند. بنابراین؛ یکی از عوامل اصلی موثر در رابطه با افزایش راندمان تاسیسات شهری، انجام بررسی‌های کمی و کیفی صحیح و تخصصی است. همواره پارامترهای کیفیت فاضلاب، همواره یکی از موارد مهم در طراحی تصفیه‌خانه‌ها بوده است. حداقل نمودن بار آلودگی فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه‌ها و به عبارت بهتر تصفیه فاضلاب در کلکتورها نه تنها منجر به کاهش قابل توجهی از مشکلات بهره‌برداری تصفیه‌خانه‌ها خواهد شد، بلکه مجریان را از صرف هزینه‌های سنگین در ساخت این نوع از تصفیه‌خانه‌ها نیز بی‌نیاز خواهد کرد (۱۲).

بطورکلی محیط داخلی یک فاضلاب‌رو به چهار زیرمجموعه و یا فاز تقسیم‌بندی گردیده که شامل فاز سیال، فاز بیوفیلم، فاز رسوبات و فاز اتمسفری یا فضای خالی داخل آن می‌گردد (۱۳). این سیستم که عملیات انتقال جرم بین فازهای مختلف آن انجام می‌پذیرد، سیستمی پویا و در عین حال پیچیده است. به طور کلی تجزیه مواد آلی موجود در فاضلاب جاری در کلکتورها تحت شرایط هوازی و یا بی‌هوازی صورت می‌پذیرد که شرایط حاکم بر این عمل بستگی به نوع الکترون گیرنده‌های موجود در فاضلاب دارد (۱۴). این الکترون گیرنده‌ها عموماً شامل اکسیژن برای تنفس باکتری‌های هوازی، نیترات برای انجام عمل نیتریفیکاسیون، مواد آلی در عمل تخمیر، سولفات برای احیا به سولفید و دی اکسید کربن برای متان‌زایی می‌باشند (۱۵). در شرایط هوازی مواد آلی قابل تجزیه بیولوژیکی موجود در فاضلاب توسط باکتری‌های

هتروتروف تجزیه شده و مقدار بیومس (جرم بیولوژیکی) افزایش می‌یابد (۱۳ و ۱۱). این تجزیه بیولوژیکی با اعمال مدیریت مناسب می‌تواند مقدمه‌ای موثر در کاهش BOD ورودی به تصفیه‌خانه به شمار آید. در شرایط بی‌هوازی به دلیل فقدان اکسیژن لازم برای میکروارگانیسم‌ها، غلظت BOD در حین انتقال به تصفیه‌خانه افزایش یافته که به موجب آن غلظت سولفید فاضلاب به دلیل حاکم شدن شرایط بی‌هوازی و احیای سولفات به سولفید نیز افزایش خواهد یافت (۱۶). از جمله نخستین تحقیقات صورت گرفته در این زمینه می‌توان به مطالعه جاکوبسن و همکاران در سال ۱۹۹۹ اشاره نمود که تحقیقی را بر روی "تغییرات کیفیت فاضلاب در طول حمل و نقل در شبکه‌های فاضلاب و مفهوم مدل هوازی و بی‌هوازی برای تحولات میکروبی کربن و گوگرد" انجام دادند و با استفاده از نتایج حاصل یک مدل مفهومی، رابطه میان تحولات هوازی بین رسوبات ته‌نشین شده و نرخ مصرف اکسیژن را مشخص نمودند (۱۷). زوج نیز در سال ۱۹۹۸ بر روی "شبیه‌سازی COD در شبکه‌های فاضلاب" پژوهشی انجام داد. در این تحقیق با مدل‌سازی کیفی رابطه بین مواد آلاینده، مواد جامد معلق (TSS) و اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب به دست آمد (۱۸). گکلو و دورسان نیز اقدام به مدل‌سازی فاضلاب در شبکه شهری در آفریقای جنوبی نمودند (۱۹). در ایران در منطقه مورد نظر تاکنون هیچ گونه تحقیقی در ارتباط با فاضلاب شهری بیرجند صورت نگرفته است. در صورتیکه در سایر شهرهای کشور بررسی‌هایی صورت گرفته است. در تحقیقی که کمالی و همکاران در سال ۱۴۰۰ انجام دادند، تاب‌آوری جامع در شبکه

جمع‌آوری فاضلاب شهر تربت حیدریه را بررسی کردند (۲۰). امیدی ارجنکی و همکاران نیز در سال ۱۴۰۰ در تحقیقی دانشگاهی، اقدام به بررسی عملکرد و تعیین ابعاد بهینه شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی با استفاده از مدل SWMM کردند (۲۱). همچنین، عباسی و همکاران در سال ۱۴۰۲ نیز اقدام به آسیب‌شناسی بهره‌برداری از شبکه جمع‌آوری فاضلاب با رویکرد تیوری استخوان ماهی نمودند. هدف آنها از این مطالعه، استفاده ترکیبی از روش‌های تصمیم‌گیری طوفان فکری، SWOT و استخوان ماهی جهت تجزیه و تحلیل علل اصلی حوادث و ریسک‌های مترتب به شبکه فاضلاب بود. نتایج نشان داد که راهبردهای پیشنهادی باید در وضعیت ضعف از منظر عوامل داخلی با امتیاز ۲/۲ و تهدید از منظر عوامل خارجی با امتیاز ۱/۷۴۵ به صورت راهبردهای تدافعی تعریف شود. از طرفی نتایج ریسک‌های بهره‌برداری از شبکه فاضلاب حاکی از بالا بودن اهمیت ریسک‌های فنی با میانگین امتیاز ۷/۸ بوده که بر این اساس راهبردهای تدافعی مبتنی بر شرایط ریسک تعریف شد. این راهبردها از برخورد ضعف‌های درونی با تهدیدهای بیرونی حاصل می‌شوند. برای به حداقل رساندن زیان‌های ناشی از تهدیدها و نقاط ضعف، می‌توان به مهم‌ترین راهبردهای تدافعی پیشنهادی از جمله وجود برنامه جامع بهره‌برداری و نگهداری از شبکه فاضلاب، انجام به موقع تعمیرات و ضرورت بکارگیری روش‌های نوسازی و جایگزینی اشاره نمود (۲۲).

بدیهی است که ارتقای کیفی و کمی عملکرد یک سیستم در گروی پایش منظم و دوره‌ای آن می‌باشد. از طریق سنجش پارامترهای موثر می‌توان سطح تغییرات

و نوسانات مربوط به فاضلاب و نیز میزان انحراف از استانداردهای مصوب را تعیین نمود.

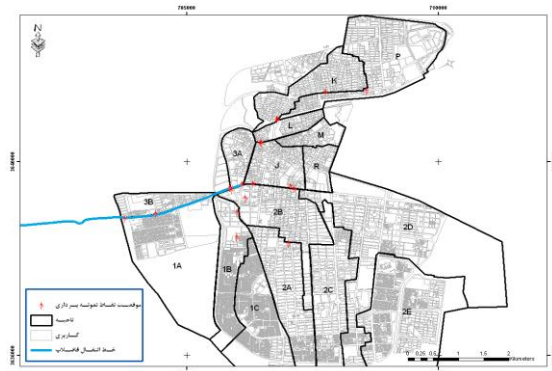
هدف از انجام این تحقیق، پهنه‌بندی شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهری در بیرجند در استان خراسان جنوبی براساس نوسانات کیفی و دوره‌ای فاضلاب بوده است. سوال اصلی تحقیق آن بوده است که فاضلاب شهری در طول شبکه جمع‌آوری و در بازه زمانی مطالعاتی چه تغییراتی داشته است. لازم به ذکر است که تاکنون هیچ نوع مطالعه‌ای در خصوص بررسی کیفی فاضلاب شهری بیرجند صورت نگرفته است.

مواد و روش‌ها

- معرفی منطقه مورد مطالعه

با توجه به آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از دفع غیراصولی فاضلاب، اجرای شبکه فاضلاب شهر بیرجند (مرکز استان خراسان جنوبی) از سال ۱۳۷۴ شروع گردید. در حال حاضر قریب ۳۵۹ کیلومتر لوله‌گذاری فاضلاب اجرا شده است که ۹۰ درصد آن را لوله‌های پلی‌اتیلن و پی. وی. سی و ۱۰ درصد نیز که عمدتاً اقطار بالا و کلکتور اصلی شبکه را شامل می‌شود، لوله‌های آزیست سیمان و بتنی می‌باشند. همچنین در شبکه فاضلاب بیرجند قریب ۷۰۰۰ منهول وجود دارد که فاضلاب شهری را بصورت ثقلی توسط یک خط کلکتور اصلی بتنی با اقطار ۱۰۰۰ و ۹۰۰ میلی‌متر به طول قریب ۹ کیلومتر به تصفیه‌خانه فاضلاب شهر منتقل می‌نماید (۲۳). تصفیه‌خانه فاضلاب شهر بیرجند در شمال غرب این شهر در زمینی به مساحت ۶۰ هکتار و در فاصله ۹ کیلومتری شهر به روش برکه تثبیت از نوع بی‌هوازی - هوازی طراحی و اجرا شده است. این تصفیه‌خانه در دو مدول

فاضلاب خراسان جنوبی انتقال یافتند. پارامترهای کیفی اصلی شامل: اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD)، اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)، اکسیژن محلول (DO)، دما، pH، هدایت الکتریکی (EC)، کل مواد جامد نامحلول (TDS)، نیتрат، نیتريت و سولفات براساس استاندارد متد مورد سنجش قرار گرفتند. اکسیژن محلول (DO) نیز به شکل درجا (On site) اندازه‌گیری شد. شکل (۲) موقعیت مکانی نقاط نمونه‌برداری شده را در شبکه فاضلاب مورد بهره‌برداری شهر بیرجند نشان می‌دهد.

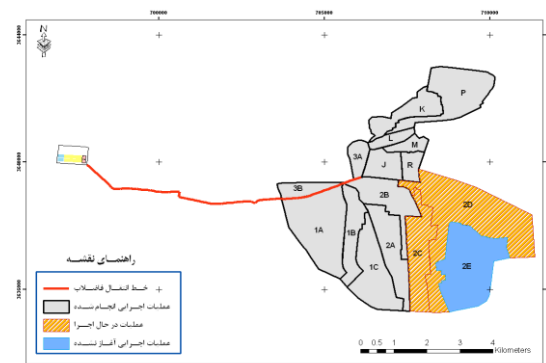


شکل (۲): موقعیت نقاط نمونه‌برداری در محدوده شبکه فاضلاب بیرجند

- روش‌شناسی

جهت پهنه‌بندی کیفی و همچنین بررسی وضعیت کیفی شبکه فاضلاب، پیش از ورود به نرم‌افزار، بررسی و اطمینان از صحت داده‌ها صورت گرفت. در اصل، در دو موضوع نرمال بودن سری زمانی داده‌ها و نداشتن پرت داده با استفاده از نرم‌افزار Minitab 17 مورد سنجش قرار گرفتند. به منظور تحلیل نرمال بودن از آزمون^۱ PPCC که آرایه دهنده قیاس گرافیکی از

موازی و مشابه طی سه مرحله بی‌هوازی، اختیاری و تکمیلی فاضلاب را تصفیه می‌نماید و پساب خروجی نیز جهت مصارف کشاورزی استفاده می‌گردد. به منظور مدیریت بهتر شبکه جمع‌آوری فاضلاب، ۱۶ ناحیه در مطالعات طراحی شبکه فاضلاب از ابتداء تعریف و بر همین اساس شبکه جمع‌آوری طراحی و به مرحله اجرا رسید (۲۴). شکل (۱) ناحیه‌بندی شبکه فاضلاب بیرجند را با توجه به وضعیت اجرایی آن نشان می‌دهد.



شکل (۱): وضعیت اجرایی شبکه فاضلاب در نواحی مختلف

در این مطالعه به منظور بررسی اثرات پارامترهای کیفی موجود در شبکه فاضلاب سه دوره نمونه‌برداری در بهمن ۱۳۹۲، اردیبهشت ۱۳۹۸ و مرداد ۱۴۰۱ در نوزده نقطه از شبکه فاضلاب مورد بهره‌برداری، انجام گرفت. انتخاب نقاط نمونه‌برداری بر مبنای ترکیبی از شاخص‌های مکانی و فنی بوده است که براساس نظر کارشناسان و با توجه به شناخت از کانون‌های آلودگی و بحرانی شبکه فاضلاب شهر بیرجند صورت گرفت. نمونه‌ها به آزمایشگاه معتمد فاضلاب شرکت آب و

^۱ Probability plot correlation coefficient

نتایج است (۲۵)، استفاده شد که نرمال بودن کلیه داده‌ها را تصدیق نمود. همچنین با توجه به نمونه‌برداری‌های انجام شده در سطح شبکه فاضلاب و برآوردهای مختلف، وجود داده‌های پرت محرز بوده که با استفاده از آزمون گرابس^۱ این سنجش انجام پذیرفت. در این تحلیل شناسایی داده‌های پرت تنها به منظور بررسی تغییرات زیاد داده‌ها در پهنه‌بندی انجام گردید. با توجه به نرمال نبودن برخی از غلظت‌ها در دوره‌های نمونه‌برداری از توابع Box-Cox در روش‌های زمین آماری برای نرمال کردن داده‌های مورد استفاده در پهنه‌بندی استفاده شد (۲۶). همچنین با توجه به وجود داده‌های پرت براساس آزمون در برخی از دوره‌های نمونه‌برداری پس از بررسی موقعیت مکانی نسبت به حذف یا قرار داشتن داده مورد نظر، تصمیم‌گیری شد که در تمام موارد داده‌های پرت جهت پهنه‌بندی مناسب تشخیص داده شدند. به منظور بررسی همبستگی بین غلظت پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده در شبکه فاضلاب بیرجند در هر دوره نمونه‌برداری، با توجه به ناپارامتریک بودن داده‌های کیفی و براساس فرض‌های آماری روش اسپیرمن به عنوان روش مناسب انتخاب گردید. به منظور پهنه‌بندی پارامترهای کیفی در شبکه فاضلاب شهر بیرجند با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.1 و جعبه ابزار Geo-statistic Analyst ابتدا داده‌های مکانی را به صورت یک لایه اطلاعاتی به مدل معرفی کرده سپس جهت استفاده از روش‌های زمین آماری تحلیل واریوگرام را با استفاده از نرم‌افزار Gs+ انجام و در نهایت پس از

انتخاب واریوگرام مناسب پهنه‌بندی انجام گردید (۲۷). در ادامه، ارزیابی انواع مختلف واریوگرام (واریانس فاصله بین نقاط در یک ساختار فضایی طبیعی که وابستگی بین نقاط را نشان می‌دهد)، براساس شاخص‌های آماری ضریب تبیین و میزان انحراف خطا (RSS) برآورد شده است (۲۹ و ۲۸). در نهایت، به منظور بررسی دقیق و انتخاب یک روش مناسب جهت پهنه‌بندی پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده در شبکه فاضلاب شهر بیرجند، از روش Cross Validation برای ارزیابی چهار روش به کار برده شده استفاده گردید.

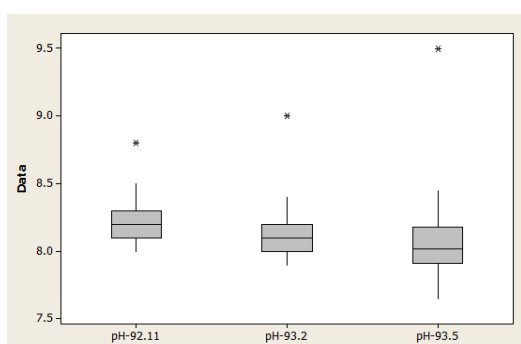
نتایج و بحث

به منظور بررسی داده‌های ثبت شده از سوی آزمایشگاه آب و فاضلاب در خصوص کیفیت پارامترهای اندازه‌گیری شده، ابتدا تحلیل آماری داده‌ها با توجه به خصوصیات آماری مطابق جدول (۱) انجام شد و سپس به منظور بررسی داده‌ها نمودار جعبه‌ای داده‌ها به منظور شناسایی داده‌های مشکوک ترسیم گردید که نتایج نهایی حاکی از صحت داده‌های ثبت شده در هر سه دوره نمونه‌برداری می‌باشد (شکل‌های (۳) تا (۱۰)).

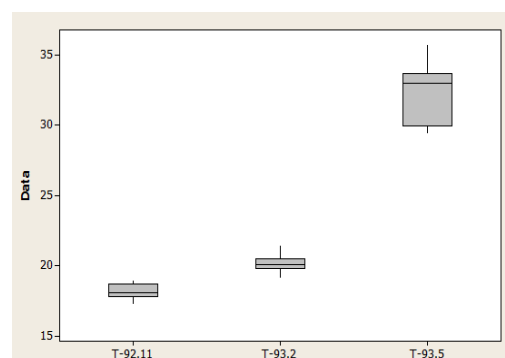
^۱ Grubbs' Test

جدول (۱): تحلیل آماری برخی از متغیرهای مورد آزمایش

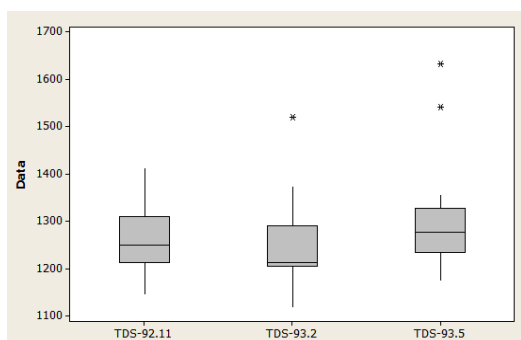
زمان نمونه‌برداری	بهمن ۱۳۹۲			اردیبهشت ۱۳۹۸			مرداد ۱۴۰۱		
پارامترهای کیفی پارامتر آماری	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	TDS (mg/l)	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	TDS (mg/l)	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	EC ($\mu\text{s/cm}$)
تعداد نمونه	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹
حداقل	۳۲۸	۶۹۰	۱۱۴۷	۳۲۰	۶۷۲	۱۱۲۰	۳۱۴	۶۱۲	۲۷۱۰
حداکثر	۷۸۱	۱۴۲۱	۱۴۱۲	۷۹۰	۱۴۷۳	۱۵۲۰	۸۱۳	۱۵۲۸	۳۷۷۰
میانگین	۵۴۳	۱۰۲۵	۱۲۶۳	۵۹۴/۱	۱۰۴۶/۱	۱۲۵۲/۲	۵۷۰/۵	۱۰۸۱/۲	۲۹۹۶/۸
میانه	۵۱۰	۹۲۰	۱۲۵۰	۵۰۱	۹۰۱	۱۲۱۴	۵۲۰	۹۵۵	۲۹۲۰
واریانس	۲۶۹۷۶/۵	۶۶۱۵۵/۶	۵۶۷۲/۸	۲۵۱۸۷/۱۶	۶۹۸۳۱/۱۶	۷۷۵۳/۹۲	۳۱۶۰۸/۶۰	۹۲۴۲۸/۰۶	۶۸۶۶۲/۸۱
انحراف معیار	۱۶۴/۲۵	۲۵۷/۲۱	۷۵/۳۲	۱۵۸/۷۰	۲۶۴/۲۶	۸۸/۰۶	۱۷۷/۷۹	۳۰۴/۰۲	۲۶۰/۰۴
ضریب تغییرات	۰/۳۰	۰/۲۵	۰/۰۶	۰/۲۹	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۰۹



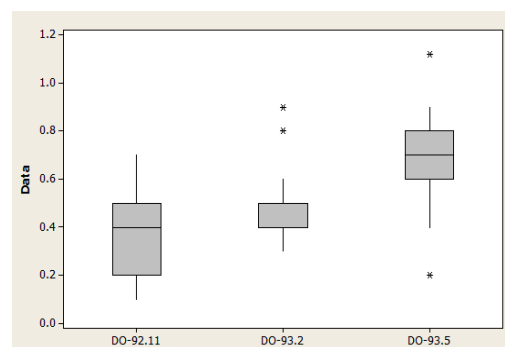
شکل (۴): نمودار جعبه‌ای pH



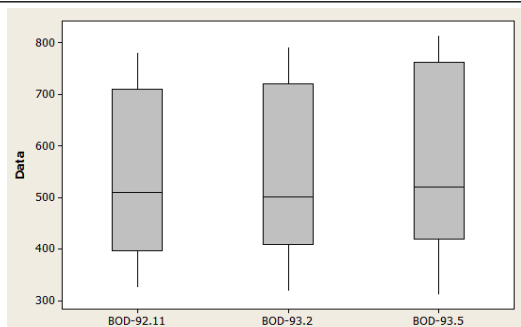
شکل (۳): نمودار جعبه‌ای دما



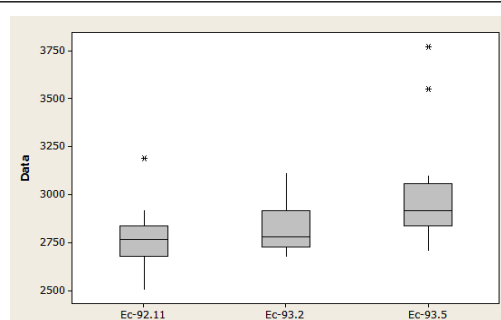
شکل (۶): نمودار جعبه‌ای TDS



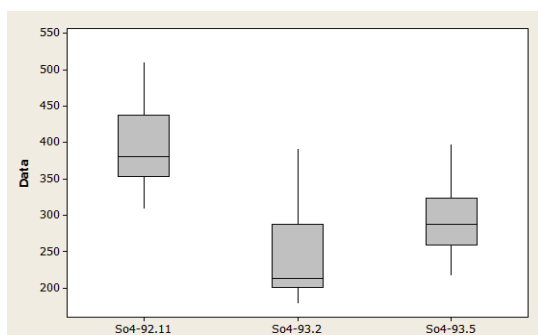
شکل (۵): نمودار جعبه‌ای DO



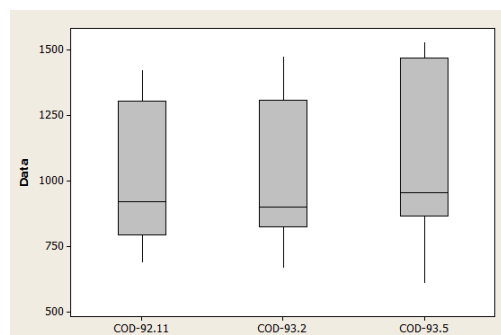
شکل (۸): نمودار جعبه‌ای BOD



شکل (۷): نمودار جعبه‌ای EC



شکل (۱۰): نمودار جعبه‌ای سولفات

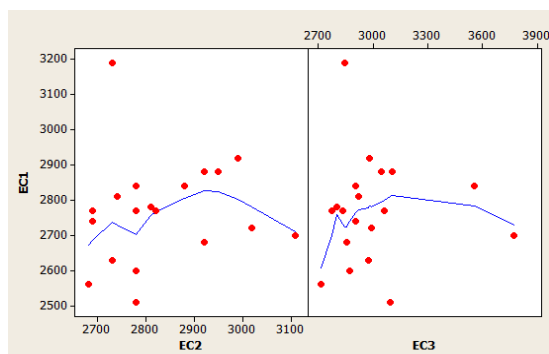


شکل (۹): نمودار جعبه‌ای COD

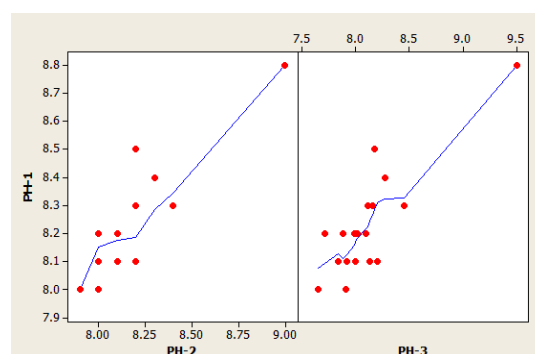
تغییرات کیفیت ارائه شد (شکل‌های (۱۱) تا (۲۰)). بر این اساس، روند تغییرات EC و نیتريت تا حدی کاهش و سایر پارامترها در سه دوره نمونه‌برداری روند افزایشی داشته است.

- بررسی تغییرات در بازه زمانی مورد مطالعه

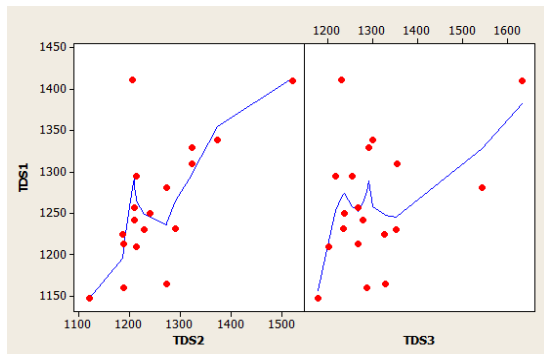
مفهوم روند به معنای تغییرات کیفی یک پارامتر در طول زمان است. بنابراین؛ با توجه به سه دوره نمونه برداری روند افزایش، کاهش یا عدم تغییر پارامترها مورد سنجش قرار گرفت و با استفاده از ماتریس، روند



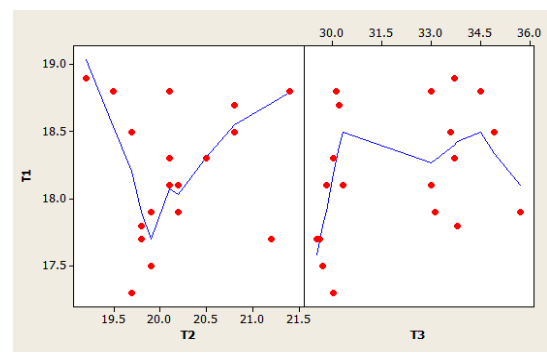
شکل (۱۲): تغییرات EC در سه دوره نمونه‌برداری



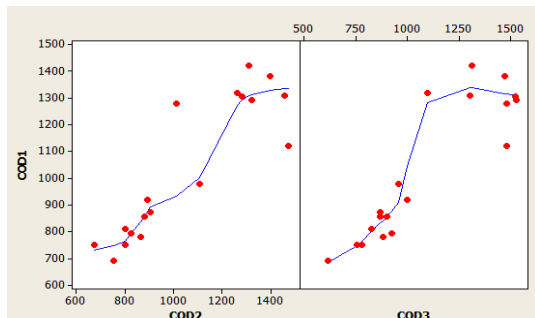
شکل (۱۱): تغییرات pH در سه دوره نمونه‌برداری



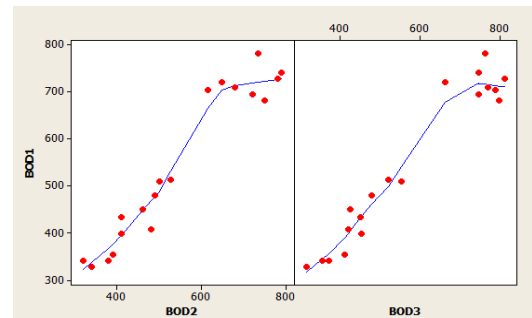
شکل (۱۴): تغییرات TDS در سه دوره نمونه‌برداری



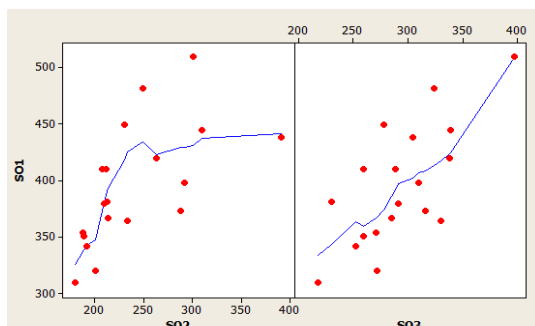
شکل (۱۳): تغییرات دما در سه دوره نمونه‌برداری



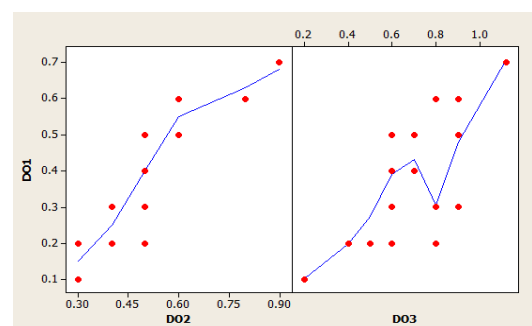
شکل (۱۶): تغییرات COD در سه دوره نمونه‌برداری



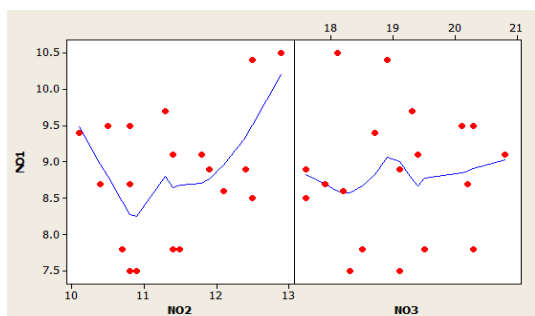
شکل (۱۵): تغییرات BOD در سه دوره نمونه‌برداری



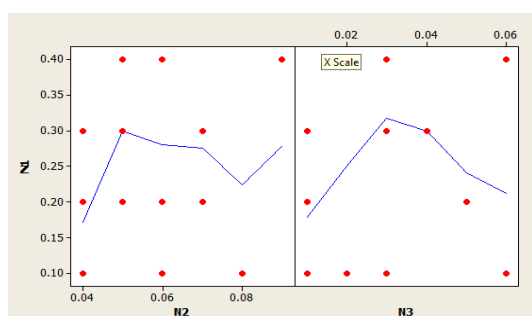
شکل (۱۸): تغییرات سولفات در سه دوره نمونه‌برداری



شکل (۱۷): تغییرات DO در سه دوره نمونه‌برداری



شکل (۲۰): تغییرات نیترات در سه دوره نمونه‌برداری



شکل (۱۹): تغییرات نیتريت در سه دوره نمونه‌برداری

فاضلاب نشان می‌دهند و مدل برگزیده نیز نشان داده شده است. خصوصیات هر یک از واریوگرام‌ها نیز در اشکال بیان شده است.

- ارزیابی واریوگرام

شکل‌های (۲۱) تا (۳۶) انواع مختلف تحلیل واریوگرام را در سه دوره نمونه‌برداری کیفی از شبکه

ارائه مدل پهنه‌بندی شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهری بیرجند

بهم‌پور و احراری

Model	Nugget Co	Sill Co + C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion C/(Co+C)	r2	RSS
☛ Spherical	16350.0000	43910.0000	8783.0000	8783.0000	0.628	0.283	7.174E+08
☛ Exponential	16300.0000	63700.0000	8860.0000	26580.0000	0.744	0.282	7.184E+08
☛ Linear	16799.8540	34526.2980	4089.9719	4089.9719	0.513	0.284	1.198E+11
☛ Linear to sill	17000.0000	54390.0000	8768.0000	8768.0000	0.687	0.284	7.164E+08
☛ Gaussian	19900.0000	70720.0000	6651.0000	11519.8699	0.719	0.275	7.249E+08

شکل (۲۲): تحلیل واریوگرام BOD در مرحله دوم نمونه‌برداری

Model	Nugget Co	Sill Co + C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion C/(Co+C)	r2	RSS
☛ Spherical	37800.0000	140800.0000	9110.0000	9110.0000	0.732	0.451	4.686E+09
☛ Exponential	36700.0000	215400.0000	9110.0000	27330.0000	0.830	0.441	4.777E+09
☛ Linear	38038.9760	104270.5700	4089.9719	4089.9719	0.635	0.464	1.522E+13
☛ Linear to sill	38500.0000	178900.0000	8757.0000	8757.0000	0.785	0.464	4.576E+09
☛ Gaussian	48500.0000	308000.0000	7719.0000	13369.7002	0.843	0.522	4.083E+09

شکل (۲۴): تحلیل واریوگرام COD در مرحله اول نمونه‌برداری

Model	Nugget Co	Sill Co + C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion C/(Co+C)	r2	RSS
☛ Spherical	65200.0000	174300.0000	9110.0000	9110.0000	0.626	0.237	1.339E+10
☛ Exponential	65800.0000	247700.0000	9110.0000	27330.0000	0.734	0.225	1.359E+10
☛ Linear	66075.9070	135449.4500	4089.9719	4089.9719	0.512	0.248	3.370E+13
☛ Linear to sill	66700.0000	213400.0000	8761.0000	8761.0000	0.687	0.248	1.319E+10
☛ Gaussian	75400.0000	361800.0000	7677.0000	13296.9540	0.792	0.321	1.191E+10

شکل (۲۶): تحلیل واریوگرام COD در مرحله سوم نمونه‌برداری

Model	Nugget Co	Sill Co + C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion C/(Co+C)	r2	RSS
☛ Spherical	0.00090	0.03920	3838.0000	3838.0000	0.977	0.778	3.989E-04
☛ Exponential	0.00460	0.11090	8928.0000	26784.0000	0.959	0.749	4.512E-04
☛ Linear	0.00641	0.04465	4089.9719	4089.9719	0.856	0.735	5.934E-03
☛ Linear to sill	0.00660	0.08770	8736.0000	8736.0000	0.925	0.735	4.771E-04
☛ Gaussian	0.00560	0.04040	1962.0000	3398.2837	0.861	0.816	3.309E-04

شکل (۲۸): تحلیل واریوگرام DO در مرحله دوم نمونه‌برداری

Model	Nugget Co	Sill Co + C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion C/(Co+C)	r2	RSS
☛ Spherical	17040.0000	34090.0000	9110.0000	9110.0000	0.500	0.007	1.989E+09
☛ Exponential	19030.0000	38070.0000	9110.0000	27330.0000	0.500	0.009	1.949E+09
☛ Linear	21115.9000	24503.0760	4089.9719	4089.9719	0.138	0.005	3.009E+09
☛ Linear to sill	18500.0000	37010.0000	9110.0000	9110.0000	0.500	0.005	1.972E+09
☛ Gaussian	21400.0000	42810.0000	9110.0000	15778.9829	0.500	0.000	1.978E+09

شکل (۳۰): تحلیل واریوگرام EC در مرحله اول نمونه‌برداری

Model	Nugget Co	Sill Co + C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion C/(Co+C)	r2	RSS
☛ Spherical	100.00000	68900.0000	201.0000	201.0000	0.999	0.000	2.173E+10
☛ Exponential	55500.0000	111100.0000	9110.0000	27330.0000	0.500	0.096	2.381E+10
☛ Linear	66885.5090	66885.5090	4089.9719	4089.9719	0.000	0.098	2.173E+10
☛ Linear to sill	5400.00000	66900.0000	201.0000	201.0000	0.919	0.000	2.173E+10
☛ Gaussian	62500.0000	125100.0000	9110.0000	15778.9829	0.500	0.101	2.297E+10

شکل (۳۲): تحلیل واریوگرام EC در مرحله سوم نمونه‌برداری

Model	Nugget Co	Sill Co + C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion C/(Co+C)	r2	RSS
☛ Spherical	0.00620	0.19240	9110.0000	9110.0000	0.968	0.423	0.0173
☛ Exponential	0.00400	0.32800	9110.0000	27330.0000	0.988	0.422	0.0173
☛ Linear	0.00670	0.12586	4089.9719	4089.9719	0.947	0.428	0.0701
☛ Linear to sill	0.00750	0.26100	8785.0000	8785.0000	0.971	0.428	0.0171
☛ Gaussian	0.02900	0.59900	8969.0000	15534.7637	0.952	0.421	0.0174

شکل (۳۴): تحلیل واریوگرام pH در مرحله دوم نمونه‌برداری

Model	Nugget Co	Sill Co + C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion C/(Co+C)	r2	RSS
☛ Spherical	19360.0000	42730.0000	8714.0000	8714.0000	0.547	0.238	6.588E+08
☛ Exponential	19400.0000	60440.0000	9086.0000	27258.0000	0.679	0.237	6.592E+08
☛ Linear	19767.9660	34867.7950	4089.9719	4089.9719	0.433	0.238	9.575E+10
☛ Linear to sill	19900.0000	51850.0000	8763.0000	8763.0000	0.616	0.238	6.582E+08
☛ Gaussian	22400.0000	65750.0000	8660.0000	11535.4584	0.659	0.229	6.664E+08

شکل (۲۱): تحلیل واریوگرام BOD در مرحله اول نمونه‌برداری

Model	Nugget Co	Sill Co + C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion C/(Co+C)	r2	RSS
☛ Spherical	24140.0000	48290.0000	9110.0000	9110.0000	0.500	0.101	9.554E+08
☛ Exponential	26190.0000	56620.0000	9110.0000	27330.0000	0.537	0.098	9.415E+08
☛ Linear	26638.4740	37611.7740	4089.9719	4089.9719	0.292	0.104	6.904E+10
☛ Linear to sill	26220.0000	52450.0000	9110.0000	9110.0000	0.500	0.104	9.353E+08
☛ Gaussian	28300.0000	77700.0000	8233.0000	14259.9743	0.636	0.123	9.150E+08

شکل (۲۳): تحلیل واریوگرام BOD در مرحله سوم نمونه‌برداری

Model	Nugget Co	Sill Co + C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion C/(Co+C)	r2	RSS
☛ Spherical	35600.0000	133900.0000	8667.0000	8667.0000	0.734	0.276	9.542E+09
☛ Exponential	35700.0000	209000.0000	9059.0000	27177.0000	0.829	0.277	9.532E+09
☛ Linear	37589.5260	100858.4000	4089.9719	4089.9719	0.627	0.275	1.417E+13
☛ Linear to sill	38200.0000	171900.0000	8763.0000	8763.0000	0.778	0.275	9.556E+09
☛ Gaussian	49500.0000	310000.0000	8306.0000	14386.4140	0.840	0.252	9.855E+09

شکل (۲۵): تحلیل واریوگرام COD در مرحله دوم نمونه‌برداری

Model	Nugget Co	Sill Co + C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion C/(Co+C)	r2	RSS
☛ Spherical	0.01710	0.06320	8889.0000	8889.0000	0.729	0.367	1.355E-03
☛ Exponential	0.01690	0.09770	9110.0000	27330.0000	0.827	0.360	1.371E-03
☛ Linear	0.01769	0.04729	4089.9719	4089.9719	0.626	0.370	4.618E-03
☛ Linear to sill	0.01790	0.08060	8752.0000	8752.0000	0.778	0.370	1.349E-03
☛ Gaussian	0.02260	0.16260	8650.0000	14982.2395	0.861	0.388	1.310E-03

شکل (۲۷): تحلیل واریوگرام DO در مرحله اول نمونه‌برداری

Model	Nugget Co	Sill Co + C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion C/(Co+C)	r2	RSS
☛ Spherical	0.03330	0.06670	9110.0000	9110.0000	0.501	0.028	2.670E-03
☛ Exponential	0.03720	0.07450	9110.0000	27330.0000	0.501	0.028	2.318E-03
☛ Linear	0.04481	0.04481	4089.9719	4089.9719	0.000	0.031	1.967E-03
☛ Linear to sill	0.03620	0.07250	9110.0000	9110.0000	0.501	0.031	2.448E-03
☛ Gaussian	0.04190	0.08390	9110.0000	15778.9829	0.501	0.038	2.167E-03

شکل (۲۹): تحلیل واریوگرام DO در مرحله سوم نمونه‌برداری

Model	Nugget Co	Sill Co + C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion C/(Co+C)	r2	RSS
☛ Spherical	3550.00000	12000.0000	301.0000	301.0000	0.704	0.002	6.366E+08
☛ Exponential	4110.00000	11970.0000	91.0000	273.0000	0.657	0.002	6.369E+08
☛ Linear	11876.6100	11876.6100	4089.9719	4089.9719	0.000	0.395	6.379E+08
☛ Linear to sill	4860.00000	12000.0000	243.0000	243.0000	0.595	0.002	6.366E+08
☛ Gaussian	11090.0000	22190.0000	9110.0000	15778.9829	0.500	0.464	7.142E+08

شکل (۳۱): تحلیل واریوگرام EC در مرحله دوم نمونه‌برداری

Model	Nugget Co	Sill Co + C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion C/(Co+C)	r2	RSS
☛ Spherical	0.01310	0.08820	8977.0000	8977.0000	0.851	0.317	4.467E-03
☛ Exponential	0.01230	0.14460	9075.0000	27225.0000	0.915	0.320	4.448E-03
☛ Linear	0.01388	0.06196	4089.9719	4089.9719	0.776	0.320	0.0131
☛ Linear to sill	0.01420	0.11640	8777.0000	8777.0000	0.878	0.320	4.448E-03
☛ Gaussian	0.02330	0.24560	8940.0000	15484.5342	0.905	0.295	4.607E-03

Model	Nugget Co	Sill Co + C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion C/(Co+C)	r2	RSS
☒ Spherical	0.00460	0.23020	740.0000	740.0000	0.980	0.349	0.0344
☐ Exponential	0.17830	0.35760	9110.0000	27330.0000	0.501	0.008	0.0543
☐ Linear	0.20885	0.22061	4089.9719	4089.9719	0.053	0.002	0.0532
☐ Linear to sill	0.17340	0.34780	9110.0000	9110.0000	0.501	0.002	0.0567
☐ Gaussian	0.20090	0.40280	9110.0000	15778.9829	0.501	0.005	0.0555

شکل (۳۶): تحلیل واریوگرام دما در مرحله اول نمونه‌برداری

Model	Nugget Co	Sill Co + C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion C/(Co+C)	r2	RSS
☐ Spherical	0.02900	0.49200	9110.0000	9110.0000	0.941	0.417	0.108
☒ Exponential	0.02200	0.83400	9110.0000	27330.0000	0.974	0.417	0.108
☐ Linear	0.03213	0.32599	4089.9719	4089.9719	0.901	0.421	0.430
☐ Linear to sill	0.03400	0.65800	8764.0000	8764.0000	0.948	0.421	0.108
☐ Gaussian	0.08700	1.47300	8914.0000	15439.5009	0.941	0.403	0.111

شکل (۳۵): تحلیل واریوگرام pH در مرحله سوم نمونه‌برداری

- ارزیابی روش‌های مختلف درونیابی

براساس نتایج همبستگی بین پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده و درونیابی شده به روش‌های مختلف درونیابی و مقدار ضریب تبیین بین این دو

جدول (۲): همبستگی بین مقدار مشاهده شده و برآوردی در درونیابی شبکه فاضلاب در مرحله سوم نمونه‌برداری

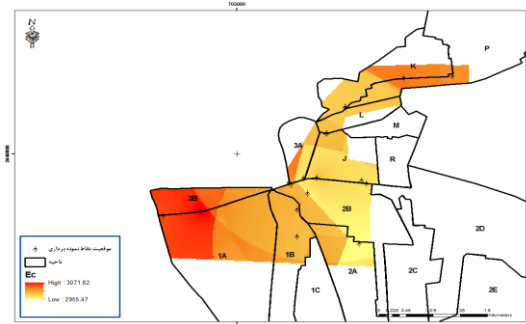
نام پارامتر کیفی	درونیابی IDW	درونیابی RBF	درونیابی Ordinary Kriging	درونیابی Bayesian Kriging
pH	۰/۶۳	۰/۵۹	۰/۶۳	۰/۶۷
T	۰/۷۷	۰/۷۳	۰/۷۵	۰/۷۹
DO	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۵۵	۰/۵۶
TDS	۰/۶۲	۰/۵۸	۰/۶۳	۰/۶۴
EC	۰/۶۴	۰/۶۳	۰/۶۴	۰/۶۵
BOD	۰/۴	۰/۳۸	۰/۴۰	۰/۴۵
COD	۰/۳۷	۰/۳۹	۰/۴۲	۰/۴۷
سولفات	۰/۴	۰/۴۲	۰/۴۱	۰/۴۷
نیتريت	۰/۵۶	۰/۴۹	۰/۵۴	۰/۵۵
نیترات	۰/۵۹	۰/۵۶	۰/۵۹	۰/۶۷

جدول (۳): ضریب تبیین بین مقدار مشاهده شده و برآوردی در درونیابی شبکه فاضلاب در مرحله سوم نمونه‌برداری

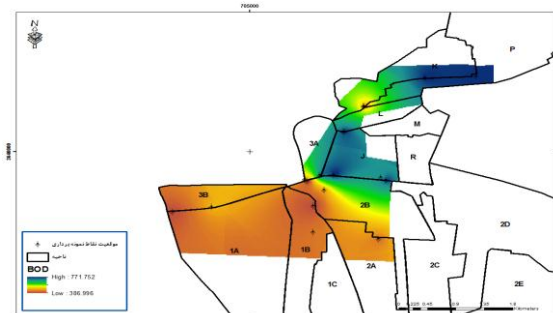
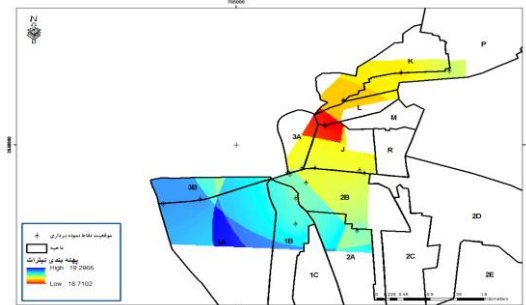
نام پارامتر کیفی	درونیابی IDW	درونیابی RBF	درونیابی Ordinary Kriging	درونیابی Bayesian Kriging
pH	۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۸۴	۰/۸۷
T	۰/۹۰	۰/۹۲	۰/۹۴	۰/۹۵
DO	۰/۶۲	۰/۶۶	۰/۶۸	۰/۷۲
TDS	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۷۲	۰/۷۵
EC	۰/۷۱	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۸۰
BOD	۰/۵۷	۰/۵۵	۰/۶۲	۰/۶۳
COD	۰/۵۹	۰/۶۳	۰/۶۶	۰/۷۰
سولفات	۰/۵۱	۰/۵۵	۰/۶۰	۰/۶۱
نیتريت	۰/۶۶	۰/۵۸	۰/۶۷	۰/۷۴
نیترات	۰/۷۱	۰/۷۳	۰/۷۶	۰/۸۵

نتایج پهنه‌بندی پارامترهای کیفی در شبکه فاضلاب

با توجه به نتایج استخراجی از ارزیابی واریوگرام‌ها و انتخاب روش بیزین کریجینگ به عنوان روش مناسب جهت درونیابی در شبکه‌های فاضلاب، پهنه‌بندی پارامترهای کیفی در سه مرحله نمونه‌برداری انجام شد (شکل‌های (۳۷) تا (۴۶)).

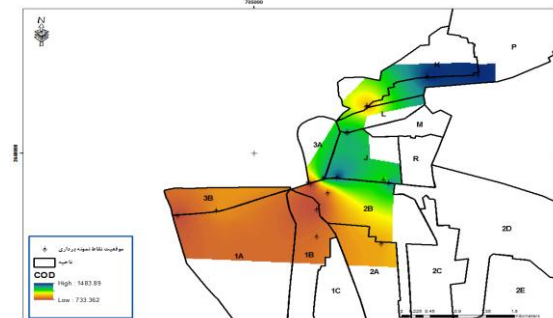
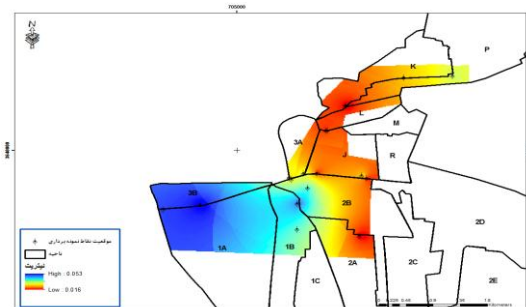


شکل (۴۰): پهنه‌بندی EC پس از سه نوبت نمونه‌برداری با روش درونیابی کریجینگ



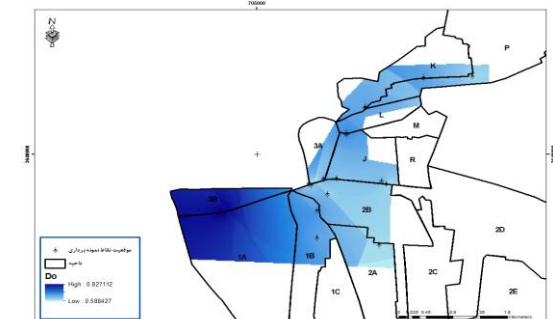
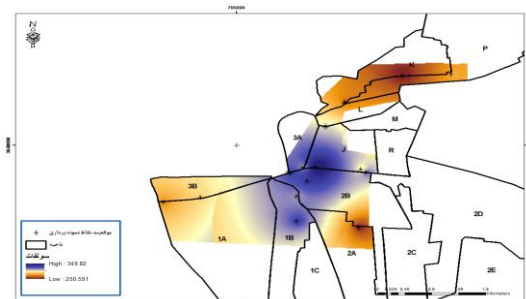
شکل (۳۷): پهنه‌بندی BOD پس از سه نوبت نمونه‌برداری با روش درونیابی کریجینگ

شکل (۴۱): پهنه‌بندی نیترات پس از سه نوبت نمونه‌برداری با روش درونیابی کریجینگ



شکل (۳۸): پهنه‌بندی COD پس از سه نوبت نمونه‌برداری با روش درونیابی کریجینگ

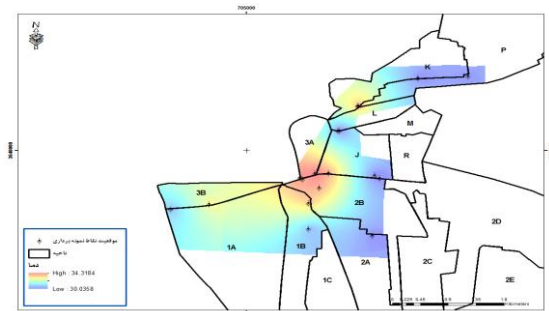
شکل (۴۲): پهنه‌بندی نیتريت پس از سه نوبت نمونه‌برداری با روش درونیابی کریجینگ



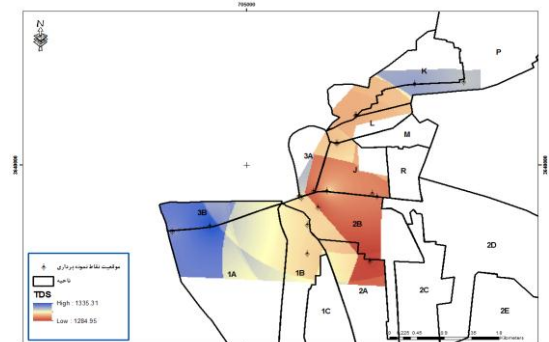
شکل (۳۹): پهنه‌بندی DO پس از سه نوبت نمونه‌برداری با روش درونیابی کریجینگ

شکل (۴۳): پهنه‌بندی سولفات پس از سه نوبت نمونه‌برداری با روش درونیابی کریجینگ

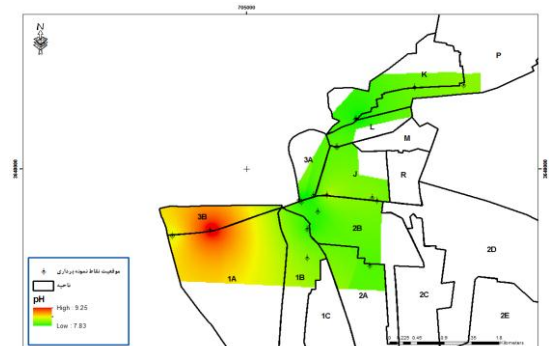
را داشته و با توجه به بالا بودن غلظت BOD در تمام شبکه به صورتی که استاندارد لازم برای این غلظت ۲۵۰ میلیگرم در لیتر تعریف شده، نیازمند یک سیستم مدیریتی جهت ایمن‌سازی شبکه فاضلاب شهر بیرجند می‌باشد. همچنین با توجه به بالا بودن BOD، غلظت COD نیز بالا می‌باشد. تحلیل سایر پارامترهای کیفی نشان می‌دهد که روند انتقال بار آلودگی از نقاط با ارتفاع بیشتر به سمت نقاط با ارتفاع کمتر در جریان می‌باشد و علاوه بر آن حجم آلودگی و بار آلودگی بسیار زیادی در شبکه‌های فاضلاب و بخصوص در شبکه‌های فرعی در جریان است که این موارد می‌تواند به عنوان یک معضل بزرگ زیستی در سالیان آتی تلقی شود. با توجه به تامین آب شرب این شهر از منابع آب زیرزمینی و احتمال آلودگی آبخوان توسط بخش فرسوده شبکه فاضلاب نیاز مبرم به یک تصمیم مدیریتی صحیح جهت رفع این مشکل وجود دارد. به همین دلیل لازم است تا نسبت به تعویض خطوط فرسوده اقدام فوری صورت گیرد. بدیهی است که شبکه جمع‌آوری فاضلاب در تصفیه فاضلاب نقش خاصی ایفا نمی‌کند، با این حال اطمینان از صحت انتقال و عدم انتشار آلودگی به خاک و آب زیرزمینی و همچنین طراحی شبکه به نحوی که فاضلاب جمع‌آوری شده در کوتاهترین زمان ممکن به محل تصفیه‌خانه برسد، از ضرورت‌های مدیریتی می‌باشد. همانطور که تابش و مدنی در سال ۲۰۰۶ اشاره داشته‌اند، عملکرد سامانه‌های جمع‌آوری و انتقال فاضلاب بر میزان تاب‌آوری جامعه اثرگذار است (۱۹). نتایج این تحقیق با مطالعه صورت گرفته توسط خوان گارسیا و همکاران در سال ۲۰۱۷ مطابقت دارد. چرا که آنان نیز بیان داشتند جلوگیری از این گونه



شکل (۴۴): پهنه‌بندی دما پس از سه نوبت نمونه‌برداری با روش درون‌یابی کریجینگ



شکل (۴۵): پهنه‌بندی TDS پس از سه نوبت نمونه‌برداری با روش درون‌یابی کریجینگ



شکل (۴۶): پهنه‌بندی pH پس از سه نوبت نمونه‌برداری با روش درون‌یابی بیزین کریجینگ

نتیجه‌گیری

نتایج پهنه‌بندی غلظت پارامترهای مختلف در شبکه فاضلاب حاکی از بالا بودن غلظت BOD و COD در منطقه شمال شهر و بالا بودن غلظت DO، EC، نیترات، نیتريت، TDS و pH در انتهای شبکه فاضلاب بود. بطور کلی سه عامل درجه حرارت، pH و BOD در خوردگی شبکه‌های فاضلاب نقش کلیدی

- [3] Gedam, A., Mangulkar, S., Gandhi, B., 2016, Prediction of sewer pipe main condition using the linear regression approach, *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 4, 100.
- [4] Vladeanu, G.J., Matthews, J.C., 2019, Consequence-of-failure model for risk-based asset management of wastewater pipes using AHP, *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 10(2), DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000370.
- [5] Guzmán-Fierror, J., Charry, S., González, I., Pena-Heredia, F., Hernandez, N., Luna-Acosta, A., Torres, A., 2020, Bayesian network-based methodology for selecting a cost-effective sewer asset management model, *Water Science and Technology*, 81, 2422.
- [6] Kabir, G., Balek, N.B.C., Tesfamariam, S., 2018, Sewer structural condition prediction integrating bayesian model averaging with logistic regression, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 32(3), DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.000116.
- [7] Daher, S., Zayed, T., Elmasry, M., Hawari, A., 2018, Determining relative weights of sewer pipelines' components and defects, *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 9(1), DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.00002.
- [8] Diao, K., Sweetapple, C., Farmani, R., Fu, G., Ward, S., Butler, D., 2016, Global resilience analysis of water distribution systems, *Water Research*, 106, 383.
- [9] Juan-Garcia, P., Butler, D., Comas, J., Darch, G., Sweetapple, C., Thornton, A., Corominas, L., 2017, Resilience theory incorporated into urban wastewater systems management, State of the art, *Water Research*, 115, 149.
- [10] Mugume, S.N., Gomez, D.E., Fu, G., Farmani, R., Butler, D., 2015, A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems, *Water Research*, 81, 15.
- [11] Amini, M.R., Haji Kandi, H., 2021, Evaluation of sewage collection network vulnerability by Analytical Hierarchy Process method (Case study: sewerage collection network implemented in a part of District 5 of Tehran Municipality), *Iranian Water Research Journal*, 15(2), 41.

اختلالات عملکردی وابسته به بهره‌برداری و نگهداری این زیرساخت است که با شناخت نقطه‌های بحرانی، می‌توان با انجام بازرسی‌های مبتنی بر وضعیت سامانه، عملکرد آن را به میزان قابل توجهی افزایش داده و تاب‌آوری سامانه را بهبود بخشید (۹). از سوی دیگر، نتایج این تحقیق با مطالعه عباسی و همکاران در سال ۱۴۰۲ نیز همسو است. چرا که آنان نیز بر اهمیت شناخت دقیق نقاط قوت و ضعف و همچنین ریسک‌های شبکه فاضلاب شهری برای مدیریت بحران در مواقع اضطراری تاکید داشتند (۲۲). براساس نتایج نهایی خط شبکه فاضلاب در مرکز شهر به عنوان خط بحرانی از نظر کیفی و زیست محیطی معرفی می‌شود و در صورت عدم برنامه‌ریزی سایر خطوط شبکه نیز از حالت بحران به خطر ارتقاء خواهند یافت. براساس نتایج بدست آمده از روش درون‌یابی و بالا بودن غلظت BOD و COD در شبکه فاضلاب‌رو مشخص می‌شود که تجزیه مواد آلی به کندی انجام شده و به منظور سرعت بخشیدن در تجزیه بیولوژیکی اعمال راهکارهای هیدرولیکی در شبکه فاضلاب بسیار مهم خواهد بود تا عمل انتقال با سرعت بیشتری انجام شود و در نتیجه فرآیند تصفیه زودتر آغاز شود.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تعارض منافی برای اعلام ندارند.

منابع

- [1] Bizier, P., 2007, Gravity sanitary sewer design and construction (ASCE manuals and reports on engineering practice no. 60 & WEF manual of practice no. FD-5), 2nd Edition, American Society of Civil Engineers (ASCE).
- [2] Bahmanpour, H., 2015, Wastewater treatment, Islamic Azad University, Shahrood Branch, pp. 221. (in Persian)

- Journal of Civil Engineering, 53, 2561. (in Persian)
- [22] Abbasi, O., Hosseini, S.A., Aqebat Bekheir, H., 2023, Evaluation of the pathology of the operation of the sewer collection network with the fishbone theory approach, Journal of Resilient City, 6(2), 35. (in Persian)
- [23] Vaghei, R., 2012, Investigating corrosion in sewage installations and solutions to it, Water and Wastewater Company of Southern Khorasan Province. (in Persian)
- [24] Sousa, V., Ferreira, F., Almeida, N., Saldanha, J., Martins, J., Teixeira, A., 2009, A simplified technical decision support tool for the asset management of sewer networks, Water Asset Management International, 5(1), 3.
- [25] Zug, M., Girard, R., Phan, L., Rossi, L., Bellefleur, D., 1998, COD modelling in sewer networks, Water Science and Technology, 38, 10, 49.
- [26] Bakhshizadeh, F., Jelokhani-Niaraki, M.R., Mahmoudi, S., 2022, Production of potential blockage event map for urban sewer networks using neural network and GIS (Case study: Region 2 of ABFA of Tehran city), Journal of Water and Wastewater, 32(6), 115. (in Persian)
- [27] Anderson, M.P., Woessner, W.W., Hunt, R.J., 2015, Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport, 2nd Edition, Elsevier.
- [28] Herzog, A., 2007, Transient groundwater modeling in Peri-Urban Kampala, Uganda. (Master Thesis), Department of Land and Water Resource Engineering, Sweden.
- [29] Pourhaghi, A., Radmanesh, F., Maleki, A., 2015, Simulation of Delfan-Lorestan aquifer and investigation of management scenarios by using MODFLOW model, Journal of Water and Soil, 29, 886. (in Persian)
- [12] Ghavami, S.M., Borzooei, Z., Maleki, J., 2020, An effective approach for assessing risk of failure in urban sewer pipelines using a combination of GIS and AHP-DEA, Process Safety and Environmental Protection, 133, 275.
- [13] Güçlü, D., Dursun, Ş., 2010, Artificial neural network modeling of a large-scale wastewater treatment plant operation, Bioprocess and Biosystems Engineering, 33, 1051.
- [14] Hekmatian, A., Eshtehardiha, H., 2010, Pretreatment of sewage in sewage treatment plants is a new step towards reducing costs and increasing the efficiency of sewage treatment plants, 3rd National Conference on Operation and Maintenance of Water and Waste Water Systems, Shahid Beheshti University, 23 February, Tehran, Iran. (in Persian)
- [15] Hvitved-Jacobsen, T., Vollertsen, J., Nielsen, A.H., 2001, Sewer processes - microbial and chemical process engineering of sewer networks, 1st Edition, CRC Press.
- [16] Liang, L.Y., Thompson, R.G., Young, D.M., 2004, Optimizing the design of sewer networks using genetic algorithms and tabu search, Engineering, Construction and Architectural Management, 11(2), 101
- [17] Khani, M.R., Yaghmayian, K., Hojati, M., 2015, Wastewater engineering: Treatment and reuse (first part), (Translation), Authors: Metcalf and Eddy, 2nd Edition, Khaniran Press. (in Persian)
- [18] Ranković, V., Radulović, J., Radojević, I., Ostojić, A., Čomić, L., 2010, Neural network modeling of dissolved oxygen in the Gruža reservoir, Serbia, Ecological Modeling, 221, 1239.
- [19] Tabesh, M., Madani, S., 2006, A performance indicator for wastewater collection systems, Water Practice & Technology, 1(4), wpt2006079.
- [20] Kamali, B., Ziaei, A.N., Beheshti, A.A., Farmani, R., 2021, Global resilience analysis in urban wastewater collection networks (Case study: Valiasr town, Torbat Heydariyeh), Journal of Hydraulics, 16(3), 55. (in Persian)
- [21] Omid Arjenaki, M., Zarif Sanayei, H.R., Heidarzadeh, H., 2021, Investigation of performance and determination of optimal dimensions of surface runoff collection network using SWMM model, Amirkabir

“Research article”

Zoning of wastewater quality fluctuations in the Birjand city collection network

Hooman Bahmanpour^{1*}, Farkhondeh Ahrari²

¹Department of HSE, Sha. C., Islamic Azad University, Shahrood, Iran

²Department of Chemical Engineering, Sha. C., Islamic Azad University, Shahrood, Iran

*Corresponding author: h.bahmanpour@srbiau.ac.ir

(Received: 7 February 2025, Accepted: 27 March 2025)

Abstract

This research aimed to investigate the quality status of the Birjand city wastewater network and develop a zoning model. Over three sampling periods, 10 quality parameters were measured at 19 points within the urban wastewater network. Following statistical analysis, variogram analysis was conducted using GS+ software to facilitate interpolation methods. Appropriate zoning was then performed using the Cross Validation method with ArcGIS 10.1 software and the Geo-statistical analyst toolbox. To determine the most suitable estimation method, sensitivity analysis was conducted using two statistical approaches. Correlation analysis was performed using the Spearman method, which consistently demonstrated the superiority of the Bayesian Kriging method in zoning accuracy over other methods. The zoning results obtained through Bayesian Kriging indicated high BOD and COD concentrations in the northern region of the city, along with elevated EC levels, increased nitrate, decreased nitrite, and high TDS and pH at the endpoint of the sewage network. The presence of high BOD and COD concentrations suggests slow organic matter decomposition. To accelerate biological decomposition, implementing management solutions, particularly hydraulic system improvements in the sewage network of Birjand, is crucial to initiating the treatment process earlier.

Conflict of interest: None declared.

Key words: Wastewater network, Interpolation, Sewage zoning, Birjand



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره ۱، شماره ۴، پیاپی ۴
زمستان ۱۴۰۳، صفحات ۴۶-۳۳

"مقاله پژوهشی"

مقایسه اثر منابع آلودگی خاک بر پذیرفتاری مغناطیسی خاک در کلان‌شهرها (مطالعه موردی: منطقه ۶ تهران)

فرناز قبادی^۱، شهرزاد خرم‌نژادیان^{۲*}، صدرالدین علیپور^۳

^۱دانش‌آموخته دکتری محیط زیست، گروه محیط زیست، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران

^۲دانشیار گروه محیط زیست، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران

^۳سازمان مدیریت پسماند، شهرداری تهران، تهران، ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: shkhoramnejad@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۱، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹)

چکیده

آلاینده‌ها از منابع مختلف به خاک وارد می‌شوند و بر خواص فیزیکوشیمیایی خاک اثر می‌گذارند. وجود فلزات سنگین در خاک احتمال ورود آن‌ها به زنجیره غذایی را بالا برده است. منابع صنعتی و حمل و نقل نقش عمده‌ای در ورود این فلزات به خاک دارند. هدف این پژوهش که در سال ۱۴۰۰ در منطقه ۶ شهرداری تهران صورت پذیرفت تعیین ارتباط مابین تجمع فلزات سنگین ناشی از منابع مختلف بر پذیرفتاری مغناطیسی خاک بود. به این منظور ۱۸ نقطه بصورت تصادفی در نقاط مختلف منطقه برای نمونه‌برداری انتخاب شد. با استفاده از دستگاه جذب اتمی مقادیر عناصر سنگین کروم، کادمیم، سرب و آرسنیک اندازه‌گیری گردید. پذیرفتاری مغناطیسی در این نقاط نیز بررسی گردید. بیش‌ترین میزان آلودگی خاک مربوط به عنصر سرب (38 mg/kg) و کم‌ترین مقدار مربوط به کادمیم (0.04 mg/kg) بود. نتایج نشان داد که بین پذیرفتاری مغناطیسی و چگالی ذرات مواد آلی همبستگی وجود ندارد. پذیرفتاری مغناطیسی با کروم همبستگی نداشت اما با کادمیم و آرسنیک رابطه مستقیم داشت و با سرب رابطه معکوس داشت.

واژه‌های کلیدی: ذرات خاک، فلزات سنگین، آلودگی، محیط شهری، ترافیک

مقدمه

آلودگی خاک یکی از چالش‌های مهم دنیای امروز است. لایه رویی خاک با محیط در ارتباط مستقیم می‌باشد و از روان آب‌ها، آلودگی هوا، نشست‌های اتمسفری و ... تاثیرپذیر است.

آلودگی فلزات سنگین در محیط زیست مشکلات گسترده‌ای ایجاد می‌کند. فلزات سنگین موجود در خاک که توسط گیاهان جذب می‌شوند امکان دارد که وارد زنجیره غذایی شوند و سلامت افراد جامعه را به خطر بیندازند (۱). فلزات سنگین در محیط پراکنده‌اند. عناصر سنگین از طریق معدن، فرآوری سنگ معدن، سدهای باطله، سوخت‌های فسیلی و فعالیت‌های صنعتی وارد محیط می‌شوند (۲). فراهمی زیستی فلزات سنگین سبب جذب آن‌ها توسط گیاهان می‌گردد (۳). برخی از آن‌ها بصورت میکرونوترینت برای بدن ضروری هستند و تعدادی از آن‌ها برای موجودات زنده سمی می‌باشند (۴). با توجه به سمیت فلزات سنگین برای موجودات زنده، به این ترتیب طبقه‌بندی شده‌اند: $Hg > Cu > Zn > Ni > Pb > Cd > Cr > Sn > Fe > Mn > Al$ (۵).

دینامیک فلزات سنگین در خاک و جذب آن‌ها توسط گیاهان تحت تاثیر خواص خاک می‌باشد که در فراهمی زیستی عناصر نقش کلیدی دارد. تحرک و جذب فلزات سنگین تحت تاثیر مواد آلی و معدنی خاک قرار می‌گیرد. به نظر می‌رسد که سن خاک نقش مهمی در فراهمی زیستی فلز برای گیاهان دارد (۴).

قرار گیری در معرض ترکیبات کادمیوم، سرب و جیوه به‌ویژه در دوران رشد و دوران نوزادی خطرات غیر قابل جبران دارد، زیرا باعث تغییرات سوء در سیستم اعصاب مرکزی می‌گردد. سرب سبب

بیماری‌های قلبی عروقی می‌شود، بیوستز هموگلوبین و متابولیسم ویتامین D را مختل می‌کند و در عملکرد کلیه، کبد و سیستم ایمنی و تولید مثل اختلال ایجاد می‌کند. آرسنیک دارای اثرات سرطان‌زایی، پوستی و عصبی است و باعث بیماری‌های قلبی عروقی، اختلالات عروق محیطی، کم خونی و اختلال در عملکرد دستگاه تناسلی می‌شود (۶). پذیرفتاری مغناطیسی میزان مغناطیسی شدن یک جسم در میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. پذیرفتاری مغناطیسی که از آن به عنوان قابلیت مغناطیسی شدن نیز یاد می‌شود به درجه‌ای گفته می‌شود که یک ماده به واسطه نوع کانی‌های مغناطیسی و غلظت آن‌ها که در نمونه وجود دارد، میدان مغناطیسی معینی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در خاک‌هایی نظیر خاک‌های پایدار هر چه از اعماق خاک به طرف سطح نزدیک می‌شویم میزان پذیرفتاری مغناطیسی افزایش می‌یابد (۷). فرایندهایی نظیر تغییر شکل ژئوشیمیایی آهن، زمین ساختی اقلیمی و خاک ساختی از جمله فرایندهای موثر در پذیرفتاری مغناطیسی می‌باشند. بررسی پذیرفتاری مغناطیسی از جمله روش‌های سریع و مفید جهت بررسی تغییرات ویژگی‌های رسوبی از جمله کانی‌شناسی و ... می‌باشد. از این رو در فرایند پایش تغییرات رسوب در پژوهش‌های محیطی، بررسی پذیرفتاری مغناطیسی امری ضروری می‌باشد (۸). پذیرفتاری مغناطیسی به ترکیب، شکل و اندازه بلورهای کانی‌های مغناطیسی وابسته است (۹). اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی روشی برای شناختن آلاینده‌های موجود در خاک می‌باشد (۱۰).

در تحقیقی که توسط Lecoanet در سال ۲۰۰۳ انجام شد با استفاده از پتانسیل مغناطیسی آلودگی و

روش کار

- منطقه مورد مطالعه

شهر تهران به لحاظ موقعیت جغرافیایی در $۵۱^{\circ} ۸'$ تا $۵۱^{\circ} ۳۷'$ طول شرقی و $۳۴^{\circ} ۳۵'$ تا $۳۵^{\circ} ۵۰'$ عرض شمالی قرار گرفته است. ارتفاع این شهر از سطح دریا از ۱۱۰۰ متر در جنوب تا ۱۷۰۰ متر در شمال در نوسان می باشد (سازمان زمین شناسی، ۱۳۸۹). منطقه ۶ شهرداری تهران، یکی از مناطق پرتدد می باشد که دارای کاربری های آموزشی، اداری، مسکونی و تجاری می باشد. جدول (۱) مشخصات نقاط نمونه برداری از خاک در منطقه ۶ شهری تهران در سال ۱۴۰۰ را نشان می دهد.

منابع انتشار آن در خاک های رویی و زیرین ارزیابی گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که در پروفیل خاک با افزایش عمق پذیرفتاری مغناطیسی افزایش می یابد که بدلیل وجود کانی های مغناطیسی است (۱۱).

در پژوهشی که در اقلیم خشک انجام شد رابطه میان فلزات سنگین در لایه رویی خاک شهری با پذیرفتاری مغناطیسی بررسی شد. نتایج نشان داد که از نتایج مگنتومتريک می توان برای تعیین آلودگی فلزات سنگین در خاک استفاده نمود (۱۲). در تحقیقی که در شهر هانگژو چین انجام گرفت مشخص گردید که بین تجمع روی، مس، کادمیم و سرب با خواص مغناطیسی همبستگی مثبت وجود دارد (۱۳).

در این پژوهش ارتباط میان میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک و حضور عناصر سنگین ناشی از منابع آلاینده در منطقه ۶ شهر تهران بررسی شده است.

جدول (۱): مشخصات نقاط نمونه برداری از خاک در منطقه ۶ شهری تهران در سال ۱۴۰۰

نقاط	آدرس	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	پمپ بنزین وصال	536256.260	3950909.480
۲	بیمارستان امام خمینی	534353.100	3951459.860
۳	پمپ بنزین مسجد امیر	535251.880	3952677.250
۴	پل گیشا	534574.520	3953528.120
۵	پمپ بنزین میرزای شیرازی	537596.520	3953037.372
۶	پمپ بنزین یوسف آباد	536625.363	3955432.458
۷	کارواش و معاینه فنی بیهقی	538034.818	3955043.430
۸	پارک سوار بیهقی	537811.893	3955027.726
۹	پمپ بنزین پارک ساعی	537152.047	3954388.052
۱۰	پمپ بنزین ولی عصر	536927.913	3952717.134
۱۱	میدان ولی عصر	536847.986	3952034.138
۱۲	پمپ بنزین حکیم	535439.590	3955459.361
۱۳	بازيافت پسماند شهری	537853.562	3954822.345
۱۴	پمپ بنزین میدان فردوسی (قرنی)	537894.987	3951002.206
۱۵	نظامی گنجوی	536864.162	3955716.718
۱۶	ساعی	537084.907	3954887.568
۱۷	لاله	535624.368	3951878.193
۱۸	افریقا - رسالت	537767.303	3955327.333

– اندازه‌گیری فلزات سنگین

بعد از برداشت نمونه‌ها، در ظرف پلاستیکی مخلوط و در نهایت در کیسه پلاستیکی دردار ریخته شده و به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه‌های خاک در هوای آزاد و همچنین پس از ۲۴ ساعت در آون در دمای ۴۰ سانتی‌گراد خشک شده از الک ۶۳ میکرون گذرانده شدند. نمونه‌های خاک در دمای محیط خشک شدند و پس از الک کردن برای هضم به آن‌ها اسید فلوئوریدریک اضافه شد. پس از این مرحله هضم، به نمونه‌ها تیزاب سلطانی اضافه گردید و مجدداً عملیات هضم شیمیایی ادامه یافت. در نهایت حجم نمونه را بوسیله آب مقطر به ۲۰ میلی‌لیتر رسید و از کاغذ صافی عبور داده شد و سپس به دستگاه تزریق گردید. غلظت فلزات سنگین با دستگاه جذب اتمی مدل پرلین تعیین گردید. پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌ها با استفاده از

دستگاه Bartington MS2 Dual Frequency Sensor

Bartington MS Dual-Frequency Sensor و حسگر Ms2B در دو فرکانس ۰/۴۶ و ۴/۶ کیلوهرتز قرائت شد. به منظور کاهش مقدار خطای آزمایش، برای هر نمونه سه قرائت انجام و در نهایت میانگین قرائت‌ها به عنوان نتیجه نهایی پذیرفتاری مغناطیسی هر نمونه گزارش شد.

تحلیل آماری با کمک نرم‌افزار spss انجام شد. از نرم‌افزار arc-gis برای تهیه نقشه پهنه‌بندی استفاده شد.

نتایج و بحث

جدول (۲) پارامترهای تشکیل دهنده خاک در منطقه ۶ را نشان می‌دهد. چگالی ذرات، درصد مواد تشکیل دهنده خاک، میزان مواد آلی خاک اندازه‌گیری شدند.

جدول (۲): خصوصیات اندازه‌گیری شده خاک محل نمونه‌برداری در منطقه ۶ شهر تهران

نقاط	pH	Clay%	Silt%	Sand%	چگالی ذرات Gs (g/cm ³)	مواد آلی OM %	جرم مخصوص حقیقی	پتاسیم	سدیم	منیزیم	کلسیم
۱	۷/۸۶	۱۰	۲۵	۶۵	۲/۳۶	۸/۲۱	۲/۳۶	۳۹/۱	۱۸۵	۱۹۸	۷۹۲
۲	۷/۸۵	۱۰	۲۲	۶۸	۲/۴۴	۷/۲۱	۲/۴۴	۱۷/۸	۱۱۰	۱۳۸	۵۵۰
۳	۷/۴۳	۸	۲۲	۷۰	۲/۱۴	۱۲/۹۴	۲/۱۴	۶۲	۵۶۰	۳۷	۹۸۸
۴	۷/۳۶	۱۵	۲۳	۶۲	۲/۳۲	۹/۵۱	۲/۳۲	۱۰/۳	۱۰۰	۷۹	۲۱۸
۵	۷/۶۶	۰	۲۶	۷۴	۲/۷۱	۵/۵۶	۲/۷۱	۴/۲	۶۲	۱۲۸	۲۴۸
۶	۷/۶۴	۱۵	۲۴	۶۱	۲/۵۷	۷/۱۲	۲/۵۷	۶/۸	۸۰	۹۹	۴۴۶
۷	۷/۴	۰	۰	۱۰۰	۲/۶۲	۴/۸۴	۲/۶۲	۲۴/۹	۸۱/۸	۲۲۵	۹۰۰
۸	۷/۵۳	۲۳	۰	۷۷	۲/۴	۱۳/۴۲	۲/۴	۸/۳	۱۲۰	۶۲	۳۶۳
۹	۷/۵۴	۹	۲۰	۷۲	۲/۵۱	۸/۱۲	۵۱/۲	۲۸/۴	۹۲	۱۶۹	۷۵۲
۱۰	۷/۶۳	۱۲	۲۲	۶۶	۲/۴۵	۶/۳۷	۲/۴۵	۱۲/۵	۲۱۰	۱۷۵	۴۵۰
۱۱	۷/۸	۰	۰	۱۰۰	۲/۵۳	۹/۰۳	۲/۵۳	۱۹/۳	۱۲۰	۷۵	۴۲۵
۱۲	۷/۳۴	۲۳	۰	۷۷	۲/۴۳	۷/۲۸	۲/۴۳	۱۴/۵	۱۸۷/۵	۳۸	۲۲۵
۱۳	۷/۴۷	۳۰	۰	۷۰	۵۵/۲	۶/۸۵	۲/۵۵	۴/۵	۷۱/۴	۶۳	۳۲۵
۱۴	۷/۶۶	۸	۲۲	۷۰	۲/۱۴	۷/۲۱	۲/۴	۱۰/۳	۱۰۰	۳۷	۲۱۸
۱۵	۷/۶۴	۱۵	۲۳	۶۲	۲/۳۲	۱۲/۹۴	۲/۵۱	۴/۲	۶۲	۷۹	۲۴۸

ادامه جدول (۲):

۱۶	۷/۴	۰	۲۶	۷۴	۲/۷۱	۹/۵۱	۲/۴۵	۶٫۸	۸۰	۱۲۸	۴۴۶
۱۷	۷/۵	۱۵	۲۴	۶۱	۲/۵۷	۵/۵۶	۲/۵۳	۱۲/۵	۸۱٫۸	۹۹	۲۱۰
۱۸	۷/۳۴	۰	۰	۹۰	۲/۶۲	۴/۸۴	۲/۴۳	۱۹/۳	۶۹/۸	۷۸	۲۵۱

بیش‌ترین میزان کلسیم اندازه‌گیری شده مربوط به پل گیشا می‌باشد. اسیدیته این منطقه نزدیک به خنثی و متمایل به قلیایی می‌باشد. خاک بطور مستقیم یا غیرمستقیم رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مهم‌ترین نقش pH خاک کنترل حلالیت عناصر غذایی در خاک می‌باشد. به عبارت دیگر قابلیت جذب عناصر غذایی وابستگی زیادی به pH خاک دارد. عناصر غذایی در pHهای مختلف، حلالیت‌های متفاوتی دارند. هر گیاهی یک محدوده pH خاص و مناسبی را تحمل می‌کند که اگر pH خاک کم یا زیاد باشد رشد و نمو گیاه را دچار مشکل می‌کند. بسیاری از خاک‌های ایران قلیایی هستند که این سبب عدم دسترسی گیاهان به عناصر بسیار ضروری مانند آهن، فسفر و روی می‌گردد. در نتیجه با کاهش عملکرد گیاهان به ویژه غلات بر اثر تنش غیرزنده (کمبود عناصر غذایی ضروری) همراه خواهیم بود. در خاک‌های ایران کمبود عناصر ضروری مطرح نیست زیرا این عناصر در خاک هستند و حتی به مقدار زیاد ولی به علت pH بالای خاک باعث غیر قابل جذب بودن آنها می‌شود. به لحاظ فراوانی، کلسیم موجود در پوسته زمین بین کلیه عناصر دارای مقام پنجم و در میان فلزات دارای مقام سوم است. ترکیبات کلسیم ۳/۶۴ درصد از پوسته زمین را تشکیل می‌دهد. کریستال‌های سفید کلسیم، در دمای ۸۱۰°C ذوب می‌شوند و فلز کلسیم در آب و اسید محلول بوده و هیدروکسید و نمک تولید می‌نماید. کلسیم جزء ساختمانی و ثابت کلیه گیاهان بوده و

بصورت‌های جزء ساختمانی و یون فیزیولوژیکی همزمان یافت می‌شود. همچنین یون کلسیم قادر است اثرات سمی یون‌های پتاسیم، سدیم و منیزیم را بلااثر نماید. کلسیم به دلیل وجود در خاک قادر است بر قلیائی کردن آن اثر و متعاقب آن در رویش گیاهان تأثیر داشته باشد. این عنصر در ساختمان بدن حیوانات (در بافت‌های نرم)، مایعات میان بافتی و اسکلت‌بندی یافت می‌شود. استخوان‌های مهره داران حاوی کلسیم، به صورت فلوئورید کلسیم، کربنات کلسیم و فسفات کلسیم می‌باشد، همچنین کلسیم ذاتاً در بسیاری از وظایف بیولوژیکی مهره‌داران، سهیم است. برای غلظت کلسیم، استاندارد خاصی تعریف نشده و این فلز به طور طبیعی در بدن جانداران و گیاهان وجود دارد. جدول (۳) غلظت فلزات سنگین در سطح منطقه ۶ را نشان می‌دهد. کروم بیش‌ترین غلظت را در میان فلزات سنگین داشته و کم‌ترین مقدار غلظت فلزات سنگین مربوط به کادمیم می‌باشد.

جدول (۳): غلظت فلزات سنگین در سطح منطقه ۶

نقاط	As	Cd	Pb	Cr
۱	۱۴/۴۰	۰/۰۴>	۲۵/۰	۱۱
۲	۹/۱۳	۰/۰۴>	۳۵	۱۰
۳	۱۰/۲۰	۰/۰۴>	۳۰	۱۰
۴	۱۶/۴۰	۰/۰۴>	۴۷	۱۷
۵	۵/۱۰	۰/۰۴>	۳۲/۰	۱۶
۶	۱۰/۶۰	۰/۰۴>	۲۷/۰	۸
۷	۱۴/۶۰	۰/۰۴>	۲۸/۰	۱۶
۸	۱۱/۵۰	۰/۰۴>	۳۲/۰	۱۹
۹	۱۰/۹۰	۰/۰۴>	۲۲/۰	۹

ادامه جدول (۳):

۱۰	۲۷/۰	۰/۰۴>	۱۲/۰۰	۱۰
۱۴	۲۸/۰	۰/۰۴>	۱۶/۷۰	۱۱
۱۱	۳۲/۰	۰/۰۴>	۱۳/۴۰	۱۲
۱۶	۲۵/۰	۰/۰۴>	۱۱/۳۰	۱۳
۲۰	۴۹/۰	۰/۰۴>	۱۳/۹۰	۱۴
۱۷	۱۸	۰/۰۴>	۱۲/۹۰	۱۵
۱۴	۳۴	۰/۰۴>	۱۱/۷۰	۱۶
۱۰	۲۷	۰/۰۴>	۱۰/۱۰	۱۷
۱۱	۳۱	۰/۰۴>	۹/۲۰	۱۸

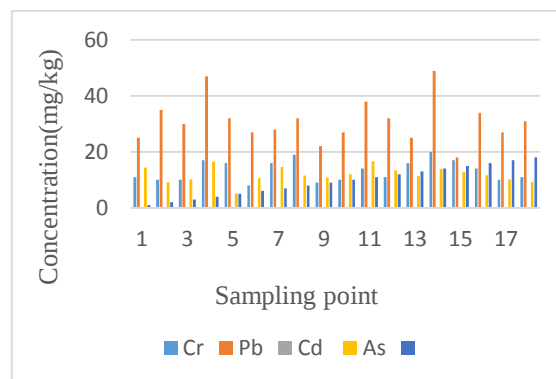
در استاندارد کیفیت منابع خاک سازمان محیط زیست ایران حد مجاز فلز سرب ۳۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم تعیین شده است. غلظت فلز سرب در ایستگاه ۴ و ۱۴ بیش تر از بقیه نقاط می باشد. ایستگاه ۴ یا پل گیشا در کنار چند اتوبان پرتردد قرار دارد و ایستگاه ۱۴ یا میدان فردوسی از نقاط پرتردد شهری می باشد. سرب در محیط های شهری از طریق بنزین به محیط وارد می گردد، بنابراین در منطقه ۶ شهرداری تهران در مناطقی که در مجاورت بزرگراه ها و میادین پرتردد قرار دارند میزان آرسنیک از حد مجاز بیش تر است. می توان گفت منشا سرب در منطقه ۶ تهران وسایط نقلیه می باشند.

کروم بطور طبیعی در محیط زیست وجود دارد و هوازدگی سنگ کرومیت سبب ورود آن به محیط می گردد. احتراق گاز طبیعی و نفت، خوردگی قطعات اتومبیل ها سبب ورود این ماده بطور مصنوعی به محیط می گردد. اکبری و عظیم زاده (۱۳۹۲) استاندارد کروم را 100 mg/kg اعلام نموده اند و این انتخاب به دلیل نبود استاندارد مشخص در ایران است. با توجه به نتایج بدست آمده و مقایسه آن با استاندارد مشخص می گردد میزان کروم در منطقه ۶ در حد استاندارد قرار دارد. کم ترین میزان کروم در مجاورت پمپ بنزین میرزای شیرازی و بیش ترین در مجاورت بیمارستان امام خمینی می باشد.

مقادیر آرسنیک و کادمیم در منطقه نشان می دهد که میزان آن ها در خاک های منطقه بسیار پایین است. روی برای گیاهان در اکثر خاک های کشور کم تر از یک میلی گرم بر کیلوگرم تخمین زده می شود بنابراین گیاهان یا نمی توانند ریزمغذی ها را جذب کنند یا در صورت جذب به دلیل رسوب در آوندها، امکان

آرسنیک یکی از خطرناک ترین عناصر سنگین می باشد و حساسیت ویژه ای در مورد میزان آن در آب و خاک وجود دارد. بیش ترین میزان آرسنیک مربوط به پمپ بنزین حکیم و کم ترین میزان مربوط به پمپ بنزین یوسف آباد است. آرسنیک در خاک پمپ بنزین ها بیش تر از مناطق مجاور است. با مطالعه ترمودینامیکی انواع آرسنیک به این نتیجه رسیدند که جابجایی آرسنیک در خاک به اسیدیته مرتبط است (۱۴).

شکل (۱) غلظت فلزات سنگین در سطح منطقه ۶ را نشان می دهد. سرب در پل گیشا و میدان فردوسی بیش ترین میزان را نشان می دهد. آرسنیک در محدوده پمپ بنزین وصال کم ترین میزان را نشان داده است.



شکل (۱): غلظت فلزات سنگین در سطح منطقه ۶

استفاده از آن وجود ندارد. تشابه الکترونی یون کادمیوم با یون روی موجب می‌شود که کادمیوم به جای روی جذب گیاه شود، لذا در خاک‌هایی که قابلیت استفاده از روی پایین است، جذب کادمیوم توسط ریشه گیاه افزایش می‌یابد.

هرچه بیش‌تر به مراکز پرتردد نزدیک می‌شویم میزان سرب در خاک منطقه افزایش می‌یابد در این مناطق وجود تعمیرگاه‌ها و مراکز صنعتی نیز مزید علت شده است. میزان سرب در منطقه منشاء سوختی دارد. در استاندارد کیفیت منابع خاک سازمان محیط زیست حد مجاز فلز سرب ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلو گرم تعیین شده است. غلظت فلز سرب در همه نمونه خاک‌های

برداشت شده از سطح منطقه چهار شهرداری تهران، دارای غلظتی پایین‌تر از حد مجاز می‌باشد. مقدار کروم در تمامی ایستگاه‌ها پایین‌تر از استاندارد حفاظت محیط زیست می‌باشد. اما به نظر می‌رسد با نزدیک شدن به حریم صنعتی منطقه میزان کروم افزایش می‌یابد.

جدول (۴) پذیرفتاری مغناطیسی خاک در نقاط مختلف منطقه ۶ را نشان می‌دهد. پمپ بنزین وصال و مرکز بازیافت منطقه بیش‌ترین میزان پذیرفتاری را نشان داده‌اند.

جدول (۴): پذیرفتاری مغناطیسی خاک در نقاط مختلف منطقه ۶

نقاط	نام ایستگاه	χ^H ($10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$)	χ^{fd} ($10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$)
۱	پمپ بنزین وصال	۳۴/۱	۰/۹
۲	بیمارستان امام خمینی	۱۴/۱	۰/۷
۳	پمپ بنزین مسجد امیر	۱۷/۹	۱/۱
۴	پل گیشا	۱۷/۷	۱/۳
۵	پمپ بنزین میرزای شیرازی	۱۷/۹	۱/۱
۶	پمپ بنزین یوسف آباد	۱۸/۲	۱/۵
۷	کارواش و معاينه فنی بیهقی	۱۸/۲	۱/۵
۸	پارک سوار بیهقی	۱۴/۳	۱/۶
۹	پمپ بنزین پارک ساعی	۱۹/۱	۱/۹
۱۰	پمپ بنزین ولی عصر	۳۰/۲	۱
۱۱	میدان ولی عصر	۸/۳	۰/۵
۱۲	پمپ بنزین حکیم	۲۸/۲	۱/۷
۱۳	بازیافت پسماند شهری	۲۹/۴	۲/۱
۱۴	پمپ بنزین میدان فردوسی (قرنی)	۲۰/۱	۲/۲
۱۵	نظامی گنجوی	۷/۲	۰/۵
۱۶	ساعی	۵	۰/۶
۱۷	لاله	۶/۳	۰/۷
۱۸	افریقا - رسالت	۱۱/۱۳	۰/۸۸

فرکانس پایین (χ^H)، فرکانس بالا (χ^{fd})

مکانیسم‌های مختلف برای همبستگی فلزات سنگین با آهن اکسیدهای موجود در خاک (جذب و درصد) شناسایی شده‌اند. ذرات اکسید آهن خروجی از صنایع فلزات سنگین را جذب کرده و با آن‌ها ترکیب می‌شوند.

Scholger در سال ۲۰۰۰ دریافت که وجود روی، سرب، نیکل، مس و کروم در رسوبات رودخانه در مقیاس ماکروسکوپی با اندازه‌گیری‌های مغناطیسی مشخص می‌گردد (۱۵). روی، مس، کادمیوم و کروم

تمایل به رسوب با اکسیدهای آهن آبدار را دارند، اگر آلاینده‌های هوا دارای ذرات اکسید آهن باشند فلزات سنگین را به همراه خود رسوب می‌دهند و در پذیرفتاری مغناطیسی مشخص می‌گردند (۱۶).

جدول (۵) رابطه میان پذیرفتاری مغناطیسی با فلزات سنگین خاک را نشان می‌دهد. پذیرفتاری مغناطیسی با کروم همبستگی ندارد اما با کادمیوم و آرسنیک رابطه مستقیم و با سرب رابطه معکوس دارد.

جدول (۵): رابطه میان پذیرفتاری مغناطیسی با فلزات سنگین خاک

Correlations					
		پذیرفتاری مغناطیسی	کروم	سرب	کادمیوم
پذیرفتاری مغناطیسی	Pearson Correlation	1	0.170	-0.315*	0.587**
	Sig. (2-tailed)		0.214	0.019	0.000
	N	55	55	55	55
کروم	Pearson Correlation	0.170	1	0.224	0.470**
	Sig. (2-tailed)	0.214		0.101	0.000
	N	55	55	55	55
سرب	Pearson Correlation	-0.315*	0.224	1	-0.172
	Sig. (2-tailed)	0.019	0.101		0.210
	N	55	55	55	55
کادمیوم	Pearson Correlation	0.587**	0.470**	-0.172	1
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.210	
	N	55	55	55	55
آرسنیک	Pearson Correlation	0.369**	0.255	-0.387**	0.444**
	Sig. (2-tailed)	0.006	0.060	0.004	0.001
	N	55	55	55	55

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

ترتیب نسبی همبستگی بین فلزات سنگین و پارامترهای مغناطیسی نشان دهنده میل نسبی این فلزات به کانی‌های فرو مغناطیسی می‌باشد (۱۶). زمان ماند فلزات در خاک به شدت بستگی به خصوصیات ذاتی خاک دارد که توسط فرایندهای تشکیل خاک کنترل می‌شود (۱۷). جذب سطحی خاک نیز نقش مهمی در جذب فلزات سنگین خاک و تاثیر بر خاصیت مغناطیسی خاک دارد.

مقدار "سطح معنی‌داری" بین پذیرفتاری مغناطیسی و سرب کمتر از ۰/۰۵ است پس بین پذیرفتاری

مغناطیسی و سرب همبستگی وجود دارد. چون مقدار "ضریب همبستگی" بین ۰/۲ و ۰/۴ است پس رابطه ضعیفی برقرار است و از طرفی مقدار "ضریب همبستگی" منفی است پس رابطه بطور معکوس وجود دارد. "سطح معنی‌داری" بین پذیرفتاری مغناطیسی و کروم بیشتر از ۰/۰۵ است پس بین پذیرفتاری مغناطیسی و کروم همبستگی وجود ندارد.

مقدار "سطح معنی‌داری" بین پذیرفتاری مغناطیسی و کادمیوم کمتر از ۰/۰۵ است پس بین پذیرفتاری مغناطیسی و کادمیوم همبستگی وجود دارد. چون

مقدار "ضریب همبستگی" بین ۰/۴ و ۰/۶ است پس رابطه قابل قبولی برقرار است و از طرفی مقدار "ضریب همبستگی" مثبت است پس رابطه بطور مستقیم وجود دارد.

مقدار "سطح معنی‌داری" بین پذیرفتاری مغناطیسی و آرسنیک کم‌تر از ۰/۰۵ است پس بین پذیرفتاری مغناطیسی و آرسنیک همبستگی وجود دارد. چون

مقدار "ضریب همبستگی" بین ۰/۲ و ۰/۴ است پس رابطه ضعیفی برقرار است و از طرفی مقدار "ضریب همبستگی" مثبت است پس رابطه بطور مستقیم وجود دارد.

در تحقیقی که در چین صورت پذیرفت نتایجی مشابه بدست آمده است (۱۳). جدول (۶) رابطه میان پذیرفتاری خاک و نوع خاک را بیان می‌کند.

جدول (۶): رابطه میان پذیرفتاری مغناطیسی خاک و نوع خاک

Correlations					
		پذیرفتاری مغناطیسی	رس	سیلت	شن
پذیرفتاری مغناطیسی	Pearson Correlation	1	0.052	-0.038	0.003
	Sig. (2-tailed)		0.708	0.781	0.982
	N	55	55	55	55
رس	Pearson Correlation	0.052	1	-0.184	-0.497**
	Sig. (2-tailed)	0.708		0.178	0.000
	N	55	55	55	55
سیلت	Pearson Correlation	-0.038	-0.184	1	-0.755**
	Sig. (2-tailed)	0.781	0.178		0.000
	N	55	55	55	55
شن	Pearson Correlation	0.003	-0.497**	-0.755**	1
	Sig. (2-tailed)	0.982	0.000	0.000	
	N	55	55	55	55

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

رس حاوی عناصر سنگین بیش‌تری می‌باشند و از طریق فرسایش و شیب طبیعی به نواحی کم ارتفاع‌تر انتقال می‌یابند.

جدول (۷): رابطه اسیدیته و پذیرفتاری مغناطیسی

Correlations			
		پذیرفتاری مغناطیسی	pH
پذیرفتاری مغناطیسی	Pearson Correlation	1	0.131
	Sig. (2-tailed)		0.341
pH	N	55	55
	Pearson Correlation	0.131	1
	Sig. (2-tailed)	0.341	

مقدار "سطح معنی‌داری" بین پذیرفتاری مغناطیسی و pH بیش‌تر از ۰/۰۵ است پس بین پذیرفتاری مغناطیسی و pH همبستگی وجود ندارد.

شن با پذیرفتاری مغناطیسی همبستگی دارد. از نظر وجود آهن در ذرات خاک تقسیماتی وجود دارد. خواص مغناطیسی ضعیف (رس، آهن-هیدروکسیدها، همتایت، گوتیت و...) که منشاء طبیعی دارند و خواص قوی مغناطیسی (دانه‌های ریز مگنتیت بیش‌تر یا کم‌تر جایگزین شده) که از منابع انسانی مشتق شده‌اند (۱۸).

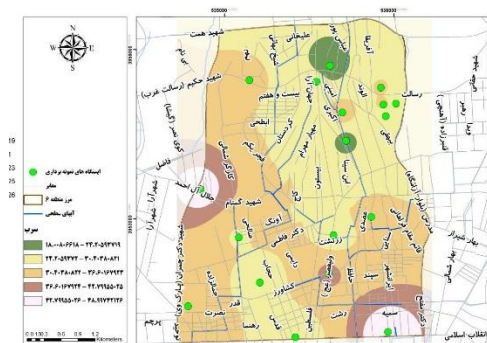
خاک رویی در مناطق شهری حاوی مقادیر زیادی اکسید آهن می‌باشد که جاذب فلزات سنگین هستند بنابراین با استفاده از مگنومتری می‌توان با هزینه پایین‌تری تراکم فلزات سنگین را برآورد نمود (۱۲). فلزات سنگین از طرق مختلفی مثل سوخت فسیلی، صنایع، پسماند و ترافیک به محیط شهری وارد می‌شوند. ذرات

جدول (۹): رابطه پذیرفتاری مغناطیسی با عناصر خاک

پذیرفتاری مغناطیسی		
پتاسیم	ضریب همبستگی	-۰/۰۰۱
	سطح معنی داری	۰/۹۹۳
سدیم	ضریب همبستگی	-۰/۰۳۰
	سطح معنی داری	۰/۸۲۹
منیزیم	ضریب همبستگی	۰/۰۱۷
	سطح معنی داری	۰/۹۰۲
کلسیم	ضریب همبستگی	۰/۰۱۵
	سطح معنی داری	۰/۹۱۵

پذیرفتاری مغناطیسی خاک می‌تواند به طور تقریبی نشان دهنده محتوای کانی‌های آهن‌دار که در خاصیت مغناطیسی خاک دخیلند، باشد (۱۹).

با توجه به جدول (۹) مشاهده می‌شود که مقدار "سطح معنی داری" بین پذیرفتاری مغناطیسی و پتاسیم بیش‌تر از ۰/۰۵ است پس بین پذیرفتاری مغناطیسی و پتاسیم همبستگی وجود ندارد. برای سدیم، منیزیم و کلسیم نیز همبستگی دیده نشد. مقادیر کربنات کلسیم با پذیرفتاری مغناطیسی نسبت عکس دارد (۲۰).



شکل (۱): پهنه‌بندی تجمع سرب در خاک‌های منطقه ۶ شهرداری تهران

شکل (۱) پهنه‌بندی تجمع سرب در منطقه ۶ را نشان می‌دهد. چنانچه در نقشه مشهود است محدوده

جدول (۷) رابطه پذیرفتاری مغناطیسی با پارامترهای خاک را نشان می‌دهد. پارامترهایی مانند مواد آلی موجود در خاک، چگالی ذرات مواد آلی و جرم مخصوص حقیقی چگالی ذرات مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

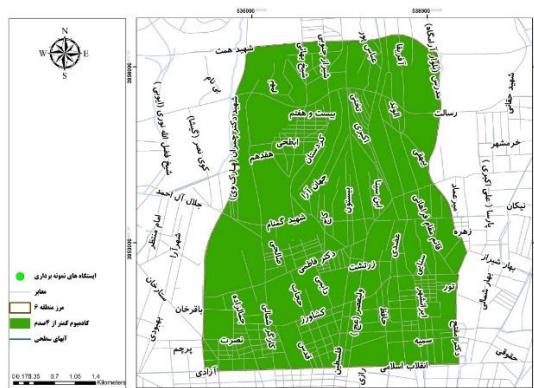
جدول (۸): رابطه پذیرفتاری مغناطیسی با پارامترهای خاک

پذیرفتاری مغناطیسی		
چگالی ذرات مواد	ضریب همبستگی	۰/۱۷۰
آلی	سطح معنی داری	۰/۲۱۴
جرم مخصوص	ضریب همبستگی	-۰/۳۱۵
حقیقی چگالی ذرات	سطح معنی داری	۰/۰۱۹
مواد آلی	ضریب همبستگی	۰/۵۸۷
	سطح معنی داری	۰/۰۰۰

با توجه به جدول (۸) مشاهده می‌شود که مقدار "سطح معنی داری" بین پذیرفتاری مغناطیسی و چگالی ذرات مواد آلی بیش‌تر از ۰/۰۵ است پس بین پذیرفتاری مغناطیسی و چگالی ذرات مواد آلی همبستگی وجود ندارد.

مقدار "سطح معنی داری" بین پذیرفتاری مغناطیسی و جرم مخصوص حقیقی چگالی ذرات بیش‌تر از ۰/۰۵ است پس بین پذیرفتاری مغناطیسی و جرم مخصوص حقیقی چگالی ذرات همبستگی وجود ندارد.

مقدار "سطح معنی داری" بین پذیرفتاری مغناطیسی و مواد آلی بیش‌تر از ۰/۰۵ است پس بین پذیرفتاری مغناطیسی و مواد آلی همبستگی وجود ندارد. همبستگی معنی دار نشان دهنده همبستگی قوی و میل فلزات سنگین به مواد مغناطیسی است (۱۶).



شکل (۴): پهنه بندی تجمع کادمیم در خاک های منطقه ۶ شهرداری تهران

شکل (۴) پهنه بندی کادمیم در سطح منطقه ۶ می باشد. به نظر می رسد که کادمیم دارای پراکندگی یکسانی در سطح منطقه می باشد و منابع آن می توانند اتومبیل ها و کود شیمیایی باشند.

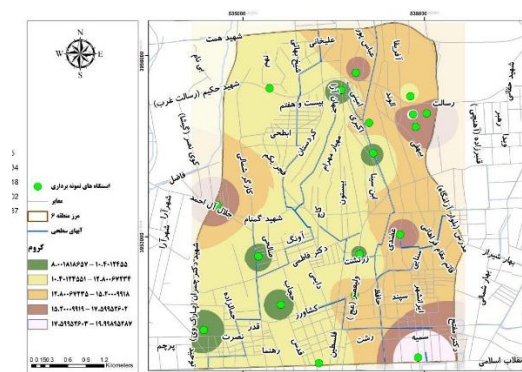
نتیجه گیری

وجود آلودگی خاک در مناطق شهری امری اجتناب ناپذیر است. در این پژوهش رابطه پذیرفتاری مغناطیسی با تجمع برخی فلزات سنگین در منطقه ۶ شهرداری تهران بررسی شد. عناصر سنگین مورد بررسی As، Cr، Cd و Pb بودند. شرایط مغناطیسی در شناسایی حالات ماده معدنی استفاده می گردند. استفاده از پذیرفتاری مغناطیسی راهی کم هزینه تر برای برآورد میزان فلزات سنگین در خاک می باشد. آلاینده های فلزی شهر تهران ناشی از منابع انسانی می باشند. نتایج نشان داد که پذیرفتاری مغناطیسی خاک در منطقه مورد بررسی با کروم همبستگی ندارد اما با کادمیم، آرسنیک همبستگی و رابطه مستقیم و با سرب رابطه معکوس دارد.

منابع

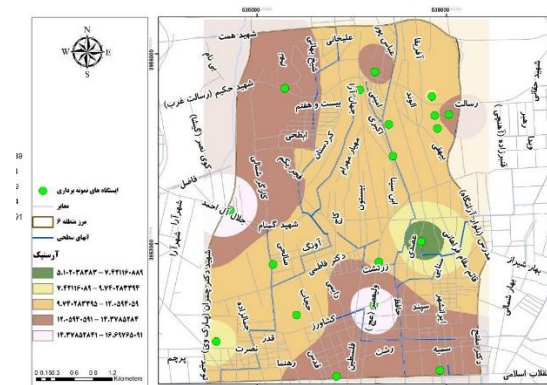
[1] Intawongse, M., Dean, J.R., 2006, Uptake of heavy metals by vegetable plants grown on contaminated soil and their bioavailability in

خیابان سمیه و تقاطع چمران و جلال آل احمد بیش ترین تجمع سرب در خاک را دارند. با توجه به حجم ترافیکی بالا در این مناطق، این آلودگی ناشی از حمل و نقل می باشد.



شکل (۲): پهنه بندی تجمع کروم در خاک های منطقه ۶ شهرداری تهران

شکل (۲) پهنه بندی تجمع کروم در منطقه ۶ را نشان می دهد. میزان کروم در اطراف بزرگراه رسالت و تونل رسالت (تقاطع با کردستان) بیش ترین مقدار را دارد.



شکل (۳): پهنه بندی تجمع آرسنیک در خاک های منطقه ۶ شهرداری تهران

شکل (۳) پهنه بندی تجمع آرسنیک در منطقه ۶ را نشان می دهد. میزان آرسنیک در میدان ولیعصر و تقاطع بزرگراه چمران و جلال آل احمد از سایر نقاط بالاتر می باشد که نشانگر منشا حمل و نقلی است.

- the National Academy of Sciences, 107(7), 2787.
- [10] Canbay, M., Aydin, A., Kurtulus, C. 2010, Magnetic susceptibility and heavy-metal contamination in topsoils along the Izmit Gulf coastal area and IZAYTAS (Turkey), *Journal of Applied Geophysics*, 70, 46.
- [11] Lecoanet, H., Leveque, F., Ambrosi, J.P., 2003, Combination of magnetic parameters: An efficient way to discriminate soil-contamination sources (south France), *Environmental Pollution*, 122, 229.
- [12] Karimi, R., Ayoubi, S., Jalalian, A., Sheikh-Hosseini, A.R., Afyuni, M., 2011, Relationships between magnetic susceptibility and heavy metals in urban topsoils in the arid region of Isfahan, central Iran, *Journal of Applied Geophysics*, 74, 1.
- [13] Lu, S.G., Bai, S.Q., 2006, Study on the correlation of magnetic properties and heavy metals content in urban soils of Hangzhou City, China, *Journal of Applied Geophysics*, 60, 1.
- [14] Sadiq, M., Zaidi, T.H., Mian, A.A., 1983, Environmental behavior of arsenic in soils: Theoretical, Water, Air, & Soil Pollution, 20, 369.
- [15] Scholger, R., Mauritsch, H.J., Brandner, R., 2000, Permian–Triassic boundary magnetostratigraphy from the Southern Alps (Italy), *Earth and Planetary Science Letters*, 176, 495.
- [16] Lu, S.G., Bai, S.Q., Xue, Q.F., 2007, Magnetic properties as indicators of heavy metals pollution in urban topsoils: A case study from the city of Luoyang, China, *Geophysical Journal International*, 171, 568.
- [17] Cornell, R.M., Schwertmann, U, 2003, *The iron oxides: Structure, properties, reactions, occurrences, and uses*, 2nd Edition, Wiley-VCH.
- [18] Georgeaud, V.M., Rochette, P., Ambrosi, J.P., Vandamme, D., Williamson, D., 1997, Relationship between heavy metals and magnetic properties in a large polluted catchment: the Etang de Berre (south of France), *Physics and Chemistry of the Earth*, 22, 211.
- [19] Chaparro, M.A.E., Gogorza, C.S.G., Chaparro, M.A.E., Irurzun, M.A., Sinito, A.M., 2006, Review of magnetism and heavy metal pollution studies of various environments in Argentina, *Earth, Planets and Space*, 58, 1411.
- the human gastrointestinal tract, *Food Additives & Contaminants*, 23, 36.
- [2] Khoramnejadian, S., Azadeh Ranjbar, A., Asemi Zavareh, S., Pendashteh, A., 2021, Determining the accumulation of heavy metals in soil and plants around mines and their bioavailability (Case study: Nakhlak lead mine), *Journal of Environmental Sciences Studies*, 5, 3052. (in Persian)
- [3] Fazeli, G., Karbassi, A., Khoramnejadian, S., Nasrabadi, T., 2019, Evaluation of urban soil pollution: a combined approach of toxic metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), *International Journal of Environmental Research*, 13, 801.
- [4] Zwolak, A., Sarzyńska, M., Szpyrka, E., Stawarczyk, K., 2019, Sources of soil pollution by heavy metals and their accumulation in vegetables: A review, *Water, Air, & Soil Pollution*, 230, 164.
- [5] Filipiak-Szok, A., Kurzawa, M., Szlyk, E., Twarużek, M., Błajet-Kosicka, A., Grajewski, J., 2017, Determination of mycotoxins, alkaloids, phytochemicals, antioxidants and cytotoxicity in Asiatic ginseng (*Ashwagandha*, *Dong quai*, *Panax ginseng*), *Chemical Papers*, 71, 1073.
- [6] Shaheen, N., Irfan, N.M., Khan, I.N., Islam, S., Islam, M.S., Ahmed, M.K., 2016, Presence of heavy metals in fruits and vegetables: Health risk implications in Bangladesh, *Chemosphere*, 152, 431.
- [7] Bazshushtarizadeh, N., Ayoubi, Sh., 2018, Variability of Cesium-137 content in Fereydan reference site and its relationship with some physicochemical and magnetic properties of soil, *Agricultural Engineering*, 41, 1. (in Persian)
- [8] Bagheri, S., Rasouli-Sadaghiani, M.H., Barin, M., Rezaei, E., 2020, Evaluation of some soil quality indices as influenced by the intercropping patterns of bean and moldavian balms, and microbial inoculation, *Journal of Soil and Plant Interactions*, 11(3), 57. (in Persian)
- [9] Michel, F.M., Barron, V., Torrent, J., Morales, M.P., Serna, C.J., Boily, J.F., Liu Q., Ambrosini, A., Cismasu, A.C., Brown Jr., G.E., 2010, Ordered ferrimagnetic form of ferrihydrite reveals links among structure, composition, and magnetism, *Proceedings of*

[20] Moradpour, S., Entezari, M., Ayoubi, S., Naimi, S., 2022, Impacts of land use and geomorphology on some heavy metal concentrations in a part of Zayandehroud dam watershed, Agricultural Engineering, 45, 317. (in Persian)

“Research article”

Comparison of the effect of soil pollution sources on soil magnetic susceptibility in metropolitan cities (Case study: District 6, Tehran)

Farnaz Ghobadi¹, Shahrzad Khoramnejadian^{*1}, Sadraldin Alipour²

¹Department of Environment, Dam.C., Islamic Azad University, Damavand, Iran

²Waste Management Organization, Tehran Municipality

^{*}Corresponding author: shkhoramnejad@yahoo.com

(Received: 31 March 2025, Accepted: 19 May 2025)

Abstract

Pollutants enter the soil from various sources and affect its physicochemical properties. The presence of heavy metals in the soil increases the likelihood of their entry into the food chain. Industrial and transportation sources play a major role in the introduction of these metals into the soil. The aim of this study, conducted in 2021 in District 6 of Tehran Municipality, was to determine the relationship between the accumulation of heavy metals from various sources and the magnetic susceptibility of the soil. For this purpose, 18 points were randomly selected across different parts of the region for sampling. The amounts of heavy elements (chromium, cadmium, lead and arsenic) were measured using an atomic absorption spectrometer, and magnetic susceptibility was also assessed at these locations. The highest level of soil contamination was related to lead (38 mg/kg), while the lowest was related to cadmium (<0.04 mg/kg). The results showed no correlation between magnetic susceptibility and the density of organic matter particles. Magnetic susceptibility was not correlated with chromium, but showed a direct relationship with cadmium and arsenic, and an inverse relationship with lead.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Soil particles, Heavy metals, Pollution, Urban environment, Traffic



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره ۱، شماره ۴، پیاپی ۴
زمستان ۱۴۰۳، صفحات ۵۸-۴۷

"مقاله پژوهشی"

دوپینگ نانوذرات تجاری TiO_2 (UV100) با اوره و بررسی فعالیت نوری آن در حذف یک آلاینده محیط زیست (اسید قرمز ۲۷) تحت تابش نور مرئی

زهره محمودی*

دانش‌آموخته دکتری شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: z.mahmoudi@kimiack.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲)

چکیده

در این تحقیق TiO_2 تجاری به نام UV100 به روش تلقیح با اوره دوپه شده و فعالیت فوتوکاتالیزوری آن تحت تابش نور مرئی مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشخصات نانوذرات دوپه شده بوسیله تکنیک‌های پراش اشعه X (XRD)، اسپکتروسکوپی پراش انعکاسی (DRS)، BET و XPS بررسی شده است. فعالیت فوتوکاتالیزوری نانوذرات TiO_2 (UV100) دوپه شده با اوره با نسبت‌های وزنی مختلف و دماهای کلسیناسیون متفاوت در حذف فوتوکاتالیزوری اسید قرمز ۲۷ که یک نوع رنگ موناوآزوی نساجی است مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد دوپینگ اوره سبب افزایش فعالیت فوتوکاتالیزوری نانوذرات TiO_2 (UV100) تحت تابش نور مرئی می‌شود. این مسئله ناشی از کاهش شکاف طیف نانوذرات تحت تاثیر دوپینگ اوره می‌باشد. TiO_2 (UV100) دوپه شده با اوره به نسبت (۱:۱) و در دمای کلسیناسیون 350°C بیش‌ترین فعالیت فوتوکاتالیزوری را نسبت به سایر نانوذرات دوپه شده نشان می‌دهد. حذف AR27 تحت تابش نور مرئی به مدت ۵۰ دقیقه در حضور نانوذرات TiO_2 (UV100) خالص و TiO_2 (UV100) دوپه شده به ترتیب ۶۵٪ و ۱۰۰٪ است.

واژه‌های کلیدی: TiO_2 (UV100)، دوپینگ با اوره، فعالیت فوتوکاتالیزوری، اسید قرمز ۲۷

مقدمه

در سال‌های اخیر دسته‌ای از روش‌ها موسوم به فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته که در ردیف روش‌های تصفیه شیمیایی محسوب می‌گردند مورد توجه قرار گرفته‌اند. این فرایندها از یک اصل مشترک پیروی می‌کنند که آن تولید رادیکال‌های شدیداً اکسید کننده به ویژه رادیکال‌های هیدروکسل ($^{\circ}\text{OH}$) در دمای معمولی می‌باشد که می‌توانند طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های آلی را از محیط زیست حذف نمایند (۵-۱). فوتوکاتالیز ناهمگن نیز یک شاخه بسیار امیدبخش و آینده‌دار از فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته به شمار می‌رود (۱۰-۶). فوتوکاتالیز به ما این امکان را می‌دهد که از نور خورشید برای نابودی مولکول‌های بسیار سمی استفاده کنیم (۱۱). در فرایندهای فوتوکاتالیز ناهمگن، دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) به عنوان یکی از پرکاربردترین فوتوکاتالیست‌ها شناخته می‌شود. این ماده نه تنها ارزان و غیرسمی است، بلکه به‌طور طبیعی در برابر خوردگی نوری نیز مقاوم بوده و دارای قدرت اکسیداسیون بالایی است (۱۲). اساس فرآیند فوتوکاتالیز ناهمگن به این ترتیب است که اگر ذرات نیمه‌رسانا با انرژی تابشی بیشتر از انرژی شکاف طیف فوتوکاتالیزور مورد تابش قرار بگیرند جفت الکترون و حفره تشکیل می‌شود. تعدادی از این جفت الکترون - حفره‌ها در عرض چند نانوثانیه با آزاد کردن گرما با هم بازترکیب می‌شوند. اما بخشی از جفت الکترون - حفره‌های تولید شده با تولید گونه‌های فعال، آغازگر واکنش‌های اکسیداسیون و احیاء هستند که در نهایت منجر به معدنی‌سازی ترکیبات آلی می‌شوند. الکترون‌های ایجادشده، ماده آلی جذب شده را احیاء می‌کنند و یا با پذیرنده‌های الکترون مانند اکسیژن

جذب شده بر سطح، یا حل شده در آب واکنش داده و آن‌ها را به رادیکال‌های آنیون سوپراکسید احیاء می‌کنند. حفره‌های حاصله نیز قادر هستند مولکول‌های آلی را اکسید نمایند و یا با یون‌های هیدروکسیل و مولکول‌های آب واکنش داده و آن‌ها را به رادیکال‌های هیدروکسیل اکسید کنند. با این حال، یکی از معایب عمده TiO_2 در فوتوکاتالیز، داشتن فاصله باند (شکاف طیف) نسبتاً بزرگ است که باعث می‌شود تنها بخشی کوچک از طیف خورشید جذب شود (۱۳). خورشید به عنوان یک منبع نوری اقتصادی و دوستدار محیط زیست محسوب می‌شود. با توجه به اینکه شار UV در نزدیکی سطح زمین معمولاً بین ۲۰ تا ۳۰ وات بر مترمربع است، خورشید می‌تواند ۰/۲ تا ۰/۳ مول فوتون بر مترمربع بر ساعت را در محدوده ۴۰۰-۳۰۰ نانومتر تولید کند. این فوتون‌ها به طور عمده برای از بین بردن آلاینده‌های آب در راکتورهای فوتوکاتالیستی زیر نور خورشید مناسب هستند (۱۴). دوپینگ TiO_2 با نافلزاتی مانند نیتروژن و گوگرد به‌عنوان یک روش مؤثر برای بهبود عملکرد فوتوکاتالیستی نانوذرات نیمه‌هادی در زیر نور مرئی شناخته می‌شود. بهبود فعالیت فوتوکاتالیستی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در زیر نور مرئی می‌تواند برای کاربردهای بزرگ مقیاس فوتوکاتالیز ناهمگن در زیر نور خورشید مفید باشد (۱۵).

هدف این مطالعه، دوپینگ نانوذرات تجاری TiO_2 (UV100) با اوره برای تولید نانوذرات N- TiO_2 (UV100) با فعالیت فوتوکاتالیستی بالا در حذف یک آلاینده مدل از صنعت نساجی تحت نور مرئی است.

آن را در حمام التراسونیک قرار داده تا سوسپانسیون یکنواخت حاصل گردد. عمل رفلکس را به مدت ۴ ساعت در دمای 80°C انجام داده، بعد از اتمام رفلکس محلول را در دمای اتاق خنک کرده و صاف می‌کنیم سپس شستشو داده و در آون در دمای 80°C به مدت ۱۰ ساعت خشک می‌گردد، پودر به دست آمده به مدت یک ساعت در دمای 350°C کلسینه می‌شود که در نهایت پودر نانوفوتوکاتالیزور N-TiO_2 (UV100) به دست می‌آید. به منظور بررسی تأثیر دمای کلسیناسیون در این روش، نانوفوتوکاتالیزور N-TiO_2 (UV100) با نسبت مطلوب اوره در دماهای 350°C ، 450°C ، 550°C و 650°C کلسینه می‌شود. برای بررسی ساختار و مشخصه‌یابی TiO_2 (UV100) دوپه شده با اوره با نسبت (۱:۱) و کلسینه شده در دمای 350°C که در ادامه مقاله با علامت اختصاری N-TiO_2 (UV100) نشان داده خواهد شد از تکنیک‌های پراش اشعه X (XRD) (Siemens D 5000)، اسپکتروسکوپی پراش انعکاسی (DRS) (Avaspec 2048 TEC as) (spectrometer)، BET (Belsorpmini II) و XPS (Twin Anode Xr3e2) استفاده شده است.

- شرح ساختار فوتوراکتور و روش بررسی فعالیت نوری کاتالیزور در حذف آلاینده

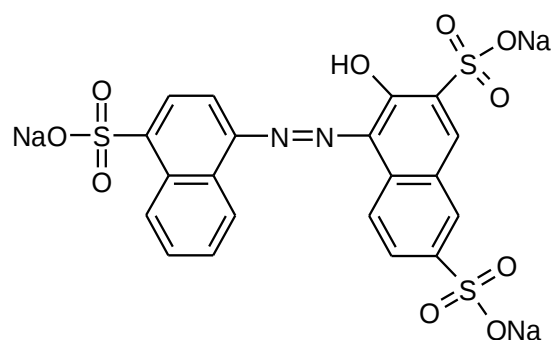
بررسی فعالیت نوری فوتوکاتالیزور سنتز شده در حذف AR27 در یک سیستم فوتوراکتور ناپیوسته متشکل از منبع تغذیه، محفظه چوبی، لامپ مرئی هالوژنی ۳۰۰ وات، راکتور لوله‌ای از جنس کوارتز با حجم ۱۳۰ mL، کپسول گاز اکسیژن و مانومتر

در این تحقیق، تأثیر پارامترهایی مانند نسبت وزن اوره به فوتوکاتالیزور TiO_2 (UV100) و دمای کلسیناسیون در فعالیت فوتوکاتالیزوری نانوذرات N- TiO_2 (UV100) سنتز شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

بخش تجربی

- مواد مورد استفاده

پودر تیتانیوم دی‌اکسید Hombikat UV100 محصول شرکت Sachtleben می‌باشد. اوره و اسید قرمز ۲۷^۱ (AR27) از شرکت مرک (Merck) تهیه شده است. AR27 به عنوان رنگ در صنایع نساجی به کار می‌رود و ساختار آن در شکل (۱) ارایه شده است.



شکل (۱): ساختار مولکولی AR27

- روش تهیه نانوذرات N-TiO_2 (UV100) به روش تلقیح

در این روش برای تهیه نانوذرات N-TiO_2 (UV100) از نانوذرات آماده TiO_2 (UV100) استفاده می‌کنیم به این صورت که مقدار مشخصی از پودر TiO_2 (UV100) (۱ g) را وزن کرده، در داخل بالن ته گرد ریخته و به آن ۳۰ mL آب مقطر اضافه کرده، سپس اوره را با نسبت‌های مولی مورد نظر نسبت به TiO_2 (UV100) به محلول اضافه کرده و به مدت ۱۵ دقیقه

¹ C.I. Acid Red 27

مخصوص اندازه گیری دبی گاز اکسیژن صورت گرفته است.

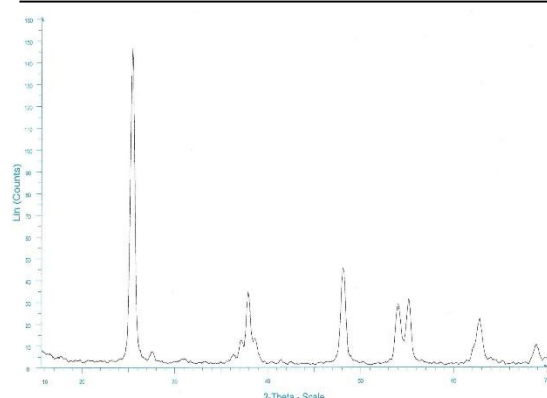
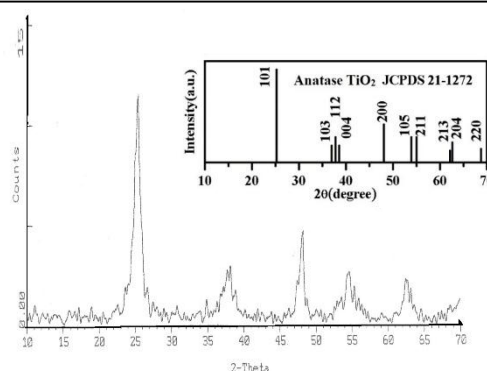
جهت بررسی فعالیت فوتوکاتالیزوری نانوذرات سنتزی، 40 mg از فوتوکاتالیزور تهیه شده را با ترازوی دقیق با دقت 0.0001 گرم (AND) وزن کرده و در داخل یک بالن 100 mL ریخته و سپس 50 mL به آن آب مقطر می افزاییم. بالن مربوطه را به مدت 15 دقیقه تحت امواج التراسونیک (Elma T460/H) قرار می دهیم تا سوسپانسیون فوتوکاتالیزور تهیه شود. سپس 10 mL از محلول مادر AR27 به غلظت 200 mg L^{-1} در داخل بالن ریخته و به حجم می رسانیم. بدین ترتیب سوسپانسیون مورد آزمایش محتوی 20 mg L^{-1} از AR27 به همراه 400 mg L^{-1} از فوتوکاتالیزور و در pH طبیعی محلول در دمای محیطی خواهد بود. غلظت های فوق در تمام آزمایش ها ثابت نگه داشته می شود. سوسپانسیون تهیه شده در مرحله قبل را وارد فوتوراکتور نموده و به مدت 30 دقیقه محلول سوسپانسیون توسط گاز اکسیژن در تاریکی به هم زده می شود تا تعادل جذب - واجذب برقرار گردد. دبی اکسیژن ورودی به سیستم راکتور در حدود mL min^{-1} 0.5^1 تنظیم می شود. به علت تأثیر غلظت اکسیژن در سرعت واکنش های فوتوکاتالیزوری همیشه دبی گاز اکسیژن ورودی به راکتور در مقدار ثابت تنظیم می شود. سپس سوسپانسیون را در برابر اشعه نور مرئی قرار داده و در فواصل زمانی مشخص (10 دقیقه) نمونه برداری کرده و پس از جداسازی نانوذرات کاتالیزور توسط سانتریفیوژ (Hettich EBA 3S) غلظت AR27 با استفاده از جذب نمونه در طول موج 522 nm که طول موج حداکثری این آلاینده می باشد با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر UV-Vis

(Pharmacia Biotech Ultrospec 2000) و همچنین منحنی کالیبراسیون رسم شده، بدست می آید. از روی غلظت باقیمانده میزان درصد حذف AR27 محاسبه و گزارش می گردد.

نتایج و بحث

- مشخصه یابی نانوکاتالیزورهای سنتز شده

طیف XRD نانوذرات در شکل های (۱) و (۲) آورده شده است. شکل (۱) مربوط به TiO_2 (UV100) خالص و شکل (۲) مربوط به N-TiO_2 (UV100) می باشد. فازها و اندازه کریستالی نانوذرات در جدول (۱) گزارش شده است. اندازه کریستالی ذرات با استفاده از فرمول دبای - شرر محاسبه می شود. در طیف های XRD پیک های واقع در 2θ های 25.2° (اصلی)، 38.0° ، 48.2° ، 55.0° و 62.5° با استناد به کارت استاندارد مرجع TiO_2 آناتاز (-JCPDS 21-1272) که در گوشه شکل (۲) نشان داده شده است، مربوط به فاز آناتاز می باشد. نتایج نشان می دهد در نتیجه فرایند دوپینگ، اندازه کریستالی نانوذرات TiO_2 (UV100) افزایش یافته و مقدار بسیار کمی نیز فاز روتیل در کنار فاز آناتاز ظاهر شده است.

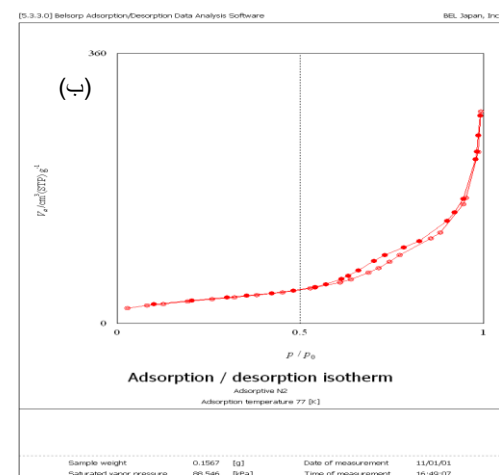
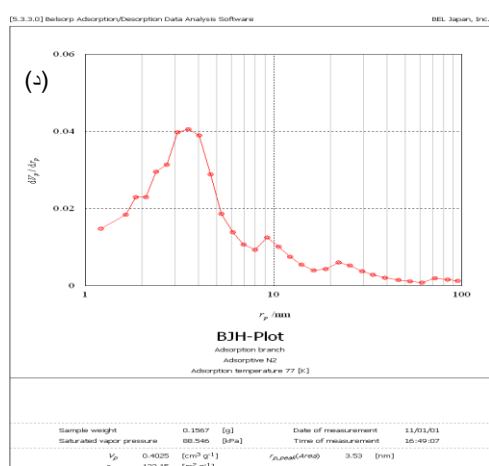
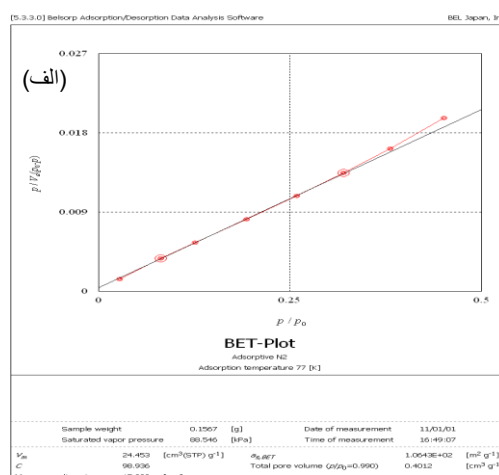
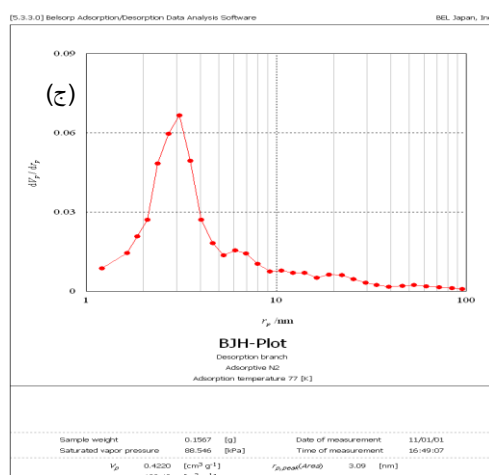
شکل (۲): طیف XRD نانوذرات N-TiO₂ (UV100)شکل (۱): طیف XRD نانوذرات TiO₂ (UV100) خالص

جدول (۱): اندازه و فازهای کریستالی نانوذرات

نوع نانوذره	دمای کلسیناسیون (°C)	مقدار فاز در نانوذره (%)		اندازه کریستالی نانوذره (nm)	
		فاز آناتاز	فاز روتیل	فاز آناتاز	فاز روتیل
TiO ₂ (UV100)	-	۱۰۰	-	۸	-
N-TiO ₂ (UV100)	۳۵۰	۹۶	۴	۱۵	۱۴

جذب- و اجذب گاز نیتروژن مربوط به N-TiO₂ (UV100) در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. همچنین نمودار روش BET در شکل (۳-ب) نشان داده شده است. نمودارهای توزیع اندازه خلل و فرج (جذب و واجذب) نیز در شکل‌های (۳-ج) و (۳-د) نشان داده شده است. نتایج بدست آمده از آنالیزهای BET و BJH نیز در جدول (۲) گزارش شده است.

اندازه سطح ویژه، اندازه و حجم خلل و فرج نانوکاتالیزورهای دوپه شده به روش جذب سطحی گاز نیتروژن در سطح نانوکاتالیزورها تعیین شده است. در این روش ابتدا نمونه‌ها تا ۲۰۰°C حرارت داده می‌شوند تا مواد جذب شده به سطح آن‌ها به صورت گاز خارج شوند، سپس نمونه‌ها در دمای ثابت تحت تاثیر گاز نیتروژن با فشارهای مختلف قرار می‌گیرند و ایزوترم جذب سطحی آن‌ها رسم می‌شود. نمودارهای



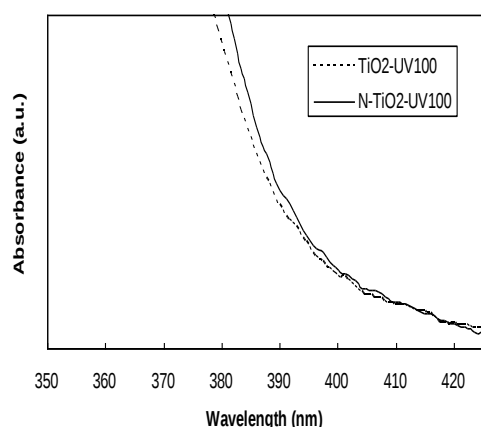
شکل (۳): (الف) ایزوترم جذب سطحی، (ب) نمودار BET، (ج) نمودار BJH (جذب)، (د) نمودار BJH (واجذب) نانوذرات N-TiO₂ (UV100)

جدول (۲): مقدار سطح ویژه و مشخصات خلل و فرج نانوذرات N-TiO₂ (UV100)

نوع ماده	سطح ویژه (m² g⁻¹)	بیشترین توزیع اندازه خلل و فرج (nm)	متوسط اندازه خلل و فرج (nm)	حجم کلی خلل و فرج (cm³ g⁻¹)
		۳/۵۳		
		(جذب)		
N-TiO ₂ (UV100)	۱۰۶/۴۳	۳/۰۹	۱۵/۰۸۰	۰/۴۰۱۲
		(واجذب)		

در حدود $106 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ از نمودار BET حاصل شده است و بیشترین توزیع اندازه خلل و فرج این ذرات در حدود 3 nm می باشد که بیانگر یک ساختاری نزدیک به ساختار میکروپروس برای این ذرات

ایزوترم جذب-واجذب گاز نیتروژن شکل (۳)- (الف) نشان می دهد که نانوذرات N-TiO₂ (UV100) از ایزوترم های نوع (III) طبقه بندی آیوپاک تبعیت می کنند (۱۶). اندازه مساحت سطح برای این نانوذرات



شکل (۴): طیف DRS نانوذرات TiO_2 (UV100) خالص و N- TiO_2 (UV100)

می‌باشد. اندازه مساحت سطح برای نانوذرات N- TiO_2 (UV100) در مقایسه با نانوذرات TiO_2 (UV100) خالص ($350 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد (۱۷).

شکل (۴) طیف DRS مربوط به نانوذرات TiO_2 (UV100) و نانوذرات N- TiO_2 (UV100) می‌باشد. مطابق با نتایج جدول (۳) در نمونه‌های دوپه شده شیفت به سمت طول موج‌های بلندتر و در نتیجه کاهش پهنای شکاف مشاهده می‌شود. این مسئله می‌تواند ناشی از ایجاد شکافهای حدفاصل در بالاتر از نوار والانس TiO_2 باشد که در نتیجه جایگزینی مراکز اکسیدی با مراکز نیتریدی تشکیل می‌شوند (۱۸).

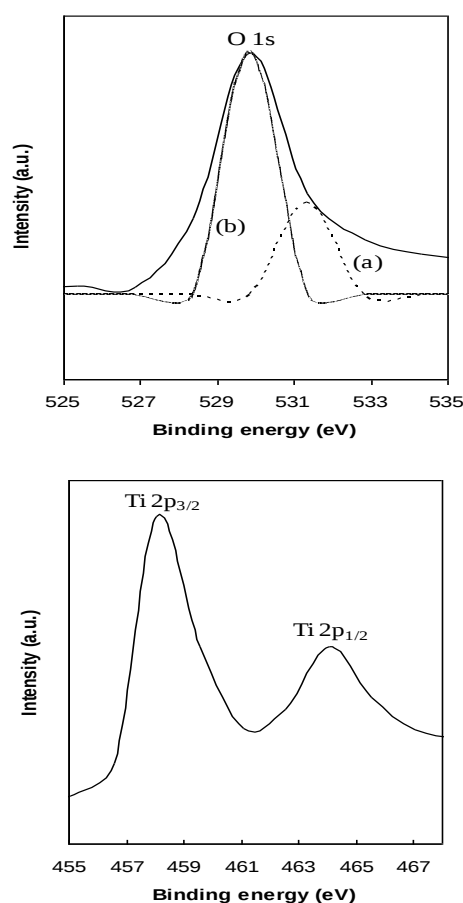
جدول (۳): شکاف انرژی نانوذرات TiO_2 (UV100) خالص و N- TiO_2 (UV100)

انرژی شکاف نواری (eV)	طول موج آستانه جذب (nm)	نوع نیمه رسانا
۳/۱۳	۳۹۶	TiO_2 (UV100)
۳/۱۰	۳۹۹	N- TiO_2 (UV100)

باشد. چرا که انرژی پیوندی N1s در محیط N-Ti-O به مراتب از محیط N-Ti-N بیش‌تر است. با توجه به شکل (۶) انرژی پیوندی بدست آمده برای Ti در حدود 458 eV می‌باشد در صورتی که انرژی پیوندی بدست آمده برای Ti در TiO_2 دوپه نشده در حدود $459/5 \text{ eV}$ می‌باشد (۱۹). کاهش انرژی پیوندی برای Ti می‌تواند ناشی از وارد شدن N به شبکه TiO_2 باشد. به عبارت دیگر یون Ti به محیط الکترونی عناصر همسایه خود حساس می‌باشد و با وارد شدن N با الکترون‌گاتیویته کم‌تر از O به شبکه TiO_2 ، دانسیته الکترون بر روی Ti افزایش یافته در نتیجه انرژی پیوندی آن کاهش می‌یابد.

برای بررسی انرژی پیوند الکترونی عناصر در سطح نانوذرات N- TiO_2 (UV100) از تکنیک XPS استفاده شده است. برای بررسی انرژی پیوندی Ti حوالی 460 eV ، O حوالی 530 eV و برای N حوالی 396 تا 399 eV باید بررسی گردد. شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب طیف‌های XPS مربوط به N 1s، Ti 2p و O 1s در نانوذرات N- TiO_2 (UV100) را نشان می‌دهند.

انرژی پیوندی N 1s به شدت به روش تهیه استفاده شده وابسته است. انرژی پیوندی در حوالی 398 eV می‌تواند نشانه‌ای از تشکیل N-Ti باشد در صورتی که انرژی پیوندی بالاتر از 400 eV ($402/7 \text{ eV}$) در شکل (۵) می‌تواند نشانه‌ای از تشکیل N-Ti-O یا Ti-O-N

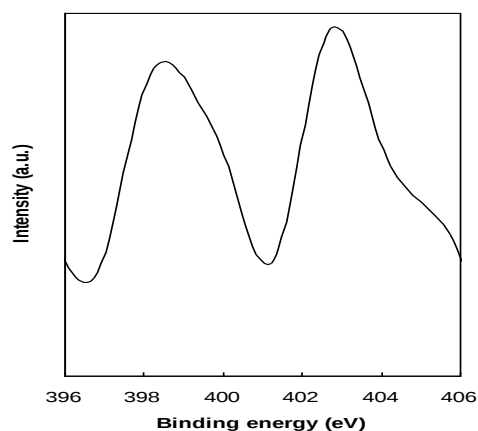


شکل (۶): طیف‌های XPS مربوط به O 1s و Ti 2p در نانوذرات N-TiO₂ (UV100)

- بررسی فعالیت نوری نانوذرات TiO₂ (UV100) دپه شده با اوره در حذف آلاینده مدل (AR27)

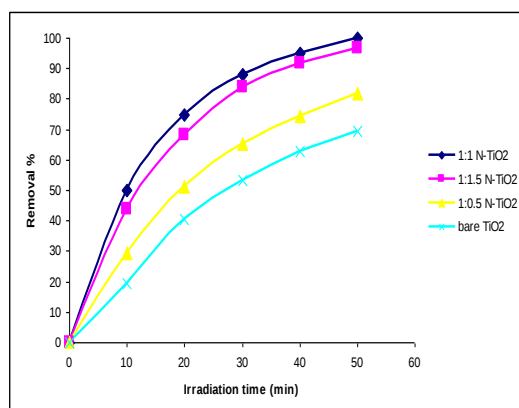
شکل (۷) نتایج بررسی فعالیت فوتوکاتالیزوری نمونه‌های حاصل از دوپینگ اوره با نسبت‌های مختلف بر روی نانوذرات TiO₂ (UV100) به روش تلقیح را در دمای کلسیناسیون ۳۵۰ °C نشان می‌دهد. نمونه دوپینگ شده با نسبت وزنی (۱:۱) بهترین فعالیت فوتوکاتالیزوری را دارد. با قراردادن نمونه تحت تابش نور مرئی به مدت ۵۰ دقیقه مقدار ۱۰٪ حذف را داریم. در حالی‌که در حضور نانوذرات TiO₂ (UV100) خالص در مدت ۵۰ دقیقه تابش نور مرئی

انرژی پیوندی Ti 2p_{3/2} در نانوذرات TiO₂ (P25) در نتیجه دوپینگ با N در حدود ۴۵۸/۷ eV می‌باشد (۲۰)، در صورتی‌که انرژی پیوندی Ti 2p_{3/2} در نانوذرات N-TiO₂ (UV100) در این تحقیق مقدار کم‌تری (۴۵۸ eV) را نشان می‌دهد که می‌تواند بیانگر وارد شدن میزان بیش‌تری N به داخل شبکه نانوذرات TiO₂ (UV100) باشد. علت این مسئله می‌تواند ناشی از اندازه کوچک‌تر نانوذرات TiO₂ (UV100) در مقایسه با نانوذرات TiO₂ (P25) باشد. مطالعات در این زمینه نشان داده است که هر چه اندازه نانوذرات TiO₂ کوچک‌تر باشد به علت بالا بودن فشار در شبکه میزان بیش‌تری N می‌تواند به داخل شبکه نفوذ نماید (۲۰). انرژی پیوندی O 1s در شبکه TiO₂ در ۵۳۰/۸ eV ظاهر می‌شود (۲۰). همانطوری‌که در شکل (۶) و پیک b نشان داده شده است کاهش آن به ۵۲۹/۸ eV در نانوذرات TiO₂ (UV100) نیز می‌تواند دلیل دیگری بر وارد شدن N به شبکه Ti و ایجاد پیوند N-Ti-O باشد. از طرف دیگر پیک ظاهر شده در ۵۳۱/۳ eV در شکل (۶) و پیک a می‌تواند نشانه‌ای از تشکیل Ti-O-N باشد که محیط متفاوتی را برای اکسیژن در شبکه ایجاد کرده است.

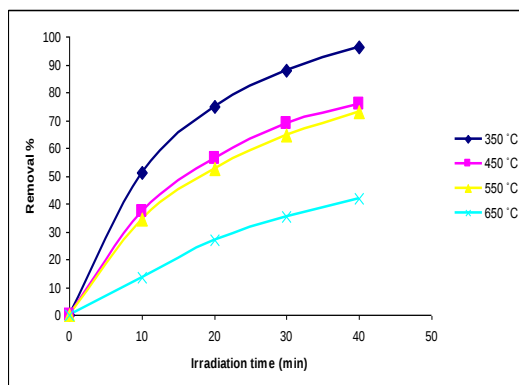


شکل (۵): طیف XPS مربوط به N 1s در نانوذرات N-TiO₂ (UV100)

طوری‌که افزایش دمای کلسیناسیون فعالیت فوتوکاتالیزوری آن را به طور قابل توجهی کاهش داده است. علت این مسئله می‌تواند مربوط به افزایش در اندازه نانوذرات و آگلومره شدن آن‌ها در نتیجه کلسیناسیون در دماهای بالا نسبت داده شود.



شکل (۷): درصد حذف AR27 بر حسب زمان تابش در حضور نانوذرات (UV100) TiO_2 دوپه شده با اوره در نسبت های وزنی مختلف (دمای کلسیناسیون 350°C)



شکل (۸): درصد حذف AR27 بر حسب زمان تابش در حضور نانوذرات (UV100) TiO_2 دوپه شده با اوره در نسبت وزنی (۱:۱) و کلسینه شده در دماهای مختلف

فقط در حدود ۶۵٪ حذف AR27 اتفاق می‌افتد. افزایش فعالیت فوتوکاتالیزوری نانوذرات TiO_2 (UV100) تحت تابش نور مرئی در نتیجه دوپینگ با اوره مطابق با نتایج DRS می‌تواند به کاهش شکاف طیف و افزایش طول موج جذبی نانوذرات TiO_2 (UV100) نسبت داده شود از طرف دیگر نقص ساختاری ایجاد شده یکی از دلایل اصلی در افزایش فعالیت فوتوکاتالیزوری و به تله انداختن الکترون و حفره‌ها می‌باشد که می‌تواند ناشی از وارد شدن N به شبکه TiO_2 باشد. در مقادیر بیش از یک حد معمول همین مراکز می‌توانند به عنوان مراکز ترکیب مجدد عمل نموده، فعالیت فوتوکاتالیزوری را کاهش دهند. نتایج آنالیز BET نشان می‌دهد که سطح نانوذرات N- TiO_2 (UV100) تقریباً ۳ برابر از نانوذرات TiO_2 (UV100) خالص کم‌تر است. با این وجود فعالیت فوتوکاتالیزوری بالای نانوذرات N- TiO_2 (UV100) در قیاس با نانوذرات TiO_2 (UV100) خالص نشان می‌دهد که اندازه سطح نانوذرات در فعالیت فوتوکاتالیزوری نباید تأثیر بسیار قابل توجهی داشته باشد و نقش اندازه شکاف طیف و همچنین نقص شبکه پارامترهای مهم‌تری در فعالیت نوری کاتالیزور تحت تابش نور مرئی می‌باشند.

به منظور تعیین دمای کلسیناسیون مطلوب در فعالیت نوری، نانوذرات TiO_2 (UV100) به روش تلقیح با اوره در نسبت وزنی (۱:۱) دوپه شده و به مدت یک ساعت در دماهای 350°C ، 450°C ، 550°C و 650°C کلسینه شده است. نتایج فعالیت نوری کاتالیزورها در حذف AR27 در شکل (۸) ارائه شده است. بررسی نمودار نشان می‌دهد که نمونه کلسینه شده در دمای 350°C بهترین فعالیت فوتوکاتالیزوری را دارد. به

نتیجه گیری

نتایج نشان می دهد که دوپینگ نانوذرات TiO_2 (UV100) تجاری توسط اوره سبب افزایش فعالیت فوتوکاتالیزوری این نانوذره تحت تابش نور مرئی می شود. مقدار مطلوب اوره در فرآیند دوپینگ برای رسیدن به فعالیت فوتوکاتالیزوری حداکثر نسبت یک به یک می باشد و دمای کلسیناسیون مطلوب برای داشتن حداکثر فعالیت فوتوکاتالیزوری 350°C می باشد. آنالیز XRD افزایش اندازه کریستالی را در طی فرآیند دوپینگ نشان می دهد و آنالیز XPS عمده تاً تشکیل پیوندهای O-Ti-N را در نانوذرات N- TiO_2 (UV100) نشان می دهد. آنالیز DRS نیز کاهش شکاف طیف را برای نانوذرات (UV100) N- TiO_2 نشان می دهد که می تواند دلیلی بر افزایش فعالیت فوتوکاتالیزوری تحت تابش نور مرئی باشد.

تعارض منافع

نویسنده هیچ گونه تعارض منافع برای اعلام ندارد.

منابع

- [4] Soudabeh, S., Behnajady, M.A., Tolvanen, P., Salmi, T., 2018, Optimization of photooxidative removal of phenazopyridine from water, *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 92, 876.
- [5] Ahmed, H.R., Kayani, K.F., 2024, A comparative review of Fenton-like processes and advanced oxidation processes for Methylene Blue degradation, *Inorganic Chemistry Communications*, 170, 113467.
- [6] Chakravorty, A., Roy, S., 2024, A review of photocatalysis, basic principles, processes, and materials, *Sustainable Chemistry for the Environment*, 8, 100155.
- [7] Du, Q., Lin, Y., Cheng, S., Wei, D., Wang, Y., Zhou, Y., 2024, In situ synthesis of three-dimensional flower-like TiO_2/WO_3 heterojunction: Enhanced visible photocatalytic properties and theoretical calculations, *Ceramics International*, 50, 30605.
- [8] Yang, W., Bu, Q., 2024, Microsphere structure enhances the photocatalytic performance of $\text{TiO}_2\text{-CdS}$ heterojunction, *Materials Letters*, 367, 136619.
- [9] Airemlou, L., 2024, Synthesis of ZnO/SnO_2 nanocomposite loaded with silver via liquid impregnation method and investigation of its photocatalytic activity in removing an environmental pollutant under visible light irradiation, *Environmental Pollution and Sustainable Urban Development*, 1(2), 85. (in Persian)
- [10] Mohammadpour Koselar, Z., Ghazi Tabatabaei, Z., 2024, Design of multifunctional photocatalysts with g- C_3N_4 and its applications in sustainable technologies, *Environmental Pollution and Sustainable Urban Development*, 1(3), 29. (in Persian)
- [11] Muscetta, M., Ganguly, P., Clarizia, L., 2024, Solar-powered photocatalysis in water purification: Applications and commercialization challenges, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12, 113073.
- [12] Amini-Badr, A., Behnajady, M.A., 2024, Photocatalytic removal of cefazolin in a photoreactor packed with $\text{TiO}_2\text{-P25}$ nanoparticles supported on glass beads: An artificial neural network modeling, *International Journal of Environmental Analytical*, 104, 5713.
- [1] Skalska-Tuomi, K., Kaijane, L., Monteagudo, J.M., Mänttari, M., 2025, Efficient removal of pharmaceuticals from wastewater: Comparative study of three advanced oxidation processes, *Journal of Environmental Management*, 375, 124276.
- [2] Zafari, S.H., 2024, Removal of p-nitrophenol from aqueous environments by $\text{UV}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ process in a continuous photoreactor: Optimization by Taguchi method, *Environmental Pollution and Sustainable Urban Development*, 1(1), 33. (in Persian)
- [3] Eskandarloo, H., 2024, A review of new methods of removing environmental pollutants: Photolysis and $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ processes, *Environmental Pollution and Sustainable Urban Development*, 1(1), 1. (in Persian)

- [13] Sadeghi Farshi, F., Behnajady, M.A., Aberoomand Azar, P., Safekordi, A.A., Modirshahla, N., 2022, A mechanistic study on photocatalytic activity of hydrothermally synthesized titanium dioxide nanowires decorated by silver phosphate, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 142, 106501.
- [14] Bahnemann, D.W., 2004, Photocatalytic water treatment: Solar energy applications, *Solar Energy*, 77, 445.
- [15] Winayu, B.N.R., Tsai, Y.-Y., Chu, H., 2022, Enhancement of formaldehyde removal by graphene, S, and N doping on TiO₂ nanocomposite photocatalyst, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 170, 110961.
- [16] Sing, K.S.W., 1985, Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity, *Pure and Applied Chemistry*, 57, 603.
- [17] Behnajady, M.A., Elhami Alamdari, M., Modirshahla, N., 2013, Investigation of the effect of heat treatment process on characteristics and photocatalytic activity of TiO₂-UV100 nanoparticles, *Environment Protection Engineering*, 33, 39.
- [18] Hu, S., Wang, A., Li, X., Lowe, H., 2010, Hydrothermal synthesis of well-dispersed ultrafine N-doped TiO₂ nanoparticles with enhanced photocatalytic activity under visible light, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 71, 156.
- [19] Senthilnathan, J., Philip, L., 2010, Photocatalytic degradation of lindane under UV and visible light using N-doped TiO₂, *Chemical Engineering Journal*, 161, 83.
- [20] Chen, X., Burda, C., 2004, Photoelectron spectroscopic investigation of nitrogen-doped titania nanoparticles, *The Journal of Physical Chemistry B*, 108, 15446.

“Research article”

Doping of commercial TiO₂ nanoparticles (UV100) with urea and investigation of their photocatalytic activity in removing an environmental pollutant (C.I. Acid Red 27) under visible light irradiation

Zahra Mahmoudi*

Department of Chemistry, NT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

*Corresponding author: z.mahmoudi@kimiakck.com

(Received: 11 February 2025, Accepted: 1 March 2025)

Abstract

In this study, commercial TiO₂ (UV100) was doped with urea using an impregnation method, and its photocatalytic activity was evaluated under visible light irradiation. The characteristics of the doped nanoparticles were analyzed using X-ray diffraction (XRD), diffuse reflectance spectroscopy (DRS), BET, and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The photocatalytic activity of urea-doped TiO₂ (UV100) with various weight ratios and calcination temperatures was assessed through the photocatalytic degradation of C.I. Acid Red 27, a monoazo textile dye. The results indicate that urea doping enhances the photocatalytic activity of TiO₂ (UV100) under visible light, primarily due to a reduction in the nanoparticles' energy band gap. The highest photocatalytic activity was observed in TiO₂ (UV100) doped with urea at a 1:1 ratio and calcined at 350°C. Under visible light irradiation for 50 min, the removal efficiency of AR27 was 65% with pure TiO₂ (UV100) and 100% with doped TiO₂ (UV100).

Conflict of interest: None declared.

Keywords: TiO₂ (UV100), Urea doping, Photocatalytic activity, C.I. Acid Red 27



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره ۱، شماره ۴، پیاپی ۴
زمستان ۱۴۰۳، صفحات ۷۰-۵۹

"مقاله پژوهشی"

حذف دیکلوفناک از محیط‌های آبی توسط فرایند UV/TiO_2 در یک فوتوراکتور ناپیوسته با بستر ثابت: بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ

آیسان رحیم پور جاوید*

دانش آموخته کارشناسی ارشد شیمی کاربردی، گروه شیمی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: a.rahimpourjavid@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶)

چکیده

در این کار تحقیقی حذف یک آلاینده دارویی تحت عنوان دیکلوفناک (DCF) با استفاده از فرایند UV/TiO_2 در یک فوتوراکتور ناپیوسته با بستر ثابت مورد بررسی قرار گرفته و شرایط عملیاتی موثر در کارایی فرایند به روش سطح پاسخ (RSM) از نوع طراحی ترکیب مرکزی (CCD) بهینه‌سازی شده است. نتایج طراحی آزمایش نشان‌دهنده اثر مثبت پارامترهای زمان تابش نور، دبی حجمی و اثر منفی پارامترهای غلظت اولیه DCF و pH در رانندگی حذف آلاینده مورد نظر (DCF) از محیط‌های آبی می‌باشد. همچنین از پارامترهای مؤثر در رانندگی حذف، بیشترین تأثیر مربوط به پارامترهای زمان تابش و pH می‌باشد. مقدار pH بهینه برای حذف DCF در فرایند مذکور حوالی ۴/۵ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فوتوراکتور ناپیوسته با بستر ثابت، دیکلوفناک، روش سطح پاسخ، طراحی ترکیب مرکزی، UV/TiO_2

مقدمه

با توجه به محدودیت منابع طبیعی آب قابل شرب، استفاده بی‌رویه از آن باید کنترل شود. بنابراین، تصفیه و بازیابی پساب‌های شهری و صنعتی برای استفاده مجدد و کاهش آلودگی محیط زیست، اهمیت روزافزونی پیدا کرده است. هر چه میزان آلاینده‌ها در فاضلاب‌ها و پساب‌های صنعتی بیشتر باشد، خطر تخلیه آن‌ها به محیط طبیعی افزایش می‌یابد (۱). به منظور جلوگیری از اثرات مخرب ناشی از وجود این مواد شیمیایی، روش‌های مختلفی از قبیل جذب سطحی، تجزیه بیولوژیکی، فوتوکاتالیز و اوزونکافت از اوایل دهه ۱۹۷۰ پیشنهاد شده است تا آلاینده‌های محیطی را حذف کنند (۲ و ۳). امروزه اغلب ترکیبات دارویی موجود در آب، فاضلاب، لجن و رسوبات به عنوان آلاینده‌های در حال ظهور شناخته می‌شوند. این آلاینده‌ها حتی در مقادیر نانوگرم بر لیتر نیز می‌توانند اثرات زیان‌بار و مضر برای سلامت انسان‌ها و سایر موجودات داشته باشند. دیکلوفناک رایج‌ترین داروی ضد التهابی است که حتی بدون نسخه پزشک نیز قابل تهیه است. بنابراین مازاد این دارو در فاضلاب‌های خانگی به عنوان یک آلاینده پایدار در برابر محیط زیست به وفور یافت می‌شود. ورود این آلاینده از طریق فاضلاب‌های خانگی، صنعتی و تخلیه پساب‌های صنعتی به آب‌های رودخانه‌ها و دریاها اثرات نامطلوبی بر محیط زیست دارد (۴). در میان

روش‌های مختلف ارائه شده برای از بین بردن و تجزیه آلاینده‌های محیطی، فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته^۱ (AOPs) به منظور حذف کامل انواع مختلف آلاینده‌ها بسیار مؤثر می‌باشند (۵ و ۶). فوتوکاتالیز ناهمگن^۲ یکی از روش‌های پیشرفته‌ای است که اخیراً مطالعات زیادی روی آن صورت گرفته است. این فرایند جزء فرایندهای AOPs می‌باشد که طی آن، آلاینده‌ها در مقابل تابش نور UV و در حضور فوتوکاتالیزورهایی مانند TiO₂ و ZnO و همینطور فوتوکاتالیست‌های چند منظوره تخریب می‌شوند (۷ و ۸). مهم‌ترین کشفی که زمینه واکنش فوتوکاتالیزوری را ترقی داد "اثر هوندا-فوجی‌شیما" بود که برای اولین بار در سال ۱۹۷۲ گزارش شد و زمینه مطالعات واکنش‌های فوتوکاتالیزوری را بطور گسترده افزایش داد (۹). در فرایند فوتوکاتالیز ناهمگن از یک نیمه‌رسانای اکسیدی نظیر تیتانیوم دی‌اکسید به عنوان فوتوکاتالیزور برای پاک‌سازی محیط زیست استفاده می‌شود. تیتانیوم دی‌اکسید به خاطر اینکه نسبتاً ارزان، غیرسمی و با حفره‌های با قدرت ترکیب شوندگی قوی با اکسیژن است، یک فوتوکاتالیزور ایده‌ال به شمار می‌آید. مطالعاتی که در زمینه حذف ترکیبات دارویی توسط فرایند فوتوکاتالیز ناهمگن صورت گرفته است، اغلب از نانوذرات نیمه‌رسانای اکسیدی به صورت دوغابی^۳ در حذف این ترکیبات بهره برده شده است (۱۰-۱۲). به عنوان نمونه ریزو^۴ و همکارانش حذف و

² Heterogeneous photocatalysis³ Slurry⁴ Rizzo¹ Advanced Oxidation Processes

معدنی‌سازی DCF را در سیستم راکتور ناپیوسته مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه از فوتوکاتالیست TiO_2 در وضعیت دوغابی برای حذف محدوده وسیعی از غلظت DCF ($5-80 \text{ mg L}^{-1}$) بهره بردند. در این تحقیق تحت شرایط $\text{DCF} = 5 \text{ mg L}^{-1}$ و $\text{TiO}_2 = 200 \text{ mg L}^{-1}$ حذفی در حدود ۹۸٪ برای زمان تابش ۶۰ دقیقه گزارش گردید (۱۳). اکیوس^۱ و همکارانش نیز به مطالعه حذف فوتوکاتالیزوری DCF در حضور انواع مختلف فوتوکاتالیست TiO_2 تجاری در وضعیت دوغابی پرداختند و نشان دادند TiO_2 -P25 و TiO_2 -UV100 که به ترتیب محصول شرکت‌های دگوسا^۲ و زاختلبن^۳ می‌باشند بیش‌ترین فعالیت نوری را در مقایسه با سایر انواع تجاری TiO_2 در حذف DCF دارند. در این کار تحت شرایط $\text{DCF} = 10 \text{ mg L}^{-1}$ و $\text{TiO}_2 = 250 \text{ mg L}^{-1}$ حذفی در حدود ۸۰٪ برای زمان تابش ۲۴۰ دقیقه گزارش گردید (۱۴). در سال ۲۰۲۴ تحقیقی در خصوص مقایسه کارایی جذب سطحی و فوتوکاتالیز ناهمگن (UV/TiO_2) در وضعیت دوغابی در حذف چهار آلاینده دارویی (ایوپروفن، دیکلوفناک، کاربامازپین، و سولفامتوکسازول) صورت گرفت. نتایج تحقیق به وضوح نشان داد که فرایند فوتوکاتالیز کارایی بیشتری از جذب سطحی این ترکیبات بر روی کربن فعال دارد (۱۵). استفاده از نانوذرات اکسیدی در وضعیت دوغابی دارای یکسری معایب است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: تیرگی محلول و عدم

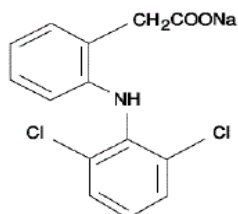
رسیدن نور به تمام بخش‌های نمونه، عدم امکان جداسازی کامل کاتالیزور بویژه در مواردی که از نانوذرات کاتالیزوری استفاده می‌شود، اتلاف کاتالیزور، نیاز به یک مرحله جداسازی جامد-مایع و مشکلات ناشی از حالت دوغابی در راکتورهای پیوسته بویژه مشکل ته‌نشست کاتالیزور و افت قابل توجه فعالیت آن (۱۶).

هدف از انجام این تحقیق، بهینه‌سازی پارامترهای موثر در حذف DCF (غلظت اولیه دیکلوفناک، pH اولیه محلول، دبی حرکت سیال و زمان تابش نور) در یک فوتوراکتور با جریان چرخشی و پر شده از نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید تثبیت شده بر روی گلوله‌های شیشه‌ای می‌باشد. برای این منظور از روش سطح پاسخ (RSM^4) از نوع طراحی ترکیب مرکزی (CCD^5) بهره برده خواهد شد.

بخش تجربی

مواد مورد استفاده

DCF محصول شرکت EXIR, Wien, Austria بوده و ساختار آن در شکل (۱) ارایه شده است. پودر تیتانیوم دی‌اکسید P25 (TiO_2 -P25) محصول شرکت دگوسا می‌باشد. HCl و NaOH از شرکت مرک (Merck) تهیه شده است.



شکل (۱): ساختار مولکولی DCF

⁴ Response Surface Methodology (RSM)

⁵ Central Composite Design (CCD)

¹ Achilleos

² Degussa

³ Sachtleben

فوتوراکتور با بستر پر شده (PBR)^۱

کلیه کارهای عملی این پروژه در یک سیستم چرخشی متشکل از یک فوتوراکتور لوله‌ای و یک تانک همزده انجام شده است. در فوتوراکتور لوله‌ای نانوذرات TiO₂-P25 به صورت لایه‌ای نازک با استفاده از روش اتصال حرارتی^۲ که به روش PMTP^۳ نیز موسوم است بر روی گلوله‌های شیشه‌ای تثبیت شده و داخل فوتوراکتور پر شده‌اند. لامپ در داخل فوتوراکتور لوله‌ای غوطه‌ور شده و با تابش از مرکز فوتوراکتور بکار گرفته شده است. جنس فوتوراکتور از استیل بوده و دارای قطر داخلی ۳۲ mm، ضخامت ۲ mm و ارتفاع ۲۸۸ mm می‌باشد. در مرکز فوتوراکتور لامپ UV-C (16 W, Philips, Holland) با طول موج نشری ۲۵۴ nm در داخل یک غلاف از جنس کوارتز با قطر داخلی ۲۰ mm و ضخامت ۱ mm قرار گرفته است. برای تزریق محلول به داخل فوتوراکتور، از یک پمپ پریستالتیک (Heidolph, PD 5001) با قابلیت تغییر شدت جریان ورودی، استفاده شده است. جریان محلول پس از قسمت پایین فوتوراکتور (ورودی سیستم) وارد و از بالای راکتور (خروجی سیستم) خارج و مجدداً وارد تانک همزده می‌شود.

نحوه انجام آزمایش در فوتوراکتور PBR

ابتدا یک محلول به حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر و با غلظت ۱۰ mg L⁻¹ از DCF از محلول مادر تهیه، سپس به یک بشر منتقل گردیده و با همزن مغناطیسی با دور مشخص، همزده شد. پمپ پریستالتیک در دبی مشخص قرار داده و روشن شد. بعد از اینکه محلول

آزمایشی به طور کامل در سیستم چرخشی مورد نظر سیرکوله شد و سیستم به حالت پایداری رسید، لامپ فوتوراکتور و کرنومتر را همزمان روشن نموده و در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه از محلول داخل تانک همزده نمونه‌گیری کرده و توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر (Shimadzu, UV mini-1240) جذب آن در طول موج ۲۷۶ nm توسط یک سل کوارتز خوانده شد. بعد از اینکه جذب خوانده شد با استفاده از نمودار کالیبراسیون رسم شده در طول موج ۲۷۶ nm غلظت DCF را در هر لحظه محاسبه کرده و از روی آن میزان درصد حذف در هر لحظه محاسبه می‌شود. این آزمایش در شرایط مختلف تکرار و میزان حذف DCF بررسی شد.

نتایج و بحث

جهت بدست آوردن آثار اصلی و متقابل متغیرهای مستقل تأثیرگذار بر میزان پاسخ، در فرایند حذف DCF در فوتوراکتور با بستر پر شده از روش RSM استفاده شده است. مطالعه صورت گرفته از نوع طراحی ترکیب مرکزی (CCD) می‌باشد. در این روش تأثیر ۴ فاکتور pH، غلظت اولیه DCF، دبی حجمی و زمان تابش نور بر میزان پاسخ (درصد حذف DCF) مورد بررسی قرار گرفته است. حدود و سطوح کلیه فاکتورهای مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است. لازم به ذکر است، مقدار α را از رابطه $\alpha = 2k/4$ می‌توان محاسبه نمود. در این رابطه k بیانگر تعداد فاکتور می‌باشد. با توجه به تعداد ۴ فاکتور در طراحی، مقدار α برابر با ۲ می‌باشد. آزمایشات طراحی شده و نتایج تجربی مربوطه نیز در جدول (۲) قابل مشاهده می‌باشد.

^۱ Packed Bed Reactor (PBR)^۲ Heat attachment^۳ Previously Made Titania Powder (PMTP)

جدول (۱): فاکتورها و سطوح آنها

محدوده‌ها و سطوح					فاکتور
+α	+۱	۰	-۱	-α	
۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	A: غلظت اولیه DCF (mg L ⁻¹)
۲۴۰	۲۰۰	۱۶۰	۱۲۰	۸۰	B: دبی حجمی جریان (mL min ⁻¹)
۱۲۰	۹۰	۱۶۰	۳۰	۰	C: زمان تابش نور (min)
۸	۷	۶	۵	۴	pH: D

$$+ 1/0.7 \times A \times D - 2/42 \times B \times C - 3/18 \times B \times D - \\ 1/46 \times C \times D + 0.55 \times A^2 + 4/18 \times B^2 \\ + 2/0.2 \times C^2 + 5/10 \times D^2 \quad (1)$$

در این معادله R، درصد حذف DCF (پاسخ) می‌باشد. برای بررسی کفایت مدل به دست آمده، از روش آنالیز واریانس استفاده شده است. نتایج این آنالیز در جدول (۳) ارائه شده است.

پس از استخراج نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها، امکان ارائه یک مدل ریاضی مناسب بین متغیرهای مستقل و میزان پاسخ (متغیر وابسته) مورد مطالعه قرار گرفته وجود خواهد داشت. معادله بدست آمده بین پاسخ و هرکدام از فاکتورها در حالت کدبندی شده با معادله (۱) بیان می‌شود:

$$R = 23/46 - 5/50 \times A + 0.34 \times B + 11/26 \times C - \\ 9/52 \times D - 2/60 \times A \times B - 1/0.7 \times A \times C$$

جدول (۲): آزمایشات طراحی شده به روش CCD و نتایج تجربی مربوطه

شماره آزمایش	A: [DCF] (mg L ⁻¹)	B: Flow (mL min ⁻¹)	C: Irradiation time (min)	D: pH	پاسخ‌های تجربی % R _{Exp.}
۱	۳۰	۲۰۰	۳۰	۷	۱۳/۴۹
۲	۳۰	۱۲۰	۹۰	۵	۵۳/۱۶
۳	۲۰	۲۰۰	۹۰	۵	۶۶/۱۳
۴	۳۰	۱۲۰	۹۰	۷	۳۵/۳۰
۵	۲۵	۱۶۰	۶۰	۶	۱۸/۰۱
۶	۲۰	۲۰۰	۹۰	۷	۳۵/۳۲
۷	۳۰	۱۲۰	۳۰	۵	۲۶/۶۵
۸	۳۰	۱۲۰	۳۰	۷	۱۷/۶۰
۹	۲۵	۱۶۰	۶۰	۶	۲۱/۰۳
۱۰	۲۵	۱۶۰	۶۰	۴	۶۷/۸۸
۱۱	۲۰	۱۲۰	۹۰	۷	۴۷/۲۴
۱۲	۲۵	۱۶۰	۶۰	۶	۲۱/۶۰
۱۳	۳۰	۲۰۰	۹۰	۷	۲۲/۵۱
۱۴	۳۰	۲۰۰	۹۰	۵	۴۱/۷۱
۱۵	۳۵	۱۶۰	۶۰	۶	۱۵/۶۱
۱۶	۲۰	۲۰۰	۳۰	۷	۱۸/۹۸

ادامه جدول (۲):

۲۵/۶۴	۵	۳۰	۲۰۰	۳۰	۱۷
۳۲/۰۴	۶	۶۰	۱۶۰	۲۵	۱۸
۵۷/۸۶	۵	۹۰	۱۲۰	۲۰	۱۹
۳۴/۱۸	۶	۶۰	۸۰	۲۵	۲۰
۴۶/۷۲	۶	۶۰	۲۴۰	۲۵	۲۱
۶۰/۴۵	۶	۱۲۰	۱۶۰	۲۵	۲۲
۲۵/۷۷	۶	۶۰	۱۶۰	۲۵	۲۳
۲۲/۳۲	۶	۶۰	۱۶۰	۲۵	۲۴
۲۰/۴۱	۸	۶۰	۱۶۰	۲۵	۲۵
۲۷/۹۶	۵	۳۰	۱۲۰	۲۰	۲۶
۴۹/۱۰	۵	۳۰	۲۰۰	۲۰	۲۷
۳/۱۸	۶	۰	۱۶۰	۲۵	۲۸
۳۶/۲۹	۶	۶۰	۱۶۰	۱۵	۲۹
۲۴/۱۶	۷	۳۰	۱۲۰	۲۰	۳۰

جدول (۳): جدول آنالیز واریانس

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P Prob > F	وضعیت
مدل	۷۴۶۵/۵۵	۱۴	۵۳۳/۲۵	۱۵/۵۶	< ۰/۰۰۰۱	قابل توجه
A: [DCF] (mg L ⁻¹)	۷۲۶/۶۶	۱	۷۲۶/۶۶	۲۱/۲۰	۰/۰۰۰۳	–
B: Flow (mL min ⁻¹)	۲/۷۰	۱	۲/۷۰	۰/۰۷۹	۰/۷۸۲۷	–
C: Time (min)	۳۰۴۲/۴۹	۱	۳۰۴۲/۴۹	۸۸/۷۸	< ۰/۰۰۰۱	–
D: pH	۲۱۷۶/۷۰	۱	۲۱۷۶/۷۰	۶۳/۵۲	< ۰/۰۰۰۱	–
AB	۱۰۸/۴۲	۱	۱۰۸/۴۲	۳/۱۶	۰/۰۹۵۶	–
AC	۱۸/۱۶	۱	۱۸/۱۶	۰/۵۳	۰/۴۷۷۸	–
AD	۱۸/۳۰	۱	۱۸/۳۰	۰/۵۳	۰/۴۷۶۲	–
BC	۹۳/۷۲	۱	۹۳/۷۲	۲/۷۳	۰/۱۱۹۰	–
BD	۱۶۲/۲۹	۱	۱۶۲/۲۹	۴/۷۴	۰/۰۴۵۹	–
CD	۳۴/۱۳	۱	۳۴/۱۳	۱/۰۰	۰/۳۳۴۱	–
A ²	۸/۳۸	۱	۸/۳۸	۰/۲۴	۰/۶۲۸۱	–
B ²	۴۷۸/۶۴	۱	۴۷۸/۶۴	۱۳/۹۷	۰/۰۰۲۰	–
C ²	۱۱۱/۹۰	۱	۱۱۱/۹۰	۳/۲۷	۰/۰۹۰۹	–
D ²	۷۱۳/۷۲	۱	۷۱۳/۷۲	۲۰/۸۳	۰/۰۰۰۴	–
باقیمانده	۵۱۴/۰۴	۱۵	۳۴/۲۷	–	–	–
Lack of Fit	۳۹۴/۶۳	۱۰	۳۹/۴۶	۱/۶۵	۰/۳۰۱۷	غیر قابل توجه
خطای خالص	۱۱۹/۴۱	۵	۲۳/۸۸	–	–	–
کل تصحیح شده	۷۹۷۹/۵۹	۲۹	–	–	–	–

ادامه جدول (۳):

$$R^2 = 0.9356$$

$$\text{Adj. } R^2 = 0.8755$$

$$\text{Pred. } R^2 = 0.6936$$

$$\text{Adequate precision} = 14.464$$

$$\text{C.V. \% (Coefficient of Variation)} = 17.77$$

مقدار F برابر با ۱۵/۵۶ و همچنین مقدار p کم‌تر از ۰/۰۰۰۱ برای مدل انتخابی بیانگر کفایت بسیار مناسب آن می‌باشد و فقط ۰/۰۱٪ امکان این هست که مقدار F برای مدل ناشی از نویز باشد. مقدار F برابر با ۱/۶۵ برای Lack of Fit بیانگر عدم اهمیت آن می‌باشد. عدم اهمیت Lack of Fit بیانگر این مطلب است که مدل مورد نظر در تخمین نتایج به اندازه کافی دقیق می‌باشد. مقدار کم ضریب تغییر (۱۷/۷۷) دقت بالای مدل و قابل اعتماد بودن نتایج آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. Adequate precision نیز بیانگر نسبت سیگنال به نویز می‌باشد و مقدار مطلوب برای آن عددی بیش‌تر از ۴ می‌باشد. مقدار ۱۴/۴۶۴ در این کار نشان‌دهنده یک سیگنال مناسب در کل فضای طراحی می‌باشد (۱۷).

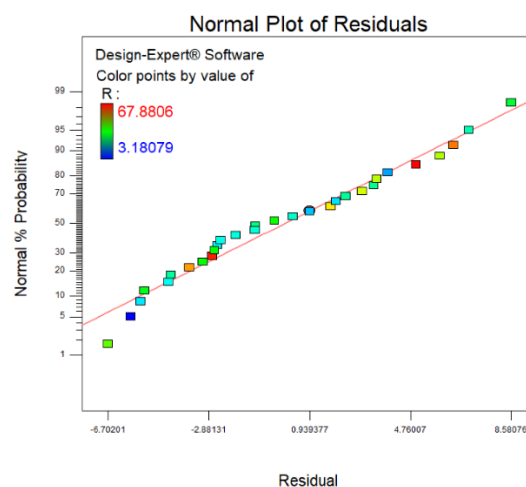
مقدار R^2 نیز می‌تواند معیاری برای تعیین اهمیت مدل باشد. مقدار R^2 باید به ۱ نزدیک باشد در این حالت داده‌های تجربی می‌توانند با مدل مورد نظر به خوبی مطابقت نمایند. نتایج حاصله نشان‌دهنده این واقعیت است که مدل حاصله دارای ضریب همبستگی $R^2 = 0.9356$ است. مقدار R^2 نشان‌دهنده این امر است که ۹۳/۵۶٪ از تغییرات در راندمان حذف DCF از متغیرهای مستقل ناشی می‌شود و این مدل فقط ۶/۴۴٪ از تغییرات را نمی‌تواند توصیف کند. پارامتر مهم دیگری که می‌تواند معیاری برای اعتبار مدل ارائه شده باشد پارامتر $\text{Pred. } R^2$ هست. این پارامتر مناسب

بودن مدل در پیش‌بینی یک مقدار پاسخ را نشان می‌دهد. این پارامتر در توافق مناسب با $\text{Adj. } R^2$ هست چرا که تفاوت این دو پارامتر با یکدیگر کم‌تر از ۰/۲ می‌باشد.

از آنجاییکه در آنالیز واریانس پارامترهای با مقدار p کم‌تر از ۰/۰۵، پارامترهای قابل توجه مدل ارائه شده می‌باشند، بنابراین پارامترهای: غلظت اولیه DCF (A)، زمان تابش نور (C) و pH (D)، (دبی حجمی - pH) BD، B^2 و D^2 (پH) پارامترهای قابل توجه در مدل ارائه شده می‌باشند. همچنین مقدار p پارامترها در جدول واریانس و همچنین ضرایب پارامترها در رابطه (۱) به خوبی بیانگر این مطلب است که تأثیر پارامتر pH و زمان تابش نور به مراتب از تأثیر سایر پارامترها بیش‌تر است. همچنین ضرایب پارامترها در این رابطه نشان می‌دهد که دبی حجمی و زمان تابش نور در پاسخ (درصد حذف DCF) تأثیر مثبت دارند در صورتیکه پارامترهای غلظت اولیه DCF و pH در پاسخ تأثیر منفی دارند. یعنی با افزایش دبی حجمی و زمان تابش نور، درصد حذف DCF افزایش می‌یابد؛ در صورتیکه با افزایش غلظت اولیه DCF و pH، درصد حذف DCF کاهش می‌یابد.

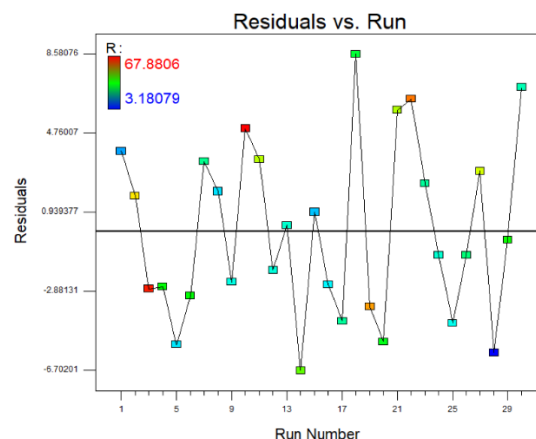
به منظور مطالعه بیش‌تر اعتبار معادله حاصل، مقادیر باقیمانده (اختلاف بین پاسخ‌های تجربی و پاسخ‌های پیش‌بینی شده) محاسبه شده و در شکل (۲) نمودار درصد احتمال نرمال رسم شده است. خطی بودن شکل

بیانگر توزیع نرمال باقیمانده‌ها و صحیح بودن مدل ارائه شده است.



شکل (۲): منحنی فراوانی توزیع نرمال

در شکل (۳) مقادیر باقیمانده بر حسب شماره آزمایش‌ها نشان داده شده است. تصادفی بودن توزیع باقیمانده‌ها نشان دهنده صحت مدل می‌باشد.



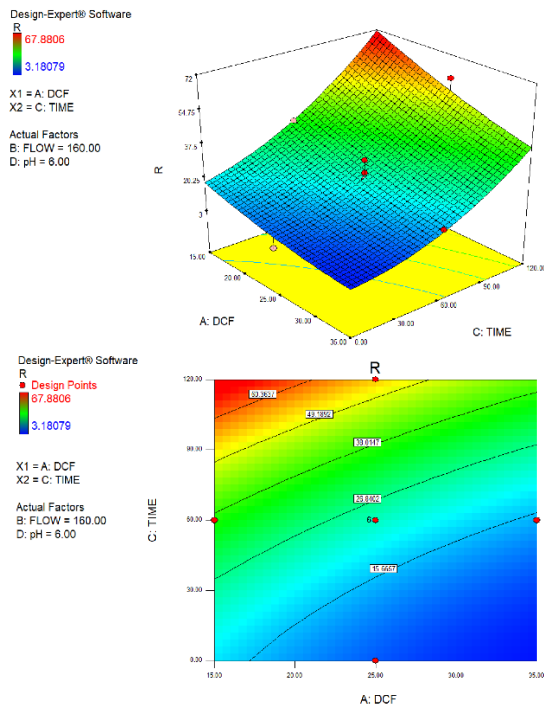
شکل (۳): مقادیر باقیمانده بر حسب شماره آزمایش

به منظور مشاهده و بررسی اثر پارامترها بر روی پاسخ از شکل‌های دوبعدی (کانتور) و سه بعدی حاصله از مدل به دست آمده از روش CCD استفاده شده است. شکل (۴) تأثیر پارامترهای غلظت اولیه DCF و دبی حجمی سیال ورودی بر راندمان حذف

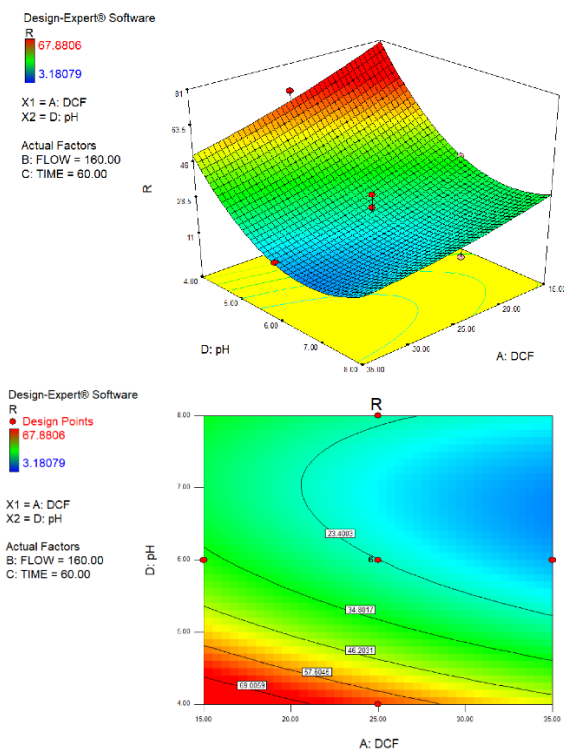
DCF را نشان می‌دهد. همانطوریکه از شکل مشخص است با افزایش غلظت اولیه DCF، درصد حذف کاهش می‌یابد. علت این امر این است که با افزایش غلظت اولیه DCF مقدار جذب نور توسط محلول افزایش می‌یابد و کسر بالاتری از نور UV قبل از رسیدن به سطح کاتالیزور، توسط محلول جذب می‌شود، در نتیجه راندمان حذف کاهش پیدا می‌کند (۱۷). از سوی دیگر در شکل (۴) مشاهده می‌شود که با افزایش دبی حجمی، راندمان حذف افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر با افزایش دبی حجمی، دفعات چرخش سیال از داخل راکتور و نیز از مقابل لامپ UV و فوتوکاتالیزور بیش‌تر شده و در نتیجه راندمان حذف افزایش می‌یابد.

شکل (۵) تأثیر پارامترهای غلظت اولیه DCF و زمان تابش نور UV در راندمان حذف DCF را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، بالاترین راندمان حذف در بالاترین زمان تابش اتفاق می‌افتد. دلیل این امر این است که با افزایش زمان تابش نور، الکترون‌های بیش‌تری از فوتوکاتالیزور برانگیخته شده و نهایتاً موجب افزایش راندمان حذف می‌شود (۱۷).

شکل (۶) تأثیر پارامترهای غلظت اولیه DCF و pH، در راندمان حذف DCF را نشان می‌دهد. همانطوری که در شکل مشخص است با افزایش pH، راندمان حذف DCF بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر pH مناسب برای حذف DCF، بین ۴ تا ۴/۵ می‌باشد. در pHهای اسیدی نزدیک شدن مولکول‌های غنی از الکترون DCF به سطح با بار مثبت کاتالیزور بهتر صورت گرفته و سبب افزایش راندمان حذف می‌گردد.



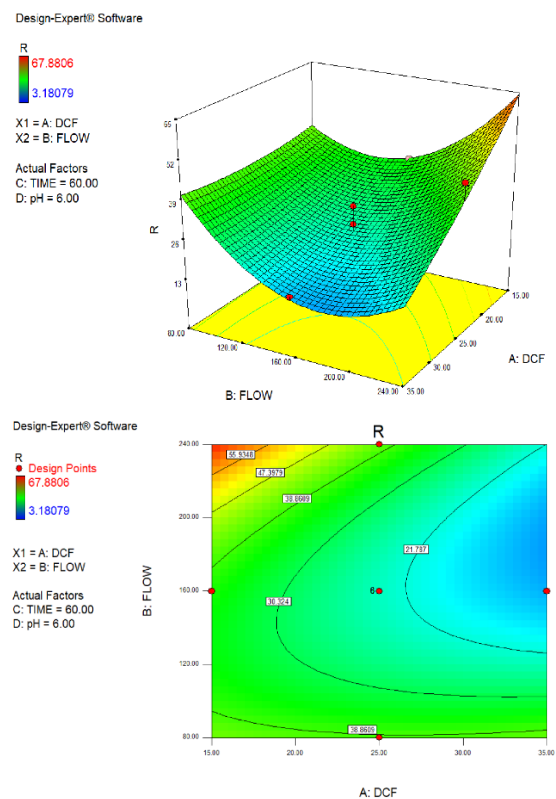
شکل (۵): منحنی دو بعدی و سه بعدی و سه بعدی تأثیر غلظت اولیه DCF و زمان تابش نور بر راندمان حذف DCF



شکل (۶): منحنی دو بعدی و سه بعدی و سه بعدی تأثیر غلظت اولیه DCF و pH بر راندمان حذف DCF

نتایج حاصل از انجام آزمایشات ارائه شده به روش CCD و نتایج پیش‌بینی شده توسط این روش، در شکل (۷) ارائه شده است. همخوانی مناسبی بین نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی شده وجود دارد. مقدار R^2 برای ۰/۹۳۵۶ و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد.

به منظور مطمئن شدن از شرایط بهینه به دست آمده، سه مورد از شرایط بهینه پیشنهادی به روش CCD در شکل (۸) نشان داده شده است. در این حالت مقدار درصد پیش‌بینی شده به روش CCD با مقدار تجربی آن مطابقت خوبی دارد. توافق خوب بین مقدار پیش‌بینی شده و مقدار تجربی، اعتبار مدل برای بهینه‌سازی حذف DCF توسط فرایند فوتوکاتالیز ناهمگن در راکتور PBR را تایید می‌کند.



شکل (۷): منحنی دو بعدی و سه بعدی و سه بعدی تأثیر غلظت اولیه DCF و دبی حجمی بر راندمان حذف DCF

نتیجه‌گیری

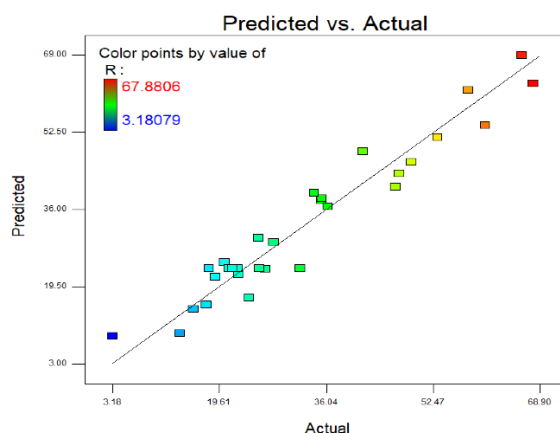
نتایج حذف DCF از محیط‌های آبی به عنوان یک ترکیب آلاینده محیط زیست با استفاده از یک فوتوراکتور با جریان چرخشی پر شده از نانوذرات تیتانیا بر روی گلوله‌های شیشه‌ای به خوبی بیانگر کارایی بالای فرایند مذکور می‌باشد. نتایج طراحی آزمایش به روش CCD بیانگر وجود یک رابطه چند جمله‌ای مابین متغیرهای مستقل (غلظت اولیه DCF، زمان تابش نور، دبی حجمی سیال و pH) و متغیر وابسته (راندومان حذف DCF) می‌باشد. بر اساس مدل پیشنهادی و نتایج آنالیز واریانس مشخص گردید تأثیر پارامتر pH و زمان تابش نور به مراتب از تأثیر دو پارامتر دیگر در راندومان حذف DCF بیش‌تر است. دبی حجمی و زمان تابش نور در درصد حذف DCF تأثیر مثبت دارند در صورتیکه پارامترهای غلظت اولیه DCF و pH در پاسخ تأثیر منفی دارند. همچنین pH مناسب برای حذف DCF، pH بین ۴ تا ۴/۵ به دست آمد.

تعارض منافع

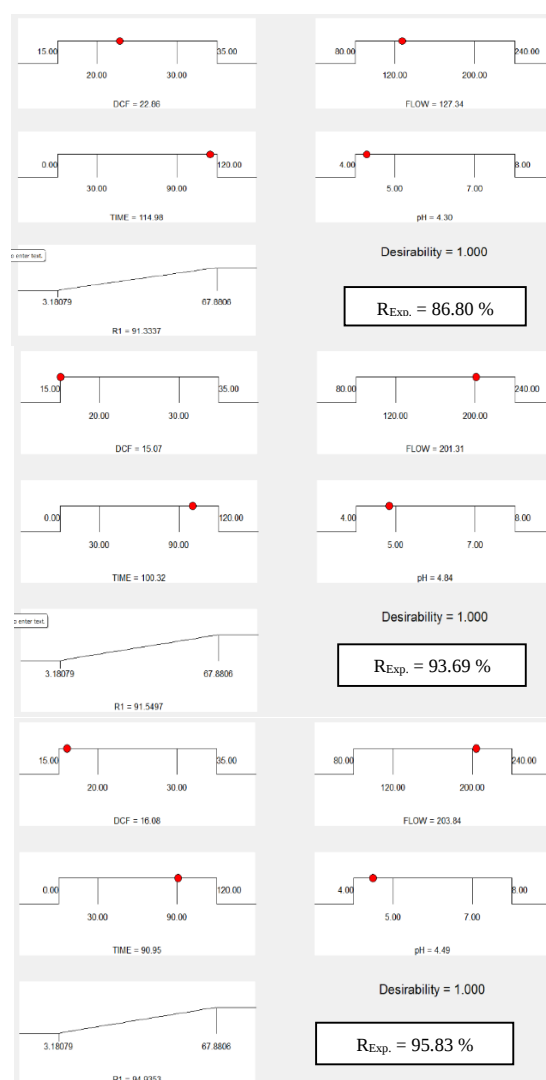
نویسنده هیچگونه تعارض منافی برای اعلام ندارد.

منابع

- [1] Daneshvar, N., 2009, Chemistry of water & wastewater treatment, First Edition, Amidi Pub., pp. 215-269. (in Persian)
- [2] Sathishkumar, P., Mangalaraja, R.V., Anandan, S., 2016, Review on the recent improvements in sonochemical and combined sonochemical oxidation processes – A powerful tool for destruction of environmental contaminants, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55, 426.
- [3] Gharbani, P., 2024, Investigating the efficiency of graphene oxide in the adsorption of 2-chlorophenol from aqueous solutions as an environmental pollutant, Environmental



شکل (۷): نمودار داده‌های تجربی در مقابل پاسخ‌های حاصله از روش CCD



شکل (۸): سه نمونه از شرایط بهینه پیشنهادی به روش CCD

- [13] Rizzo, L., Meric, S., Kassinos, D., Guida, M., Russo, F., Belgiorno, V., 2009, Degradation of diclofenac by TiO_2 photocatalysis: UV absorbance kinetics and process evaluation through a set of toxicity bioassays, *Water Research*, 43, 979.
- [14] Achilleos, A., Hapeshi, E., Xekoukoulotakis, N.P., Mantzavinos, D., Fatta-Kassinos, D., 2010, Factors affecting diclofenac decomposition in water by UV-A/ TiO_2 photocatalysis, *Chemical Engineering Journal*, 161, 53.
- [15] Całus-Makowska, K., Grosser, A., Grobelak, A., Białek, H., Siedlecka, E., 2024, Kinetic study of the simultaneous removal of ibuprofen, carbamazepine, sulfamethoxazole, and diclofenac from water using biochar and activated carbon adsorption, and TiO_2 photocatalysis, *Desalination and Water Treatment*, 320, 100817.
- [16] Amini-Badr, A., Behnajady, M.A., 2024, Photocatalytic removal of cefazolin in a photoreactor packed with TiO_2 -P25 nanoparticles supported on glass beads: An artificial neural network modeling, *International Journal of Environmental Analytical*, 104, 5713.
- [17] Shargh, M., Behnajady, M.A., 2016, Optimization of photocatalytic activity of immobilized TiO_2 -P25 nanoparticles in the removal of phenazopyridine using response surface methodology, *Russian Journal of Applied Chemistry*, 89, 1544.
- Pollution and Sustainable Urban Development, 1(3), 63. (in Persian)
- [4] Guyer, G.T., Ince, H., N., 2010, Degradation of diclofenac in water by homogeneous and heterogeneous sonolysis, *Ultrasonics Sonochemistry*, 18, 114.
- [5] Eskandarloo, H., 2024, A review of new methods of removing environmental pollutants: Photolysis and UV/ H_2O_2 processes, *Environmental Pollution and Sustainable Urban Development*, 1(1), 1. (in Persian)
- [6] Zafari, S.H., 2024, Removal of p-nitrophenol from aqueous environments by UV/ $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ process in a continuous photoreactor: Optimization by Taguchi method, *Environmental Pollution and Sustainable Urban Development*, 1(1), 33. (in Persian)
- [7] Airemlou, L., 2024, Synthesis of ZnO/SnO_2 nanocomposite loaded with silver via liquid impregnation method and investigation of its photocatalytic activity in removing an environmental pollutant under visible light irradiation, *Environmental Pollution and Sustainable Urban Development*, 1(2), 85. (in Persian)
- [8] Mohammadpour Koselar, Z., Ghazi Tabatabaei, Z., 2024, Design of multifunctional photocatalysts with g- C_3N_4 and its applications in sustainable technologies, *Environmental Pollution and Sustainable Urban Development*, 1(3), 29. (in Persian)
- [9] Fujishima, A., Honda, K., 1972, Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode, *Nature*, 238, 37.
- [10] Park, Y., Kim, S., Kim, J., Khan, S., Han, C., 2022, UV/ TiO_2 photocatalysis as an efficient livestock wastewater quaternary treatment for antibiotics removal, *Water*, 14, 958.
- [11] Silva, V., Louros, V.L., Silva, C.P., Tacão, M., Otero, M., Calisto, V., Lima, D.L.D., 2024, A solar flow photo-reactor for antibiotic removal from aquaculture effluents using TiO_2 /carbon quantum dots, *Chemosphere*, 348, 140723.
- [12] Hu, Y.-L., Liu, Y., Fu, W., Yang, H., 2024, Efficiency and mechanism of enhanced norfloxacin removal using amorphous TiO_2 -modified biochar, *Environmental Pollution*, 351, 124027.

“Research article”

Removal of diclofenac from aqueous media by UV/TiO₂ process in a fixed-bed batch photoreactor: Optimization by response surface methodology

Aysan Rahimpour-Javid*

Department of Chemistry, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran

*Corresponding author: a.rahimpourjavid@gmail.com

(Received: 14 April 2025, Accepted: 26 April 2025)

Abstract

In this study, the removal of a pharmaceutical contaminant, diclofenac (DCF), using the UV/TiO₂ process in a fixed-bed batch photoreactor was investigated. The effective operating conditions influencing the process efficiency were optimized using Response Surface Methodology (RSM) of the Central Composite Design (CCD) type. The results of the experimental design indicated a positive effect of light irradiation time and volumetric flow rate, and a negative effect of initial DCF concentration and pH on the removal efficiency of DCF from aqueous media. Among the studied parameters, irradiation time and pH were found to be the most influential. The optimal pH for DCF removal in this process was approximately 4.5.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Fixed-bed batch photoreactor, Diclofenac, Response surface methodology, Central composite design, UV/TiO₂



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره ۱، شماره ۴، پیاپی ۴
زمستان ۱۴۰۳، صفحات ۷۸-۷۱

"مقاله پژوهشی"

بررسی کارایی نانوذرات نیکل اکسید در حذف اسید قرمز ۹۷ به عنوان یک آلاینده محیط زیست از محیط‌های آبی

فرانک صادقی*

دانش آموخته دکتری شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: f_sadeghi77@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱)

چکیده

در این کار تحقیقی حذف اسید قرمز ۹۷ (AR97) به عنوان یک آلاینده مدل از صنایع نساجی با استفاده از نانوذرات NiO از محیط‌های آبی مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا اندازه و خلوص نانوذرات NiO به ترتیب با استفاده از تکنیک‌های TEM و XRD مشخص گردید. در ادامه کارایی نانوذرات NiO برای جذب سطحی و حذف AR97 مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوذرات NiO جذب موثری برای حذف AR97 از محیط‌های آبی می‌باشند. بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی نظیر دما، pH، مقدار جاذب و غلظت اولیه آلاینده (AR97) در کارایی جذب سطحی نانوذرات NiO مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بهینه بدست آمده از بررسی این پارامترها (دما، pH، مقدار جاذب و غلظت اولیه AR97) به ترتیب عبارتند از ۲۵ °C، ۲، ۴ g L⁻¹ و ۱۰ mg L⁻¹ می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: اسید قرمز ۹۷، جذب سطحی، نانوذرات NiO، پارامترهای عملیاتی

مقدمه

آلودگی آب به معنای تغییر در مواد محلول یا معلق، دما و سایر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن است، به گونه‌ای که آب برای مصرف مورد نظر، زیان‌آور یا نامناسب شود. مواد آلوده‌کننده آب شامل هر نوع ماده یا عامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی هستند که باعث آلودگی یا افزایش آن می‌شوند. این آلودگی‌ها بسیار متنوع بوده و از منابع مختلف و از طریق راه‌های گوناگون وارد آب می‌شوند و اثرات هر کدام بستگی به نوع و مقدار ماده آلوده‌کننده دارد. در سال‌های اخیر، رشد فزاینده فعالیت‌های صنعتی، مشکلات زیست‌محیطی متعددی را به وجود آورده و آلاینده‌های خطرناکی را وارد اکوسیستم کرده است. ورود پساب‌های صنعتی به محیط، نیازمند تصفیه‌های اولیه است. از آنجا که این امر هزینه‌بر است، باید تلاش کرد تا با کاهش حجم پساب، غلظت آلاینده‌ها، یکنواخت‌سازی و خنثی‌سازی آن، این هزینه‌ها را کاهش داد. از جمله این آلاینده‌ها می‌توان به پساب کارخانجات تولید مواد رنگی و نساجی اشاره کرد (۳-۱). در طی سال‌های اخیر فرایندهای زیادی برای حذف آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که عبارتند از: اسمز معکوس، مبادله یون، الکترولیز و جذب سطحی (۴). در مورد پساب صنایع رنگ و نساجی، بیش‌تر از روش جذب سطحی با استفاده از جاذب‌های مختلف استفاده می‌شود. در این فرآیند، آلاینده‌ها در سطح جاذب جذب شده و با حذف جاذب از محیط، آلاینده نیز حذف می‌شود. مواد سمی، یون‌های خطرناک و رنگ‌های موجود در فاضلاب‌های صنعتی، ارتباط مستقیمی با سلامت محیط زیست و

انسان دارند. با استفاده از جاذب‌های جامد می‌توان سمیت پساب‌ها را کاهش داد و مواد آلی مضر را از فاضلاب‌های صنعتی حذف کرد. پساب‌های صنعت رنگ حاوی مقادیر بالایی از گونه‌های رنگی هستند که برای برخی از ارگانیسم‌ها سمی بوده و برای موجودات آبی مضر هستند. بنابراین، حذف رنگ‌ها از محیط‌های آبی ضروری است. در میان روش‌های مختلف تصفیه، جذب سطحی یکی از مؤثرترین و معتبرترین روش‌ها به شمار می‌رود. تمایل زیادی به استفاده از مواد ارزان‌قیمت و در دسترس برای تصفیه فاضلاب ایجاد شده است. مواد متنوعی مانند خاک‌های معدنی، تفاله‌های نیشکر، چوب و زغال سنگ به عنوان جایگزین کربن فعال به کار می‌روند. اگرچه ظرفیت جذبی این مواد نسبت به کربن فعال کم‌تر است، اما جاذب‌های جدید با ظرفیت بالا در حال توسعه هستند. از جمله جاذب‌های مورد استفاده می‌توان به کربن فعال، نانوذرات اکسیدی مانند تیتانیوم دی‌اکسید، نیکل اکسید، منیزیم اکسید و گرافن اکسید اشاره کرد (۱۳-۵).

در این تحقیق، هدف ما استفاده از نانوذرات تجاری نیکل اکسید (NiO) به عنوان جاذب در جذب سطحی اسید قرمز ۹۷ (AR97) و بررسی پارامترهای عملیاتی مؤثر در راندمان حذف است.

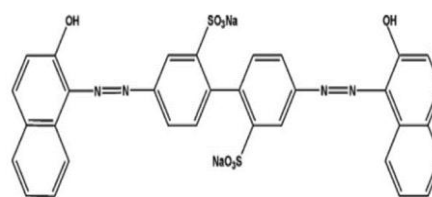
بخش تجربی

- مواد مورد استفاده

AR97 از شرکت Sigma-Aldrich و نانوذرات NiO از شرکت نانوطب تهیه شدند. به منظور بررسی ساختار و مشخصه‌یابی نانوذرات NiO از تکنیک‌های

¹ C.I. Acid Red 97

پراش اشعه X (XRD) و TEM استفاده شد. AR97 به عنوان رنگ در صنایع نساجی کاربرد دارد و ساختار شیمیایی آن در شکل (۱) نشان داده شده است. طول موج جذبی حداکثر این ترکیب در ۴۹۸ نانومتر قرار دارد و از همین طول موج برای تعیین غلظت محلول‌های مجهول و رسم منحنی کالیبراسیون استفاده شده است.



شکل (۱): ساختار مولکولی AR97

دقیقه یک‌بار، حدود ۵ میلی‌لیتر از محلول نمونه‌برداری شد. نمونه‌های برداشته شده بلافاصله در سانتریفیوژ (Hettich EBA 3S) قرار گرفتند و پس از جداسازی جاذب از آلاینده، جذب نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج حداکثر (۴۹۸ نانومتر) قرائت شد. با استفاده از نمودار کالیبراسیون و جذب بدست آمده، غلظت نمونه مورد نظر محاسبه شد. برای محاسبه درصد حذف نیز از معادله (۱) استفاده گردید.

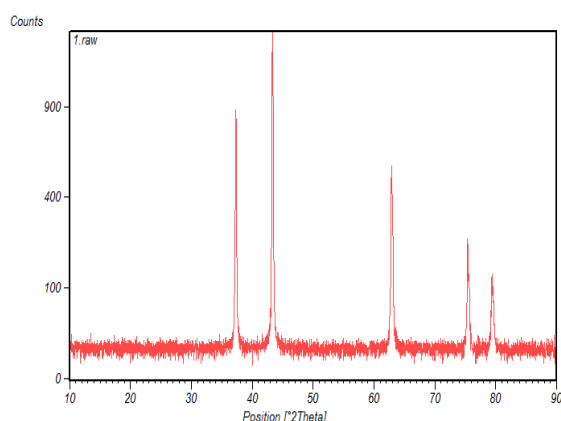
$$R\% = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

C_0 و C_t به ترتیب غلظت اولیه و غلظت آلاینده در لحظه مورد نظر (mg L^{-1}) می‌باشد.

نتایج و بحث

- مشخصه‌یابی نانوذرات NiO

به منظور تعیین ساختار کریستالی نانوذرات NiO از روش طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) استفاده شده است. طیف XRD مربوط به نانوذرات NiO در شکل (۲) نشان داده شده است.



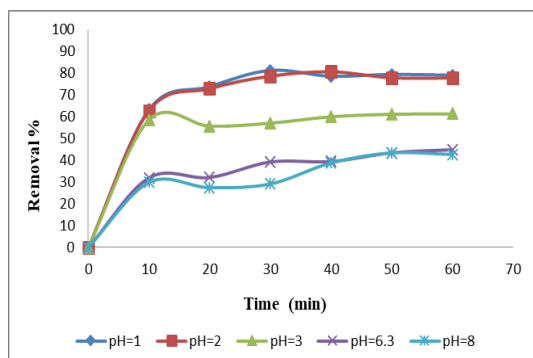
شکل (۲): طیف XRD نانوذرات NiO

با استناد به کارت استاندارد NiO (JCPDS Card No. 00-004-0835)، وجود پیک‌هایی در 2θ های

- بررسی کارایی نانوذرات NiO در حذف AR97 از محیط‌های آبی

برای انجام آزمایش، ابتدا ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول AR97 با غلظت‌های معین (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و 60 mg L^{-1}) از محلول مادر تهیه شد و به عنوان محلول آلاینده در ارلن ۲۰۰ میلی‌لیتری ریخته شد. با استفاده از pH متر (WTW، مدل ۷۱۱۰)، pH محلول در مقدار مشخص (۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸) تنظیم گردید. سپس، میزان جذب اولیه این محلول با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر UV-Vis (Shimadzu، مدل UV mini-1240) اندازه‌گیری شد. در ادامه، مقادیر مشخصی از نانوذرات NiO (۰/۵، ۱، ۲، ۳ و 4 g L^{-1}) پس از توزین با ترازوی دقیق با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم (AND) به عنوان جاذب به محلول اضافه گردید. سپس محتویات ارلن در داخل شیکر حاوی حمام آب (Julabo، مدل SW-20C) با دمای ثابت (۲۵ و ۴۵ سانتی‌گراد) با سرعت ۱۴۰ rpm هم‌زده شد. هر ۱۰

پس از آن تغییر چشم‌گیری در میزان جذب مشاهده نمی‌شود.



شکل (۴): تأثیر pH بر فرآیند جذب سطحی AR97 توسط

نانوذرات NiO

شرایط آزمایش: $[\text{NiO}] = 4 \text{ g L}^{-1}$, $[\text{AR97}]_0 \approx 50 \text{ mg L}^{-1}$

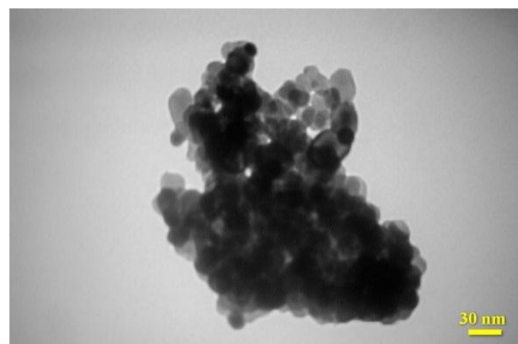
$T \approx 25^\circ\text{C}$

تأثیر مثبت pH های اسیدی بر راندومان فرایند را می‌توان با توجه به بار سطحی جاذب و مقدار pH_{ZPC} آن توضیح داد. در شرایطی که $\text{pH} < \text{pH}_{\text{ZPC}}$ است، سطح جاذب در نتیجه جذب سطحی یون‌های پروتون بار مثبت پیدا می‌کند و در $\text{pH} > \text{pH}_{\text{ZPC}}$ در حضور یون‌های هیدروکساید سطح جاذب پروتون‌زدایی شده و سطح جاذب بار منفی خواهد داشت. با توجه به pH_{ZPC} نانوذرات NiO که حدود ۸ است (۱۴)، در pH های کم‌تر از این مقدار، سطح جاذب دارای بار مثبت است. از آنجا که AR97 دارای بار منفی است، در pH های پایین به دلیل جاذبه الکترواستاتیک بیش‌تر بین جاذب و ماده جذب شونده، میزان جذب سطحی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (۱۵).

- بررسی اثر مقدار جاذب

شکل (۵) نتایج بررسی اثر مقدار جاذب بر جذب سطحی AR97 توسط نانوذرات NiO را نشان می‌دهد.

$79/48^\circ$ و $75/28^\circ$ ، $62/88^\circ$ ، $43/28^\circ$ ، $37/28^\circ$ نشان دهنده کریستال‌های خالص مکعبی شکل NiO است. هرچه شدت این پیک‌ها بیشتر باشد، نشان می‌دهد که نانوذرات بلورینگی بیشتری دارند و هر چقدر پهنای پیک‌های حاصله بیشتر باشد، نشان‌دهنده ریزتر بودن نانوذرات است. تصویر TEM نانوذرات NiO نیز در شکل (۳) ارائه شده است. این تصویر وجود ذراتی در ابعاد نانو را نشان می‌دهد.



شکل (۳): تصویر TEM نانوذرات NiO

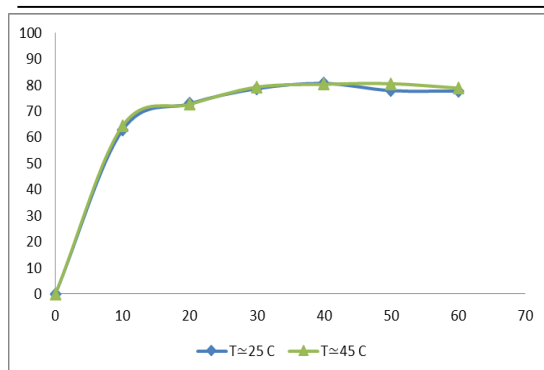
- بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر راندومان جذب

سطحی AR97 بر روی نانوذرات NiO

- بررسی اثر pH

نتایج مربوط به بررسی اثر pH بر روند جذب سطحی AR97 بر روی نانوذرات NiO در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که pH مطلوب جهت حذف AR97 توسط نانوذرات NiO، pH های ۱ و ۲ می‌باشد. از آنجایی که اختلاف بین میزان جذب سطحی در pH های ۱ و ۲ ناچیز است، pH برابر با ۲ به عنوان pH بهینه انتخاب گردید. همچنین شکل (۴) به خوبی نشان می‌دهد که فرآیند جذب سطحی در حدود ۴۰ دقیقه به تعادل می‌رسد و

¹ Zero Point Charge

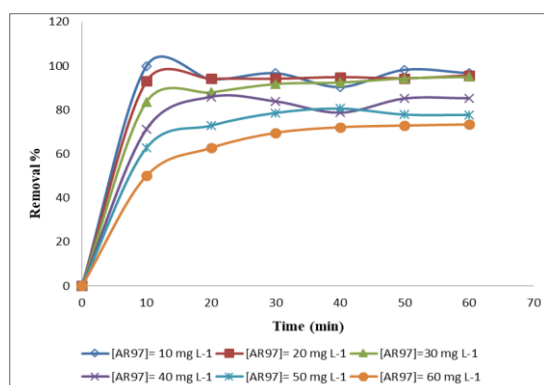


شکل (۶): تأثیر دما بر فرآیند جذب سطحی AR97 بر روی نانوذرات NiO

شرایط آزمایش: $\text{pH} = 2$, $[\text{AR97}]_0 \approx 50 \text{ mg L}^{-1}$, $\text{NiO} = 4 \text{ g L}^{-1}$

- بررسی اثر غلظت اولیه AR97

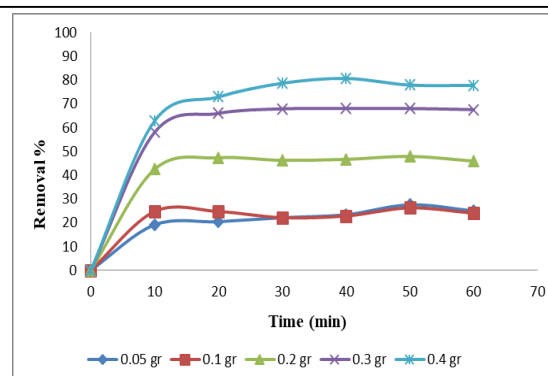
شکل (۷) اثر غلظت اولیه AR97 بر جذب سطحی آن توسط نانوذرات NiO را نشان می‌دهد.



شکل (۷): تأثیر غلظت اولیه AR97 بر فرآیند جذب سطحی آن بر روی نانوذرات NiO

شرایط آزمایش: $\text{pH} = 2$, $T \approx 25^\circ\text{C}$, $\text{NiO} = 4 \text{ g L}^{-1}$

نتایج به وضوح نشان می‌دهند که با افزایش غلظت اولیه آلاینده (AR97)، درصد حذف آن کاهش می‌یابد. علت این امر این است که با افزایش غلظت اولیه آلاینده، جایگاه‌های فعال جاذب به سرعت اشغال شده و جاذب قادر به جذب سطحی بیش‌تر آلاینده نیست. به عبارت دیگر، اشباع شدن سطح جاذب و محدودیت



شکل (۸): تأثیر مقدار نانوذرات NiO به عنوان جاذب بر جذب سطحی AR97

شرایط آزمایش: $\text{pH} = 2$, $[\text{AR97}]_0 \approx 50 \text{ mg L}^{-1}$, $T \approx 25^\circ\text{C}$

همانطور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش مقدار جاذب، درصد جذب سطحی AR97 نیز افزایش می‌یابد. این افزایش را می‌توان به افزایش سطح در دسترس برای جذب سطحی آلاینده و وجود جایگاه‌های جذبی بیش‌تر برای غلظت معینی از ماده جذب‌شونده نسبت داد (۱۶). بر اساس این نتایج، مقدار جاذب بهینه ۰/۴ گرم (4 g L^{-1}) انتخاب شد، زیرا افزایش بیش‌تر از این مقدار، تأثیر چشم‌گیری بر حذف نداشته و از نظر اقتصادی استفاده از مقادیر بیش‌تر NiO به عنوان جاذب مقرون به صرفه نمی‌باشد.

- بررسی اثر دما

نتایج بررسی اثر دما بر جذب سطحی AR97 توسط نانوذرات NiO در دماهای ۲۵ و ۴۵ سانتی‌گراد در شکل (۶) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش دما به میزان ۲۰ درجه تأثیر قابل توجهی بر فرآیند جذب سطحی ندارد. بنابراین، دمای ۲۵ سانتی‌گراد برای ادامه آزمایش‌ها انتخاب شد.

- [4] Zafari, S.H., 2024, Removal of p-nitrophenol from aqueous environments by UV/S₂O₈²⁻ process in a continuous photoreactor: Optimization by Taguchi method, *Environmental Pollution and Sustainable Urban Development*, 1(1), 33. (in Persian)
- [5] Ghorbani-Khosrowshahi, S., Behnajady, M.A., 2016, Chromium (VI) adsorption from aqueous solution by prepared biochar from *Onopordom Heteracanthom*, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13, 1803.
- [6] Behnajady, M.A., Yavari, Sh., Modirshahla, N., 2014, Investigation on adsorption capacity of TiO₂-P25 nanoparticles in the removal of a mono-azo dye from aqueous solution: A comprehensive isotherm analysis, *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 20, 97.
- [7] Sattarfard, R., Behnajady, M.A., Eskandarloo, H., 2018, Hydrothermal synthesis of mesoporous TiO₂ nanotubes and their adsorption affinity toward Basic Violet 2, *Journal of Porous Materials*, 25, 359.
- [8] Behnajady, M.A., Bimeghdar, S., 2013, Synthesis of mesoporous NiO nanoparticles and their application in the adsorption of Cr(VI), *Chemical Engineering Journal*, 239, 105.
- [9] Mahmoudi, E., Behnajady, M.A., 2018, Synthesis of Fe₃O₄@NiO core-shell nanocomposite by the precipitation method and investigation of Cr(VI) adsorption efficiency, *Colloids and Surfaces A*, 538, 287.
- [10] Galvani, G.M., Zito, C.A., Perfecto, T.M., Malafatti, J.O.D., Paris, E.C., Volanti, D.P., 2022, Two-dimensional NiO nanosheets for efficient Congo Red adsorption removal, *Materials Chemistry and Physics*, 290, 126591.
- [11] Tahir, H., Anwer, M., Khan, S., Saad, M., 2024, Enhancement of adsorption and photocatalytic activity of MgO nanoparticles for the treatment of textile dye using ultrasound assisted process by Response Surface Methodology, *Desalination and Water Treatment*, 319, 100429.
- [12] Feng, Y., Xie, T., Gong, W., Xu, J., Lu, Y., Gao, L., Xu, S., Liu, B., 2025, A novel calcination-quenching synthesis of octahedral MgO crystals with highly exposed (111) facets for enhanced adsorption performance,

تعداد جایگاه‌های فعال، مانع از جذب سطحی بیش‌تر می‌شود (۱۷).

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده نشان داد که نانوذرات NiO می‌توانند به عنوان یک جاذب موثر برای حذف AR97 از محیط‌های آبی مورد استفاده قرار گیرند. بررسی اثر پارامترهای عملیاتی مختلف نشان داد که غلظت اولیه AR97، مقدار جاذب و pH تاثیر قابل توجهی در راندمان فرایند دارند، در حالی که دما تاثیر چندانی ندارد. نتایج نشان داد که کاهش غلظت اولیه آلاینده، کاهش pH و افزایش مقدار جاذب باعث افزایش راندمان حذف AR97 می‌شود. همچنین، pH بهینه برای انجام این فرایند برابر با ۲ است.

تعارض منافع

نویسنده هیچ‌گونه تعارض منافع برای اعلام ندارد.

منابع

- [1] Wang, W., Huang, G., An, C., Zhao, S., Chen, X., Zhang, P., 2018, Adsorption of anionic azo dyes from aqueous solution on cationic gemini surfactant-modified flax shives: Synchrotron infrared, optimization and modeling studies, *Journal of Environmental Management*, 172, 1986.
- [2] Eskandarloo, H., 2024, A review of new methods of removing environmental pollutants: Photolysis and UV/H₂O₂ processes, *Environmental Pollution and Sustainable Urban Development*, 1(1), 1. (in Persian)
- [3] Airemlou, L., 2024, Synthesis of ZnO/SnO₂ nanocomposite loaded with silver via liquid impregnation method and investigation of its photocatalytic activity in removing an environmental pollutant under visible light irradiation, *Environmental Pollution and Sustainable Urban Development*, 1(2), 85. (in Persian)

Separation and Purification Technology, 362, 131800.

[13] Gharbani, P., 2024, Investigating the efficiency of graphene oxide in the adsorption of 2-chlorophenol from aqueous solutions as an environmental pollutant, Environmental Pollution and Sustainable Urban Development, 1(3), 63. (in Persian)

[14] Sheela, T., Nayaka, Y.A., 2012, Kinetics and thermodynamics of cadmium and lead ions adsorption on NiO nanoparticles, Chemical Engineering Journal, 191, 123.

[15] Belessi, V., Romanos, G., Boukos, N., Lambropoulou, D., Trapalis, C., 2009, Removal of Reactive Red 195 from aqueous solutions by adsorption on the surface of TiO₂ nanoparticles, Journal of Hazardous Materials, 170, 836.

[16] Rasoulifard, M.H., Haddadi Esfahlani, F., Mehrizadeh, H., Sehati, N., 2010, Removal of C.I. Basic Yellow 2 from aqueous solution by low-cost adsorbent: Hardened paste of Portland cement, Environmental Technology, 31, 277.

[17] Chowdhury, S., Mishra, R., Saha, P., Kushwaha, P., 2011, Adsorption thermodynamics, kinetics and isosteric heat of adsorption of Malachite Green onto chemically modified rice husk, Desalination, 265, 159.

“Research article”

Investigation of the efficiency of nickel oxide nanoparticles in removing C.I. Acid Red 97 as an environmental pollutant from aqueous environments

Faranak Sadeghi*

Department of Chemistry, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

*Corresponding author: f_sadeghi77@yahoo.com

(Received: 16 February 2025, Accepted: 1 March 2025)

Abstract

This study investigates the removal of C.I. Acid Red 97 (AR97) as a model pollutant from textile industries using NiO nanoparticles in aqueous environments. The size and purity of NiO nanoparticles were initially determined using TEM and XRD techniques, respectively. The adsorption and removal efficiency of NiO nanoparticles for AR97 was then evaluated. The results indicated that NiO nanoparticles serve as effective adsorbent for AR97 removal. The effects of key operational parameters, including temperature, pH, amount of adsorbent, and initial pollutant concentration, on the adsorption efficiency of NiO nanoparticles were examined. The optimal conditions for AR97 removal were found to be a temperature of 25°C, pH of 2, adsorbent dosage of 4 g L⁻¹, and an initial AR97 concentration of 10 mg L⁻¹.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: C.I. Acid Red 97, Adsorption, NiO nanoparticles, Operational parameters