

“Review article”

## A comprehensive review of the health and environmental impacts of mobile phone masts and mitigation strategies

Ahmad Asl Hashemi<sup>1,2</sup>, Behzad Mohammadi Khangahi<sup>3</sup>, Gholam Hossein Safari<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Health and Environment Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

<sup>2</sup>Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

<sup>3</sup>Student Research Committee, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

\* Corresponding author: hsafari13@yahoo.com

(Received: 5 November 2025, Accepted: 13 December 2025)

### Abstract

The rapid expansion of mobile communication technologies has led to the widespread deployment of base stations in urban and rural areas. These infrastructures provide stable wireless connectivity through non-ionizing radiofrequency (RF) electromagnetic fields. This review aims to systematically analyze the health and environmental impacts of mobile phone base stations and to identify priorities for future research. A comprehensive review of epidemiological, experimental, and environmental studies was conducted. Human health indicators included non-specific symptoms, neurodegenerative disorders, genetic alterations, and tumor occurrence. Environmental endpoints encompassed plant growth, bird behavior, and pollinator activity. Evidence suggests that chronic RF exposure may be associated with non-specific symptoms such as headaches, sleep disturbances, decreased concentration, and fatigue. Although findings remain inconclusive, some studies indicate potential links with neurodegenerative disorders and tumors. Vulnerable populations, including children, older adults, and pregnant women, may be at higher risk due to physiological sensitivity and longer cumulative exposure. Environmentally, RF exposure may affect plant physiology, disrupt bird orientation and reproductive behavior, and reduce pollinator activity, posing threats to biodiversity and ecosystem services. While definitive causal links between mobile phone base stations and severe health outcomes are lacking, converging evidence underscores the need for large-scale, longitudinal, and interdisciplinary studies. Transparent risk communication, continuous environmental monitoring, and the adoption of innovative engineering solutions are essential to balance the benefits of mobile networks with protection of human and ecological health.

**Conflict of interest:** None declared.

**Keywords:** Mobile phone base stations, RF radiation, Health effects, Environmental effects, Mitigation strategies, Public health



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

دوره ۲، شماره ۳، پیاپی ۷  
پاییز ۱۴۰۴، صفحات ۱۸-۱

«مقاله مروری»

## مروری جامع بر اثرات بهداشتی و محیط زیستی دکل‌های تلفن همراه و راهبردهای کاهش اثرات

احمد اصل هاشمی<sup>۱</sup>، بهزاد محمدی خانقاهی<sup>۳</sup>، غلام‌حسین صفری<sup>۲،۱\*</sup>

<sup>۱</sup>مرکز تحقیقات سلامت و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

<sup>۲</sup>گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

<sup>۳</sup>کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

\*نویسنده مسئول مکاتبات: hsafari13@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۹/۲۲)

### چکیده

گسترش سریع فناوری‌های ارتباطات سیار موجب استقرار گسترده ایستگاه‌های پایه مخابراتی (دکل‌های تلفن همراه) در مناطق شهری و روستایی شده است. این زیرساخت‌ها با انتشار پرتوهای الکترومغناطیسی غیر یونیزان در طیف امواج رادیوفرکانس (RF) اتصال بی‌سیم پایدار را فراهم می‌کنند. هدف این مطالعه مروری، ارائه تحلیل جامع از اثرات بهداشتی و زیست‌محیطی دکل‌های تلفن همراه و شناسایی خلأهای پژوهشی و اولویت‌های تحقیقاتی آینده است. این مقاله با مرور جامع مطالعات اپیدمیولوژیک، آزمایشگاهی و محیط‌زیستی منتشرشده، اثرات مواجهه مزمن با RF بر سلامت انسان و زیست‌مندان غیر انسانی را بررسی کرده است. شاخص‌های سلامت شامل علائم غیر اختصاصی، اختلالات نورودژنراتیو، تغییرات ژنتیکی و تومورها و شاخص‌های زیست‌محیطی شامل رشد گیاهان، رفتار پرندگان و فعالیت حشرات گرده‌افشان مدنظر قرار گرفته‌اند. شواهد نشان می‌دهند که مواجهه مزمن با RF می‌تواند علائم غیر اختصاصی مانند سردرد، اختلال خواب، کاهش تمرکز و خستگی ایجاد کند. شواهد غیر قطعی احتمال افزایش خطر اختلالات نورودژنراتیو و برخی تومورها را مطرح می‌کنند. گروه‌های آسیب‌پذیر شامل کودکان، سالمندان و زنان باردار در معرض ریسک بالاتری هستند. از منظر زیست‌محیطی، مواجهه با RF می‌تواند باعث کاهش نرخ رشد گیاهان، اختلال در جهت‌یابی و رفتار تولید مثلی پرندگان و کاهش فعالیت گرده‌افشان‌ها شود که تهدیدی برای تنوع زیستی و عملکرد اکوسیستم‌ها است. اگرچه پیوند قطعی میان دکل‌های تلفن همراه و پیامدهای شدید بهداشتی اثبات نشده است، شواهد موجود ضرورت پژوهش‌های میان‌رشته‌ای، طولی و با مقیاس بزرگ را نشان می‌دهند. اطلاع‌رسانی شفاف، پایش اثرات زیست‌محیطی و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین برای کاهش مواجهه، کلید مدیریت متوازن میان توسعه شبکه‌های ارتباطی و حفاظت از سلامت انسان و محیط زیست است.

**واژه‌های کلیدی:** دکل‌های تلفن همراه، پرتوهای RF، اثرات بهداشتی، اثرات زیست‌محیطی، استراتژی‌های کاهش اثرات، سلامت انسان

## مقدمه

ارتباطات سیار<sup>۱</sup> به معنای تبادل داده‌ها و گفت‌وگو از طریق شبکه‌های بی‌سیم است که توسط ایستگاه‌های پایه مخابراتی (BTS<sup>۲</sup>) یا دکل‌های تلفن همراه انجام می‌شود. این ایستگاه‌ها با انتشار امواج الکترومغناطیسی از نوع غیر یونیزان در طیف فرکانس رادیویی (RF<sup>۳</sup>) قادر به برقراری ارتباط بین کاربران و شبکه مرکزی هستند (۱ و ۲). این امواج در محدوده فرکانسی kHz ۳۰ تا ۳۰۰ GHz قرار دارند و اثرات عمدتاً حرارتی و غیرحرارتی بر بافت‌های زنده ایجاد می‌کنند (۳).

فناوری‌های سیار، به ویژه در جهان معاصر، نقش محوری در توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی ایفا می‌کنند. COSMOS یک مطالعه کوهورت بین‌المللی است که در پنج کشور اروپایی، بریتانیا، دانمارک، سوئد، فنلاند، هلند و فرانسه در مورد استفاده از تلفن همراه و سلامت انجام می‌شود. این مطالعه اثرات احتمالی استفاده طولانی مدت از تلفن‌های همراه و سایر فناوری‌های بی‌سیم بر سلامت را بررسی می‌کند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که دسترسی پایدار به شبکه‌های موبایل برای حفظ ارتباطات اجتماعی و رفاه جمعیت ضروری است (۴). علاوه بر این، فناوری‌های نوین مانند شبکه‌های سلولی کوچک<sup>۴</sup>، 5G و فیبر نوری برای افزایش پوشش و کیفیت خدمات توسعه یافته‌اند؛ این فناوری‌ها موجب افزایش تراکم انتشار RF می‌شوند و توجه به پیامدهای بهداشتی و زیست‌محیطی آن‌ها ضروری است (۵ و ۶).

با وجود مزایای فناوری‌های ارتباطی، نگرانی‌هایی در خصوص پیامدهای بلندمدت مواجهه با تابش RF وجود دارد. این نگرانی‌ها عمدتاً در سه حوزه بهداشت عمومی و سلامت انسان، زیست‌بوم و اکوسیستم‌ها و خط‌مشی و مقررات مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در حوزه بهداشت عمومی و سلامت انسان، مطالعات نشان داده‌اند افرادی که در فاصله کم‌تر از ۵۰۰ متر از ایستگاه‌های پایه زندگی می‌کنند، ممکن است علائم نورویبولوژیک مانند سردرد، اختلال خواب یا خستگی را تجربه کنند (۷ و ۸). بازبینی‌های مروری نشان داده است که ۷۳/۶ درصد مطالعات شواهدی از «بیماری ناشی از RF»، «سرطان» یا «تغییرات پارامترهای بیوشیمیایی» گزارش کرده‌اند (۹).

در زمینه زیست‌بوم و اکوسیستم‌ها، تابش RF می‌تواند فرآیندهای فیزیولوژیک گیاهان و حیوانات را تحت تأثیر قرار دهد. به عنوان مثال، اثرات بر جوانه‌زنی گیاهان، مسیر مهاجرت پرندگان و فعالیت گرده‌افشانی زنبورها مشاهده شده است (۱۰-۱۲).

مطالعات اپیدمیولوژیک درباره مواجهه با امواج دکل‌های تلفن همراه نشان داده‌اند که برخی افراد ساکن در مجاورت ایستگاه‌های پایه (BTS) شیوع بالاتری از علائمی مانند سردرد و اختلال خواب را گزارش می‌کنند؛ هرچند این یافته‌ها به دلیل محدودیت‌های روش‌شناختی همچنان قطعی تلقی نمی‌شوند (۷ و ۱۳). همچنین مطالعات حاکی از ۷۳/۹ درصد شواهد مرتبط با سرطان و تغییرات بیوشیمیایی هستند (۹). با این حال، سازمان جهانی بهداشت

<sup>1</sup> Mobile Communications

<sup>2</sup> Base Transceiver Station

<sup>3</sup> Radiofrequency

<sup>4</sup> Small cell

بزرگ وجود دارد (۹ و ۲۰). پیامدهای بهداشتی و زیست‌محیطی ایستگاه‌های پایه تلفن همراه در شکل (۱) نشان داده شده است.

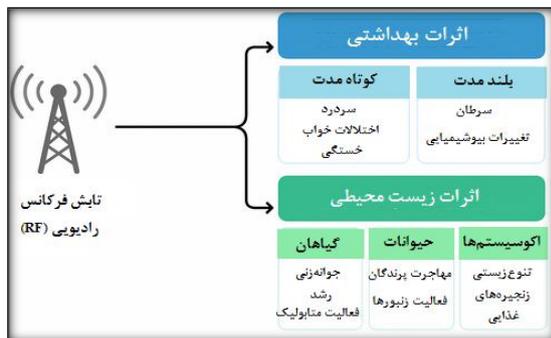
با توجه به اهمیت موضوع، هدف این مقاله مروری عبارت است از:

۱- ارائه خلاصه‌ای علمی از ادبیات شناخته شده در زمینه اثرات بهداشتی و زیست‌محیطی ناشی از دکل‌های تلفن همراه؛

۲- شناسایی شکاف‌ها و کاستی‌های پژوهشی، شامل کمبود داده‌های طولی، ناکافی بودن اندازه‌گیری مواجهه و کنترل متغیرهای مداخله‌گر؛

۳- معرفی راهکارهای فنی و سیاستی برای کاهش مواجهه RF، شامل فناوری‌هایی مانند شبکه‌های سلولی کوچک، ساختارهای فیبر نوری و طراحی شبکه‌های 5G بهینه شده؛

۴- ارائه توصیه‌هایی در زمینه بهبود استانداردها، اطلاع‌رسانی عمومی و توسعه پژوهش‌های بلندمدت میان‌رشته‌ای.



شکل (۱): پیامدهای بهداشتی و زیست‌محیطی ایستگاه‌های پایه تلفن همراه

(WHO<sup>۱</sup>) و آژانس حفاظت در برابر تشعشع و ایمنی هسته‌ای استرالیا (ARPANSA<sup>۲</sup>) تأکید دارند که در سطوح مواجهه عمومی، شواهد قطعی از زیان‌بار بودن RF مشاهده نشده است (۱۶-۱۴).

افزون بر این، برخی گروه‌ها نظیر کارکنان آتش‌نشانی نگرانی‌هایی درباره اثرات احتمالی طولانی‌مدت بر سیستم عصبی و ایمنی در نتیجه مواجهه مداوم با میدان‌های RF مطرح کرده‌اند (۸). با این حال، آزمون‌های کنترل‌شده - از جمله مطالعات دوسوکور - نشان داده‌اند افرادی که خود را «حساس به امواج» می‌دانند، در شرایط استاندارد آزمایشگاهی قادر به تشخیص حضور یا عدم حضور سیگنال RF نیستند (۱۶).

در حوزه محیط زیست، پژوهش‌های انجام‌شده روی گیاهان و جانوران گزارش کرده‌اند که میدان‌های RF می‌توانند برخی فرآیندهای فیزیولوژیک و رفتاری را به‌ویژه در گونه‌هایی مانند زنبورها و پرندگان متکی بر جهت‌یابی مغناطیسی، تحت تأثیر قرار دهند (۱۰ و ۱۹-۱۷).

برخی پژوهش‌ها معتقدند استانداردهای موجود برای مواجهه RF مانند کمیسیون بین‌المللی حفاظت در برابر پرتوهای غیر یونیزان (ICNIRP<sup>۳</sup>) عمدتاً بر اثرات حرارتی تمرکز دارند و اثرات غیرحرارتی را لحاظ نمی‌کنند (۲۰ و ۲۱).

بررسی مطالعات موجود مروری نشان می‌دهند که داده‌های بلندمدت درباره اثرات غیر اختصاصی ناکافی و متناقض‌اند و نیاز به مطالعات طولی با اندازه نمونه

<sup>1</sup> World Health Organization

<sup>2</sup> Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency

<sup>3</sup> International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

## روش اجرای تحقیق

## - نوع مطالعه

این پژوهش یک مطالعه مروری جامع - روایتی است که با هدف گردآوری، تجمیع و تحلیل انتقادی شواهد علمی موجود درباره اثرات مواجهه با میدان‌های الکترومغناطیسی فرکانس رادیویی (RF-EMF) بر سلامت انسان و اکوسیستم انجام شد.

## - جستجوی منابع و داده‌ها

فرایند جستجوی منابع بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ در پایگاه‌های علمی معتبر شامل Scopus، PubMed، ScienceDirect، IEEE Xplore، Web of Science، SpringerLink و Google Scholar انجام گرفت. انتخاب کلیدواژه‌ها بر اساس ترکیبی از موارد زیر انجام گرفت:

۱- استخراج واژگان پرتکرار در ادبیات موضوع؛

۲- اصطلاحات رایج در پایگاه‌های علمی حوزه EMF و سلامت؛

۳- کلیدواژه‌هایی که در مقالات کلیدی و پرارجاع این حوزه استفاده شده بودند؛

۴- پوشش سه محور اصلی پژوهش (نوع پرتو، منبع انتشار، پیامدهای سلامت و محیط زیست).

کلیدواژه‌های مورد استفاده شامل ترکیب‌هایی از اصطلاحات زیر بود:

Radiofrequency Electromagnetic Fields (RF-EMF) -  
Mobile Phone Base Stations -  
Health Effects -  
Ecological Impacts -  
Environmental Health -  
Electromagnetic Hypersensitivity (EHS) -  
Non-Ionizing Radiation -

همچنین منابع خاکستری شامل گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی (IEEE، ICNIRP، WHO)

(ARPANSA) و سازمان ملی استاندارد ایران نیز مورد بررسی قرار گرفتند. در مجموع ۳۱۲ منبع اولیه بازیابی شد. که پس از غربالگری، ۵۸ منبع نهایی برای تحلیل محتوا انتخاب شدند. فرآیند غربالگری در دو مرحله و توسط دو پژوهشگر به صورت مستقل انجام شد:

۱- غربالگری عنوان و چکیده: حذف مطالعات نامرتب با دکل‌های تلفن همراه، میدان‌های RF، یا اثرات سلامت و محیط زیست.

۲- ارزیابی متن کامل: انتخاب منابعی که مستقیماً به پیامدهای بالینی، اپیدمیولوژیک، زیست‌محیطی یا استانداردهای مواجهه با RF مربوط بودند. اختلاف‌نظرهای احتمالی میان دو پژوهشگر، بدون نیاز به داور سوم، از طریق بحث و توافق حل شد.

## - معیارهای انتخاب منابع

- مطالعات منتشر شده در مجلات معتبر علمی یا گزارش‌های رسمی سازمان‌های بین‌المللی؛ مقالات تجربی، اپیدمیولوژیک، مرورهای نظام‌مند مرتبط با مواجهه انسانی یا اثرات زیست‌محیطی RF-EMF.

- مقالات با چکیده و متن کامل در دسترس به زبان انگلیسی یا فارسی.

- گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی و ملی.

## - روش تحلیل و دسته‌بندی محتوا

منابع انتخاب‌شده بر اساس رویکرد تحلیل محتوای کیفی بررسی شدند. ابتدا داده‌ها در سه محور اصلی دسته‌بندی شدند:

- اثرات بر سلامت انسان (علائم خودگزارش‌شده، اثرات عصبی-شناختی، سرطان‌زایی، اثرات بر کودکان و گروه‌های حساس)

– اثرات زیست‌محیطی و اکولوژیک (گیاهان، پرندگان، حشرات، درختان و اکوسیستم‌های شهری)  
 – استانداردها و سیاست‌گذاری‌ها (حدود مجاز مواجهه، نقدها و پیشنهادها برای بازنگری)  
**تاریخچه استقرار دکل‌های تلفن همراه**

ظهور ارتباطات سیار به دهه ۱۹۸۰ میلادی بازمی‌گردد، زمانی که نسل اول تلفن‌های همراه (1G) مبتنی بر سیگنال‌های آنالوگ معرفی شد. با ورود نسل دوم (2G) در اوایل دهه ۱۹۹۰، نیاز به استقرار گسترده‌تر BTS برای پوشش‌دهی افزایش یافت. در این دوره، رشد نمایی تعداد کاربران، موجب گسترش چشمگیر زیرساخت‌های مخابراتی شد (۲۲). نسل‌های سوم (3G) و چهارم (4G) نیز به دلیل افزایش شدید ترافیک داده، استقرار دکل‌ها را به‌ویژه در مناطق شهری تشدید کردند (۲۳). در نسل پنجم (5G)، به دلیل استفاده از فرکانس‌های بالاتر و نیاز به سلول‌های کوچک، تراکم ایستگاه‌ها به سطحی بی‌سابقه رسید (۲۴). افزایش تاریخی در تعداد و تراکم دکل‌ها، توجه محققان و سیاست‌گذاران را به پیامدهای احتمالی ناشی از مواجهه جمعیتی با پرتوهای رادیوفرکانس جلب کرده است. از زمان راه‌اندازی تلفن‌های همراه در دهه ۱۹۸۰، تعداد کل مشترکین تلفن همراه و ایستگاه‌های پایه نصب شده به طور قابل توجهی افزایش یافته است. تعداد اشتراک‌های جهانی موبایل در سال ۲۰۱۳ ۶/۷ میلیارد بود. در نتیجه بهبود عملکرد سیستم، انواع دستگاه‌ها و برنامه‌های جدید پرکاربرد، تعداد اشتراک‌های جهانی موبایل در آینده به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت. تخمین زده شده است که تعداد اشتراک‌های جهانی موبایل می‌تواند در سال

۲۰۲۵ به ۱۳/۸ میلیارد و در سال ۲۰۳۰ به ۱۷/۱ میلیارد برسد. (۲۵). از زمان ظهور تلفن‌های همراه، نگرانی‌هایی در مورد خطرات بالقوه سلامتی ناشی از قرار گرفتن در معرض RF و EMF مایکروویو مطرح شده است (۲۶). از اوایل دهه ۱۹۹۰، ده‌ها هزار ایستگاه پایه در کشورهایی که شبکه‌های دیجیتال معرفی شده‌اند، ساخته شده‌اند. در حالی که سیستم‌های قدیمی‌تر با تعداد کم ایستگاه‌های پایه، به سختی مورد توجه عموم قرار گرفته‌اند. افزایش گسترده ایستگاه‌های پایه، منجر به نگرانی‌های عمومی در سراسر جهان شده است (۲۷).

### اصول تابش امواج رادیوفرکانس

ایستگاه‌های پایه تلفن همراه با انتشار امواج الکترومغناطیسی در محدوده رادیوفرکانس (معمولاً ۴۰۰ مگاهرتز تا ۳ گیگاهرتز در 2G-4G و تا ۲۶ گیگاهرتز در 5G) امکان ارتباط بی‌سیم پایدار را فراهم می‌کنند (۳). این امواج در دسته پرتوهای غیر یونیزان قرار می‌گیرند، یعنی انرژی آن‌ها برای شکستن پیوندهای مولکولی کافی نیست، اما می‌توانند منجر به گرمایش بافتی شوند (۲۸). شاخص اصلی برای سنجش میزان جذب در واحد جرم توسط بدن انسان در مواجهه با میدان الکترومغناطیسی فرکانس رادیویی، نرخ جذب ویژه تلفن همراه ( $SAR^1$ ) است که به وات بر کیلوگرم اندازه‌گیری می‌شود (۲). برای دکل‌های تلفن همراه، شاخص‌هایی مانند شدت میدان (ولت بر متر) و چگالی توان (وات بر متر مربع) نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱).

اثرات تشعشعات را می‌توان به غیر حرارتی و حرارتی طبقه‌بندی کرد. اثرات حرارتی ناشی از افزایش

<sup>1</sup> Specific Absorption Rate

حالات فعال و کنترل نشان ندادند (۱۶ و ۳۴). نتایج جمع‌بندی‌شده از مطالعات تحریک کوتاه‌مدت حاکی از این است که شواهد پشتیبان اثرات فیزیولوژیک فوری و قابل تکرار در سطح‌های مواجهه معمول محیطی ضعیف یا نامشخص است (۱۶ و ۳۵). در نتیجه، شواهد مربوط به اثرات کوتاه‌مدت نشانگر وجود علائم گزارش‌شده در برخی جمعیت‌ها است، اما تفکیک نقش مواجهه واقعی از عوامل روان‌شناختی، استرس و سوگیری‌های گزارشگری نیازمند مطالعات با طراحی دقیق‌تر و کنترل‌شده‌تر است. در مجموع، شواهد تجربی درباره اثرات کوتاه‌مدت نشانگر وجود علائم گزارش‌شده در برخی جمعیت‌ها است، اما مطالعات کنترل‌شده تداوم علت معلولی را تأیید نمی‌کنند. درباره پیامدهای بلندمدت، شواهد قطعی و یکنواختی که مؤید رابطه علی بین مواجهه محیطی با ایستگاه‌های پایه و بیماری‌های مزمن (از جمله سرطان) باشد، وجود ندارد؛ ولی محدودیت‌های روش‌شناسی و کمبود مطالعات طولی و با اندازه مناسب مانع انحصار نتیجه‌گیری قطعی است. در نتیجه، اولویت‌های پژوهشی آتی باید شامل مطالعات طولی با اندازه مناسب، ارزیابی‌های دقیق مواجهه (شامل اندازه‌گیری‌های زمانی-فضایی) و تمرکز بر گروه‌های پرخطر و اثرات غیرحرارتی احتمالی باشد. همزمان، سیاست‌گذاری‌های مبتنی بر احتیاط و رویکردهای احتیاطی<sup>۳</sup> به‌خصوص در نزدیک مدارس و مراکز حساس و بهبود مکانیسم‌های اطلاع‌رسانی و پایش سلامت عمومی توصیه می‌شود (۱۶، ۳۴ و ۳۵).

دمای بافتی مشابه اثرات پخت و پز در مایکروویو است. اثرات غیر حرارتی به درستی تعریف نشده‌اند، اما مشخص شده است که این اثرات سه تا چهار برابر خطرناک‌تر از اثرات حرارتی هستند که همچنان بحث‌برانگیز است و شامل تغییرات ژنتیکی، عصبی یا سلولی که بدون افزایش محسوس دما رخ می‌دهند (۹ و ۲۹).

### اثرات بهداشتی دکل‌های تلفن همراه

#### - اثرات کوتاه‌مدت<sup>۱</sup>

مطالعات متعددی اثرات کوتاه‌مدت و غیراختصاصی را در جمعیت‌های ساکن در نزدیکی ایستگاه‌های پایه (BTS) گزارش کرده‌اند؛ شایع‌ترین شکایات شامل سردرد، اختلالات خواب، خستگی، کاهش تمرکز، سرگیجه و ناراحتی عمومی است (۸ و ۳۰-۳۲). این یافته‌ها اغلب از مطالعات مقطعی مبتنی بر پرسش‌نامه به‌دست آمده‌اند که در آن‌ها ساکنان مجاور دکل‌ها نسبت به گروه‌های دورتر، فراوانی بیش‌تری از علائم غیراختصاصی را گزارش کرده‌اند (۳۱ و ۳۲). با این حال، سمت و سوی علت و معلولی این ارتباط در بسیاری از مطالعات نامشخص است؛ زیرا نگرانی و آگاهی از وجود دکل می‌تواند خود منشأ گزارش اثر نوسیبو<sup>۲</sup> نباشد (۳۳).

در یکی از مطالعات، شرکت‌کنندگان حساس به الکترومغناطیس تحت قرارگیری کوتاه‌مدت با سیگنال‌های پایه قرار گرفتند؛ نتایج نشان داد شرکت‌کنندگان در شرایط دو گروهی قادر به تشخیص معرض یا غیرمعرض بودن بیشتر از حد تصادفی نبودند و علائم گزارش‌شده نیز تفاوت معناداری بین

<sup>3</sup> Precautionary approaches

<sup>1</sup> Short-term effects

<sup>2</sup> Nocebo effect

- اثرات بلندمدت<sup>۱</sup>

ادعای وجود پیامدهای بلندمدت، از جمله افزایش خطر تومورهای مغزی یا اختلالات نورودژنراتیو، بحث‌برانگیز و محور بسیاری از مطالعات و بازبینی‌ها بوده است. آژانس بین‌المللی پژوهش در سرطان (IARC) در سال ۲۰۱۳، RF-EMF (اشاره عمدتاً به تابش تلفن همراه و نیز منابع محیطی) را در گروه «احتمالاً سرطان‌زا برای انسان» در گروه 2B طبقه‌بندی کرد؛ این طبقه‌بندی بر پایه مدارک محدود اپیدمیولوژیک و شواهد آزمایشی بود (۲۸).

مطالعات اپیدمیولوژیک روی جمعیت‌های اطراف ایستگاه‌های پایه نسبتاً محدود و عمدتاً مقطعی یا مقایسه‌ای بوده‌اند. برخی مطالعات کوچک‌تر، افزایش نسبی در بروز علائم نورویوژرفشی یا تغییرات عملکردی را گزارش کرده‌اند (۱۳، ۲۰ و ۳۶)، در حالی که مطالعات بزرگ‌تر و با اندازه‌گیری میدانی دقیق‌تر، اغلب رابطه‌ای معنادار نیافته‌اند (۲۷). مسئله کلیدی در تفسیر این ادعاها ضعف در ارزیابی مواجهه<sup>۳</sup>، اندازه نمونه ناکافی، دوره پیگیری کوتاه، و عدم کنترل کامل عوامل مخدوش‌کننده است.

دربارۀ سرطان، بیش‌تر شواهد مرتبط با استفاده طولانی‌مدت از گوشی‌های تلفن همراه است تا تابش مستقیم از دکل‌ها. مطالعات بروز سرطانی<sup>۴</sup> نشان داده‌اند که نرخ تومورهای مغزی در جمعیت‌های با نفوذ تلفن همراه بالا، به‌طور کلی ثابت یا رو به افزایش نبوده است؛ هرچند تحلیل‌های حساس‌تر و طولانی‌مدت کماکان مورد نیاز است (۲۲ و ۳۷).

بنابراین، در سطح کنونی دانش، شواهد قطعی مبنی بر اینکه قرارگیری محیطی در نزدیکی ایستگاه‌های پایه منجر به افزایش قابل اثبات بیماری‌های مزمن یا سرطان می‌شود، ناکافی و متناقض باقی می‌ماند.

- گروه‌های آسیب‌پذیر و مستعد<sup>۵</sup>

در ادبیات موضوعی، گروه‌هایی به‌عنوان گروه‌های آسیب‌پذیرتر نسبت به مواجهه RF مطرح شده‌اند: کودکان، زنان باردار، سالمندان و افراد مبتلا به بیماری‌های مزمن یا نقایص ایمنی (۲۸ و ۳۸). استدلال‌های اصلی برای حساسیت بالاتر کودکان شامل نسبت سطح به جرم بالاتر، ساختار مغزی در حال تکامل و پتانسیل مواجهه طولانی‌تر در طول عمر است؛ به همین دلیل برخی محققان و سیاست‌گذاران توصیه به احتیاط بیش‌تری در مورد استقرار دکل‌ها نزدیک مدارس و مراکز نگهداری کودکان کرده‌اند (۳۸ و ۳۹).

کارکنان حرفه‌ای که در فاصله نزدیک یا در معرض مداوم آنتن‌ها کار می‌کنند (مثلاً تکنسین‌های مخابراتی، کارکنان پشت‌بام) نیز در معرض سطوح شغلی بالاتری قرار دارند که نیازمند استانداردها و پایش شغلی مجزا است (۲). علاوه بر این، افرادی که حساسیت خودگزارش‌شده به امواج الکترومغناطیسی (EHS<sup>۶</sup>) دارند، علی‌رغم ناتوانی مطالعه‌محور در اثبات فیزیولوژیک بودن حساسیت در اغلب آزمایش‌های دوکور، معمولاً گزارش‌دهنده علائم شدیدتری هستند. مدیریت این گروه غالباً بر مبنای رویکردهای

<sup>۵</sup> Vulnerable/Susceptible Populations<sup>۶</sup> Electromagnetic Hypersensitivity<sup>۱</sup> Long-term effects<sup>۲</sup> International Agency for Research on Cancer<sup>۳</sup> Exposure Assessment<sup>۴</sup> Incidence Trend Analyses

مهاجرت و رفتار تغذیه‌ای در برخی گونه‌های پرندگان در مجاورت ایستگاه‌های پایه مشاهده شده است (۱۸).

حشرات نیز به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرند، به‌ویژه زنبورهای عسل (*Apis mellifera*) که به میدان‌های الکترومغناطیسی حساس هستند. پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که RF می‌تواند منجر به اختلال در بازگشت زنبورها به کندو، کاهش فعالیت گرده‌افشانی و در نهایت فروپاشی کلنی شود (۱۲ و ۱۷). در یک مطالعه تجربی، شارما و کومار<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۰ مشاهده کردند که تابش RF منجر به کاهش قابل توجه سطح هموگلوبین و پروتئین در زنبورها می‌شود (۱۷). پستانداران کوچک مانند موش‌ها نیز در معرض اثرات بیولوژیک قرار گرفته‌اند؛ تغییرات در الگوی خواب، سیستم تولید مثل و استرس اکسیداتیو در مطالعات حیوانی گزارش شده است (۴۶). اگرچه این نتایج بیش‌تر در معرض‌گذاری‌های آزمایشگاهی با شدت بالاتر به دست آمده‌اند، اما نگرانی‌ها درباره اثرات تجمعی مواجهه‌های محیطی باقی است.

#### - اثرات بر تنوع زیستی و اکوسیستم

تأثیر امواج RF محدود به گونه‌های منفرد نیست و می‌تواند بر کل اکوسیستم اثرگذار باشد. از آنجا که بسیاری از گونه‌های حیوانی و گیاهی در شبکه‌های پیچیده غذایی و بوم‌شناختی در تعامل هستند، تغییر در یک گونه می‌تواند پیامدهای زنجیره‌ای ایجاد کند (۴۷). برای مثال، کاهش جمعیت زنبورهای گرده‌افشان می‌تواند مستقیماً بر باروری گیاهان و تولید محصولات کشاورزی تأثیر بگذارد (۱۲). مطالعات میدانی در اروپا

روان‌پزشکی/تسهیلی و کاهش قرارگیری خودگزارش‌شده متمرکز است (۱۶ و ۴۰).

#### اثرات زیست‌محیطی دکل‌های تلفن همراه

##### - اثرات بر گیاهان

گیاهان به‌عنوان موجودات ساکن و حساس به عوامل محیطی، می‌توانند تحت تأثیر قرارگیری مزمن در برابر پرتوهای RF قرار گیرند. مطالعات آزمایشگاهی و میدانی نشان داده‌اند که RF می‌تواند موجب تغییر در جوانه‌زنی، رشد و فرآیندهای فیزیولوژیک گیاهان شود (۴۳-۴۱). همچنین، نتایج تحقیقات نشان داده‌اند که RF می‌تواند فرآیند فتوسنتز را مختل کرده و فعالیت آنزیمی و متابولیسم ثانویه را تغییر دهد (۱۱). نتایج مطالعه بالموری<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۰ نشان داد که درختان واقع در نزدیکی ایستگاه‌های پایه تلفن همراه بیش‌تر دچار آسیب‌های غیرقابل توضیح در برگ‌ها، تغییر رنگ و خشکیدگی شاخه‌ها می‌شوند (۴۴). اگرچه مکانیزم دقیق هنوز روشن نیست، اما فرض بر این است که RF می‌تواند با ایجاد استرس اکسیداتیو و تغییر در تعادل آب و مواد معدنی گیاهان، اثرات زیستی برجای گذارد (۴۵).

##### - اثرات بر حیوانات

تأثیر پرتوهای RF بر حیوانات در مطالعات متعدد بررسی شده است. شواهد نشان می‌دهد که پرندگان به‌ویژه به دلیل وابستگی به سیگنال‌های مغناطیسی و الکتریکی برای ناوبری، در برابر RF آسیب‌پذیر هستند. بالموری و هالبرگ<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۷، کاهش تراکم پرندگان در مناطقی با تراکم بالای دکل‌های مخابراتی را گزارش کردند (۱۹). همچنین، تغییر در الگوهای

<sup>3</sup> Sharma and Kumar

<sup>1</sup> Balmori

<sup>2</sup> Balmori and Hallberg

و آسیا نشان داده‌اند که مناطقی با تراکم بالای دکل‌های تلفن همراه کاهش معنی‌داری در تراکم پرندگان، حشرات گرده‌افشان، و کیفیت سلامت درختان داشته‌اند (۱۱، ۱۹ و ۴۴). چنین تغییراتی به مرور می‌تواند منجر به کاهش تنوع زیستی، اختلال در تعادل اکولوژیک و در نهایت تهدید امنیت غذایی شوند. همچنین، برخی مروره‌های اخیر هشدار داده‌اند که RF ممکن است به‌عنوان یک آلاینده نوظهور زیست‌محیطی طبقه‌بندی شود که اثرات آن باید مشابه دیگر آلاینده‌های شیمیایی و فیزیکی مورد پایش قرار گیرد (۴۸ و ۴۹).

#### بررسی استانداردها و رهنمودهای موجود

##### - رهنمودهای WHO

WHO یکی از نهادهای مرجع در زمینه ارزیابی اثرات EMF و RF بر سلامت انسان است و هدف از تدوین دستورالعمل‌ها را کاهش پیامدهای احتمالی سلامت و فراهم کردن داده‌های علمی برای سیاست‌گذاران عنوان کرده است (۳). بر اساس رهنمودهای WHO، شواهد علمی موجود نشان می‌دهد که قرارگیری در معرض RF ایستگاه‌های پایه تلفن همراه در سطوح معمول شهری، باعث بروز اثرات بهداشتی جدی نمی‌شود. با این حال، WHO بر ضرورت پایش مداوم علمی، انجام مطالعات طولی و ارزیابی اثرات جمعیتی تأکید دارد. علاوه بر این، توصیه‌های WHO حاکی از اتخاذ رویکردهای پیشگیرانه و احتیاطی به‌ویژه در مناطق حساس مانند مدارس، بیمارستان‌ها و مناطق مسکونی متراکم است. (۳ و ۱۴).

##### - رهنمودهای ICNIRP

کمیسیون بین‌المللی حفاظت در برابر پرتوهای غیر یونیزان یک نهاد علمی مستقل است که دستورالعمل‌هایی برای محدودسازی مواجهه با RF و EMF تدوین می‌کند. در آخرین دستورالعمل منتشر شده در سال ۲۰۲۰، ICNIRP محدودیت‌های شدت میدان و چگالی توان برای طیف فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز را ارائه کرده است (۱). این دستورالعمل‌ها بر اثرات حرارتی و جلوگیری از افزایش دمای بافتی به بیش از ۱°C در سطح بدن تمرکز دارند.

##### - رهنمودهای IEEE

انجمن مهندسان برق و الکترونیک نیز رهنمودهای مشابهی برای مواجهه انسان با RF و EMF تدوین کرده است. رهنمودهای IEEE شامل توصیه‌هایی برای محدودیت‌های مواجهه عمومی و شغلی است و علاوه بر اثرات حرارتی، به برخی اثرات غیرحرارتی نیز اشاره دارد (۲). هر دو نهاد ICNIRP و IEEE، توصیه می‌کنند که فعالیت‌های عملیاتی و ساخت و سازهای زیرساخت‌های مخابراتی باید محدودیت‌های ایمنی را رعایت کنند و پایش منظم مواجهه صورت گیرد تا اثرات احتمالی بلندمدت کاهش یابد.

در سطح ملی، کشورها بر اساس دستورالعمل‌های بین‌المللی و شرایط محیطی خود، استانداردهای ویژه‌ای وضع کرده‌اند. برخی کشورها نیز، علاوه بر تعیین حد مجاز مواجهه، اقدام به اطلاع‌رسانی عمومی، برچسب‌گذاری و آموزش کارکنان کرده‌اند تا رعایت دستورالعمل‌ها و کاهش مواجهه انسانی و محیطی تضمین شود. با این وجود، تفاوت‌های کشوری در اعمال محدودیت‌ها و استانداردها، چالش‌هایی برای هماهنگی بین‌المللی ایجاد کرده است (۴۷، ۵۰ و ۵۱).

در زمینه خط‌مشی و مقررات، سازمان‌هایی مانند WHO و ICNIRP دستورالعمل‌هایی برای محدودیت مجاز تابش ارائه کرده‌اند، اما تفاوت در سیاست‌های ملی و فقدان داده‌های بلندمدت باعث شده است که تصمیم‌گیری سیاست‌گذاران همیشه مبتنی بر شواهد کامل نباشد (۱۴، ۱۵ و ۲۰).

#### - قوانین و ضوابط نصب دکل‌های تلفن همراه در جمهوری اسلامی ایران

قوانین و ضوابط نصب دکل مخابراتی شامل استانداردهایی است که باید رعایت شوند تا ایمنی افراد، تأسیسات و محیط زیست حفظ شود. از جمله این قوانین، رعایت فاصله مناسب دکل مخابراتی از مناطق مسکونی، تأسیسات حساس، حیوانات و دیگر موانع است تا از هرگونه ضرر و زیان احتمالی جلوگیری شود. علاوه بر این، دکل‌های مخابراتی باید در برابر بلایای طبیعی نظیر سیل، زلزله و طوفان مقاوم باشند. برای اطمینان از رعایت این موارد، سازمان تنظیم مقررات و ارتباطات رادیویی مجموعه‌ای از ضوابط و استانداردها را برای نصب دکل‌های مخابراتی تدوین کرده است که به تضمین ایمنی و عملکرد صحیح این سازه‌ها کمک می‌کند. این ضوابط و استانداردها به منظور تضمین ایمنی عمومی و کارایی دکل‌های مخابراتی تدوین شده‌اند و رعایت دقیق آن‌ها در هنگام نصب و بهره‌برداری از دکل‌ها ضروری است. در حال حاضر، در تهران حدود ۱۰ هزار دکل مخابراتی وجود دارد. چند سال قبل، در تهران وزش باد شدیدی باعث سقوط ۱۶۰ آنتن شد. این حادثه نشان‌دهنده اهمیت پایداری ساختار و مهار دکل‌های مخابراتی است. بنابراین، از آن زمان به بعد، تأکید

بیش‌تری بر استحکام سازه‌ها و جلوگیری از واژگونی آنتن‌ها صورت گرفته است. علاوه بر پایداری ساختار، مسائل ایمنی عمومی نیز به شدت مورد توجه قرار گرفته است. این شامل نصب صاعقه‌گیرها و علائم هشداردهنده در اطراف آنتن‌ها برای جلوگیری از حوادث احتمالی است. همچنین، باید از دسترسی افراد غیرمجاز به تجهیزات دکل‌ها جلوگیری شود، چرا که این تجهیزات برای افراد غیرمتخصص خطرناک هستند. مورد دیگر آموزش پرسنلی است که با این تجهیزات کار می‌کنند. این افراد باید به‌طور کامل آموزش دیده و از خطرات احتمالی آگاهی داشته باشند تا در شرایط اضطراری بتوانند اقدامات لازم را به‌درستی انجام دهند. تمامی این پنج پارامتر شامل پایداری سازه، ایمنی عمومی، دسترسی محدود، آموزش پرسنل، و نظارت مستمر، در قالب یک دستورالعمل توسط وزارت بهداشت و درمان به کل کشور ابلاغ شده است و نظارت‌ها براساس این دستورالعمل به‌طور دقیق اعمال می‌شود. در اجرای ماده ۳۰ قانون هوای پاک و با هدف نظارت بر نصب سایت، آنتن و دکل‌های مخابراتی در سطح کشور «ضوابط نصب سایت، آنتن و دکل‌های مخابراتی» بر اساس بندهای ۳ تا ۵ سیاست‌های ابلاغی مقام معظم رهبری در حوزه محیط زیست و به منظور حفظ محیط زیست و سلامت شهروندان، رعایت مبلمان شهری، حفظ زیبایی سیمای شهری و استفاده حداکثری از سایت شیرینگ<sup>۱</sup> در کل کشور در قالب ۲۲ ماده مشخص به اپراتورها و مسئولین مربوطه ابلاغ شده است و رعایت آن‌ها برای نصب و نگهداری دکل‌های آنتن الزامی است. این ضوابط شامل تعاریف (ماده ۱)، حوزه

<sup>1</sup> Site sharing

در جمهوری اسلامی ایران نیز استانداردهایی برای محدودسازی مواجهه با پرتوهای الکترومغناطیسی (EMF<sup>۱</sup>) و رادیوفرکانس (RF) تدوین شده است. این استانداردها به‌ویژه در زمینه ایمنی کارکنان شاغل در صنایع مخابراتی و زیرساخت‌های مخابراتی اعمال می‌شوند. سازمان ملی استاندارد ایران (ISIRI) مسئول تدوین و نظارت بر این استانداردها است. سطح مجاز چگالی توان تشعشی در استاندارد «پرتوهای غیریونساز حدود پرتوگیری» با کد ۸۵۶۷ برای موارد مردم و موارد شغلی مطابق جدول (۳) است (۵۳).

جدول (۳): سطح مجاز چگالی توان تشعشی برای مردم

f (MHz)	(mW/m <sup>2</sup> )	
	مردمی	شغلی
۴۰۰ تا ۱۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰۰
۲۰۰۰ تا ۴۰۰	f/200	f/40
۳۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰	۱۰۰۰۰	۵۰۰۰۰

بهر حال، انتقادات قابل توجهی به استانداردهای موجود از جمله تمرکز بیش از حد بر اثرات حرارتی و نادیده گرفتن اثرات غیرحرارتی و مزمن ناشی از مواجهه طولانی مدت وارد است. این اختلاف نظرها سبب شده، بحث پیرامون بازنگری در دستورالعمل‌ها همچنان ادامه داشته باشد.

### راهکارها و پیشنهادها برای کاهش اثرات دکل‌های تلفن همراه

- طراحی مهندسی و استقرار ایمن دکل‌ها  
یکی از مؤثرترین راهکارها برای کاهش مواجهه جمعیتی با پرتوهای RF، طراحی مهندسی مناسب و

شامل این ضوابط (ماده ۲)، ضوابط استفاده مشترک از دکل آنتن (ماده ۳-۴)، ضوابط ایمنی در مقابل تشعشعات (ماده ۵-۱۰)، ضوابط نصب و مجوزهای نصب دکل آنتن (ماده ۱۱-۱۵) و ضوابط ایمنی محیطی (ماده ۱۶-۲۲) می‌باشد. این قوانین نه تنها به ایمنی و سلامت افراد کمک می‌کنند؛ بلکه به محافظت از محیط زیست و ایجاد استانداردهای مناسب در صنعت نیز می‌پردازند (۵۲).

### - حدود مواجهه

تشعشعات RF بر حسب میلی وات بر متر مربع محاسبه می‌شود. طبق بررسی توصیه‌ها و سیاست‌های ایمنی تلفن همراه در سراسر جهان توسط WHO و ICNIRP انجام شده است. مناطق/حوزه‌های دارای سطوح تشعشع مختلف و محدوده‌های مجاز سطوح تابش در کشورهای مختلف به ترتیب در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است (۲۹).

جدول (۱): طبقه‌بندی سطوح تشعشع (۲۹)

نوع مناطق	محدوده‌های تشعشع (mW/m <sup>2</sup> )
منطقه امن	۰-۶۰۰
منطقه با خطر ناچیز	۶۰۰-۱۰۰۰
منطقه خطر	۱۰۰۰-۴۰۰۰
خطرناک‌ترین منطقه	بزرگ‌تر از ۴۵۰۰

جدول (۲): محدودیت‌های مجاز سطوح تابش در کشورهای

نام کشور	سطوح تابش (mW/m <sup>2</sup> )
سوئیس	۴۲
روسیه	۱۰۰
چین	۱۰۰
آمریکا	۳۰۰۰
هند	۴۵۰۰

<sup>1</sup> Electromagnetic Fields

<sup>2</sup> Institute of Standards and Industrial Research of Iran

- مدیریت شهری و اطلاع‌رسانی به شهروندان  
مدیریت شهری و سیاست‌گذاری شفاف نقش مهمی در کاهش نگرانی‌های عمومی دارد. تدوین طرح‌های فضایی و محدودیت‌های فاصله‌گذاری برای دکل‌ها، همراه با نظارت دوره‌ای بر پایبندی به استانداردها، می‌تواند مواجهه شهری را کنترل کند (۴۷). علاوه بر آن، اطلاع‌رسانی به شهروندان درباره شدت میدان واقعی، اثرات شناخته‌شده و محدودیت‌های ایمنی، به کاهش اثرات روانی کمک می‌کند و شفافیت علمی را تقویت می‌کند (۵۸). برخی مطالعات توصیه می‌کنند که برچسب‌گذاری ایستگاه‌ها، انتشار گزارش‌های دوره‌ای و ایجاد خطوط ارتباطی با شهروندان می‌تواند اعتماد عمومی را افزایش دهد و نگرانی‌های بهداشتی را کاهش دهد (۴۷ و ۵۸).

### نتیجه‌گیری

مطالعات انجام‌شده در زمینه اثرات دکل‌های تلفن همراه بر سلامت انسان و محیط زیست نتایج متناقضی ارائه کرده‌اند. از یک سو، پژوهش‌های مقطعی و برخی مطالعات میدانی گزارش‌دهنده علائم کوتاه‌مدت غیر اختصاصی مانند سردرد، اختلالات خواب و خستگی در جمعیت‌های نزدیک دکل‌ها هستند. از سوی دیگر، مطالعات تحریک کنترل‌شده و مرورهای نظام‌مند نشان داده‌اند که شواهد علمی برای تأیید وجود رابطه علیت مستقیم بین مواجهه محیطی و اثرات سلامت کوتاه‌مدت یا بلندمدت بسیار محدود و اغلب ناکافی است. مطالعات تجربی که به بررسی اثرات فرارگیری کوتاه‌مدت در معرض سیگنال‌های ایستگاه‌های پایه پرداخته‌اند، نتایج متناقضی گزارش کرده‌اند؛ با این حال، شواهد محدودی وجود دارد که نشان می‌دهد

استقرار ایمن دکل‌های تلفن همراه است. انتخاب محل استقرار دکل‌ها باید بر اساس فاصله از مناطق مسکونی، مدارس، بیمارستان‌ها و اماکن عمومی حساس انجام شود تا شدت میدان در فضاها انسانی به حداقل برسد (۵۴).

استفاده از مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی انتشار امواج در مراحل طراحی، می‌تواند به تعیین مناسب‌ترین ارتفاع آنتن، زاویه تابش و جهت‌گیری آن کمک کند تا انرژی منتشره به جمعیت محدود شود (۵۵). علاوه بر این، رعایت استانداردهای بین‌المللی و ملی (IEEE, ICNIRP, استانداردهای ایران) در طراحی و راه‌اندازی دکل‌ها الزامی است (۱ و ۲).

- فناوری‌های نوین (شبکه سلولی کوچک 5G، فیبر نوری)

ظهور فناوری‌های نوین مخابراتی، امکان کاهش مواجهه محیطی را فراهم کرده است. در شبکه‌های 5G، به دلیل توان پایین و پوشش محدود، نیاز به دکل‌های پرتوان و با تابش گسترده کاهش می‌یابد (۵۶). این تکنیک‌ها می‌توانند چگالی پرتوها را در مناطق مسکونی کاهش داده و اثرات بالقوه بر سلامت را به حداقل برسانند (۵).

علاوه بر آن، استفاده از فیبر نوری<sup>۱</sup> به جای اتصال بی‌سیم تا حد امکان، می‌تواند انتقال داده را بدون تابش RF فراهم کند و در مناطق پرجمعیت به کاهش مواجهه کمک نماید (۵۷). برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ترکیب شبکه‌های سلولی کوچک با فیبر نوری، ضمن بهبود کیفیت سرویس‌دهی، کاهش چشمگیر شدت میدان محیطی ایجاد می‌کند (۵۶ و ۵۷).

<sup>1</sup> Fiber Optics

مقایسه مستقیم دشوار شود. پژوهش‌های طولی محدود و کوتاه‌مدت بوده‌اند و اطلاعات کافی دربارهٔ اثرات تجمعی یا بلندمدت مواجهه با دکل‌ها وجود ندارد.

در حوزه زیست‌محیطی نیز، شکاف‌های پژوهشی شامل کمبود مطالعات کنترل‌شده بر گونه‌های حساس، اثرات بلندمدت بر اکوسیستم و تعامل با سایر عوامل محیطی است.

در نهایت، نیاز به مطالعات چندمرکزی، طولی با ارزیابی دقیق مواجهه و همچنین ترکیب داده‌های انسانی و زیست‌محیطی برای ارائه سیاست‌های علمی و عملیاتی مشخص، کاملاً مشهود است.

بر اساس شواهد موجود، می‌توان گفت که:

- اثرات کوتاه‌مدت انسانی ناشی از مواجهه محیطی با دکل‌های تلفن همراه ممکن است در برخی افراد گزارش شود، اما شواهد علمی برای اثبات علت مستقیم محدود و متناقض است.

- اثرات بلندمدت انسانی، از جمله خطرات سرطان یا اختلالات مزمن، تا کنون به‌طور قطعی اثبات نشده است؛ مطالعات طولی و با ارزیابی دقیق‌تر لازم است.

- اثرات زیست‌محیطی، به ویژه بر گیاهان، حیوانات و تنوع زیستی، در شرایط خاص مشاهده شده و توجه به طراحی مهندسی، فناوری‌های کم‌انرژی و مدیریت شهری برای کاهش مواجهه ضروری است.

- شکاف‌های پژوهشی و چالش‌های روش‌شناسی، نیاز به مطالعات جامع و چندبعدی را برجسته می‌کند تا سیاست‌گذاری‌های علمی و مبتنی بر احتیاط تقویت شوند.

سیگنال‌های UMTS<sup>1</sup> و تا حد کم‌تری سیگنال‌های GSM<sup>2</sup> ممکن است موجب کاهش سطح رفاه در افرادی شوند که خود را نسبت به این نوع مواجهه‌ها حساس می‌دانند. سازمان جهانی بهداشت اظهار می‌دارد که تا به امروز و پس از تحقیقات فراوان انجام شده، هیچ اثر نامطلوبی بر سلامت به‌طور علّیتی با قرار گرفتن در معرض فناوری‌های بی‌سیم مرتبط نبوده است.

در زمینهٔ اثرات زیست‌محیطی، نتایج حاکی از اختلال در رشد گیاهان، رفتار حیوانات و کاهش تنوع زیستی در مجاورت ایستگاه‌های پایه است. با این حال، شدت این اثرات به عوامل مختلفی همچون فاصله، توان آنتن، نوع گونه و شرایط محیطی بستگی دارد و نتایج کلی‌گیری دقیق در مقیاس جمعیتی دشوار است.

در مجموع، مقایسهٔ مطالعات نشان می‌دهد که اثرات کوتاه‌مدت انسان اغلب تحت تأثیر عوامل روان‌شناختی و سوگیری گزارشگری قرار دارد، اثرات بلندمدت انسانی شواهد قطعی ندارند و اثرات زیست‌محیطی در برخی شرایط ملموس است؛ ولی نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر و طولی است.

چالش اصلی پژوهش‌ها شامل محدودیت در اندازه نمونه، طراحی مطالعات، و ارزیابی دقیق مواجهه است. بسیاری از مطالعات مبتنی بر پرسش‌نامه یا مقیاس فاصله بوده‌اند و ارزیابی میدانی شدت میدان یا چگالی توان انجام نشده است، که منجر به عدم دقت در تعیین دوز واقعی مواجهه می‌شود.

همچنین، تفاوت در معیارها، سنجش علائم و جمعیت‌های هدف بین مطالعات باعث شده است که

<sup>1</sup> Universal Mobile Telecommunications System

<sup>2</sup> Global System for Mobile Communications

- [8] Abdel-Rassoul, G., Abou El-Fateh, O., Abou Salem, M., Michael, A., Farahat, F., El-Batanouny, M., Salem, E., 2007, Neurobehavioral effects among inhabitants around mobile phone base stations. *Neurotoxicology*, 28, 434.
- [9] Rössli, M., Frei, P., Mohler, E., Hug, K., 2010, Systematic review on the health effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields from mobile phone base stations. *Bulletin of the World Health Organization*, 88(12), 887.
- [10] Tkalec, M., Malarić, K., Pavlica, M., Pevalek-Kozlina, B., Vidaković-Cifrek, Ž., 2009, Effects of radiofrequency electromagnetic fields on seed germination and root meristematic cells of *Allium cepa* L.. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 672, 76.
- [11] Waldmann-Selsam, C., Balmori-de la Puente, A., Breunig, H., Balmori, A., 2016, Radiofrequency radiation injures trees around mobile phone base stations. *Science of the Total Environment*, 572, 554.
- [12] Favre, D., 2011, Mobile phone-induced honeybee worker piping. *Apidologie*, 42, 270.
- [13] Hutter, H.P., Moshammer, H., Wallner, P., Kundi, M., 2006, Subjective symptoms, sleeping problems, and cognitive performance in subjects living near mobile phone base stations. *Occupational and Environmental Medicine*, 63(5), 307.
- [14] World Health Organization (WHO), 2006, Base stations and wireless technologies. (Available online: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/non-ionizing/wireless>)
- [15] Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA), 2021, Radiofrequency fields: Environmental health criteria.
- [16] Eltiti, S., Wallace, D., Ridgewell, A., Zougkou, K., Russo, R., Sepulveda, F., Mirshekar-Syahkal, D., Rasor, P., Deeble, R., Fox, E., 2007, Does short-term exposure to mobile phone base station signals increase symptoms in individuals who report sensitivity to electromagnetic fields? A double-blind randomized provocation study. *Environmental Health Perspectives*, 115(11), 1603.
- [17] Sharma, V.P., Kumar, N.R., 2010, Changes in honeybee behaviour and biology

- در نتیجه، رویکرد ترکیبی شامل پایش علمی، استانداردسازی، طراحی ایمن و اطلاع‌رسانی عمومی، بهترین مسیر برای کاهش اثرات احتمالی و ارتقای سلامت انسانی و محیط زیست است.

### تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی برای اعلام ندارند.

### منابع

- [1] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), 2020, Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics*, 118, 483.
- [2] IEEE International Committee on Electromagnetic Safety, 2019, IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz. *IEEE Std C95.1-2019*.
- [3] World Health Organization (WHO), 2010, Electromagnetic fields and public health: Mobile phones. *Fact Sheet No. 193*.
- [4] Schüz, J., Elliott, P., Auvinen, A., Kromhout, H., Poulsen, A.H., Johansen, C., Olsen, J.H., Hillert, L., Feychting, M., Fremling, K., Toledano, M., Heinävaara, S., Slottje, P., Vermeulen, R., Ahlbom, A., 2011, An international prospective cohort study of mobile phone users and health (Cosmos): Design considerations and enrolment. *Cancer Epidemiology*, 35(1), 37.
- [5] Rappaport, T.S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., 2013, Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!. *IEEE Access*, 1, 335.
- [6] 5G Infrastructure Public Private Partnership (5G PPP), 2020, Small cell deployment for 5G networks: Opportunities and challenges.
- [7] Santini, R., Santini, P., Danze, J.M., Le Ruz, P., Seigne, M., 2002, Investigation on the health of people living near mobile telephone relay stations: I/Incidence according to distance and sex. *Pathologie Biologie (Paris)*, 50(6), 369. (in French)

- [26] Dash, M., Mehta, A., 2011, Understanding mobile phone radiation and its effects. *Economic and Political Weekly*, 46(17), 22.
- [27] Kundi, M., Hutter, H.-P., 2009, Mobile phone base stations-Effects on wellbeing and health. *Pathophysiology*, 16(2-3), 123.
- [28] International Agency for Research on Cancer (IARC), 2013, Non-ionizing radiation, Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 102. (Available online: <https://publications.iarc.who.int/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Non-ionizing-Radiation-Part-2-Radiofrequency-Electromagnetic-Fields-2013>)
- [29] Jayaraju, N., Kumar, M.P., Sreenivasulu, G., Lakshmi Prasad, T., Lakshmana, B., Nagalakshi, K., Madakka, M., 2023, Mobile phone and base stations radiation and its effects on human health and environment: A review. *Sustainable Technology and Entrepreneurship*, 2, 100031.
- [30] Amraee, A., Seif, F., Bayatiani, M.R., Shakeri, M., Zakeri, F., 2021, Correlation between base transceiver station and the quality of sleep and life of nearby residents. *Iranian Journal of Medical Physics*, 18(1), 10.
- [31] Shariful Islam, S.M., 2014, Awareness and self-reported health hazards of electromagnetic waves from mobile phone towers in Dhaka, Bangladesh: A pilot study. *Advances in Public Health*, 2014(1), 952832.
- [32] Hutter, H.-P., Moshhammer, H., Wallner, P., Kundi, M., 2006, Subjective symptoms, sleeping problems, and cognitive performance in subjects living near mobile phone base stations. *Occupational and Environmental Medicine*, 63, 307.
- [33] EU Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR), 2015, Opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF). (Available online: [https://ec.europa.eu/health/scientific\\_committees/emerging/docs/scenihr\\_o\\_041.pdf](https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_o_041.pdf))
- [34] Eltiti, S., Wallace, D., Russo, R., Fox, E., 2015, Aggregated data from two double-blind base station provocation studies comparing individuals with idiopathic environmental intolerance with attribution to electromagnetic under the influence of cellphone radiations. *Current Science*, 98(10), 1376.
- [18] Everaert, J., Bauwens, D., 2007, A possible effect of electromagnetic radiation from mobile phone base stations on the number of breeding house sparrows (*Passer domesticus*). *Electromagnetic Biology and Medicine*, 26, 63.
- [19] Balmori, A., Hallberg, Ö., 2007, The urban decline of the house sparrow (*Passer domesticus*): A possible link with electromagnetic radiation. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 26, 141.
- [20] Berg-Beckhoff, G., Blettner, M., Kowall, B., Breckenkamp, J., Schlehofer, B., Schmiedel, S., Bornkessel, C., Reis, U., Potthoff, P., Schüz, J., 2009, Mobile phone base stations and adverse health effects: Phase 2 of a cross-sectional study with measured radio frequency electromagnetic fields. *Occupational and Environmental Medicine*, 66(2), 124.
- [21] Hardell, L., Carlberg, M., Hansson Mild, K., 2009, Epidemiological evidence for an association between use of wireless phones and tumor diseases. *Pathophysiology*, 16(2-3), 113.
- [22] Han, H., Guo, W., Lu, Y., Wang, M., 2020, Effect of mobile applications on blood pressure control and their development in China: A systematic review and meta-analysis. *Public Health*, 185, 356.
- [23] Khurana, V.G., Hardell, L., Everaert, J., Bortkiewicz, A., Carlberg, M., Ahonen, M., 2010, Epidemiological evidence for a health risk from mobile phone base stations. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 16(3), 263.
- [24] Chiaraviglio, L., Elzanaty, A., Alouini, M.-S., 2021, Health risks associated with 5G exposure: A view from the communications engineering perspective. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2, 2131.
- [25] International Telecommunications Union (ITU), 2022, Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunications-2020 (IMT-2020), M Series - Mobile, radiodetermination, amateur and related satellite services. Recommendation ITU-R M.2150-1. (Available online: <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2150-1-202202-S/en>)

- electromagnetic fields on *Lemna minor* growth and peroxidase activity. *Bioelectromagnetics*, 26, 185.
- [44] Balmori, A., 2010, Mobile phone mast effects on common frog (*Rana temporaria*) tadpoles: The city turned into a laboratory. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 29(1-12), 31.
- [45] Roux, D., Vian, A., Girard, S., Bonnet, P., Paladian, F., Davies, E., Ledoigt, G., 2008, High frequency (900 MHz) low amplitude ( $5 \text{ V m}^{-1}$ ) electromagnetic field: A genuine environmental stimulus that affects transcription, translation, calcium and energy charge in tomato. *Planta*, 227, 883.
- [46] Aburawi, S., Abusaida, H., El Jaafari, H., Alkayed, F., Shibani, N., Dali, A., Shalabi, S., Ayad, M., Altaboni, O., 2021, Effect of mobile phone radiation on reproductive system and behavior using female albino mice. *Alqalam Journal of Medical and Applied Science*, 4(1), 31.
- [47] Balmori, A., 2009, Electromagnetic pollution from phone masts. *Effects on wildlife. Pathophysiology*, 16(2-3), 191.
- [48] Cucurachi, S., Tamis, W.L.M., Vijver, M.G., Peijnenburg, W.J.G.M., Bolte, J.F.B., de Snoo, G.R., 2013, A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF). *Environment International*, 51, 116.
- [49] Lai, H., 2008, Biological effects of radiofrequency electromagnetic field. In: *Encyclopedia of biomaterials and biomedical engineering*. Bowlin, G.L., Wnek, G.E. (Editors), 2<sup>nd</sup> Edition, CRC Press.
- [50] Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA), 2021, Mobile phone base stations and health. (Available online: <https://www.arpansa.gov.au/understanding-radiation/radiation-sources/more-radiation-sources/mobile-phone-base-stations>)
- [51] Federal Communications Commission (FCC), 2020, Human exposure to radiofrequency electromagnetic fields. *Federal Register*, 85(66).
- [52] Department of Environment IR Iran, 2025, Telecommunication tower installation rules and regulations, Urmia University of Medical Sciences. (Available online: <https://phc.umsu.ac.ir/>)
- fields and controls. *Bioelectromagnetics*, 36, 96.
- [35] Balmori, A., 2022, Evidence for a health risk by RF on humans living around mobile phone base stations: From radiofrequency sickness to cancer. *Environmental Research*, 214(Part 2), 113851.
- [36] Meo, S.A., Almahmoud, M., Alsultan, Q., Alotaibi, N., Alnajashi, I., Hajjar, W.M., 2019, Mobile phone base station tower settings adjacent to school buildings: Impact on students' cognitive health. *American Journal of Men's Health*, 13(1).
- [37] Repacholi, M.H., Lerchl, A., Röösl, M., Sienkiewicz, Z., Auvinen, A., Breckenkamp, J., d'Inzeo, G., Elliott, P., Frei, P., Heinrich, S., Lagroye, I., Lahkola, A., McCormick, D.L., Thomas, S., Vecchia, P., 2012, Systematic review of wireless phone use and brain cancer and other head tumors. *Bioelectromagnetics*, 33, 187.
- [38] Wiedemann, P., Schütz, H., 2011, Children's health and RF EMF exposure. Views from a risk assessment and risk communication perspective. *Wiener Medizinische Wochenschrift*, 161, 226.
- [39] Redmayne, M., 2016, International policy and advisory response regarding children's exposure to radio frequency electromagnetic fields (RF-EMF). *Electromagnetic Biology and Medicine*, 35, 176.
- [40] van Moorselaar, I., Slotje, P., Heller, P., van Strien, R., Kromhout, H., Murbach, M., Kuster, N., Vermeulen, R., Huss, A., 2017, Effects of personalised exposure on self-rated electromagnetic hypersensitivity and sensibility—a double-blind randomised controlled trial. *Environment International*, 99, 255.
- [41] Kumar, A., Singh, H.P., Batish, D.R., Kaur, S., Kohli, R.K., 2016, EMF radiations (1800 MHz)-inhibited early seedling growth of maize (*Zea mays*) involves alterations in starch and sucrose metabolism. *Protoplasma*, 253, 1043.
- [42] Levitt, B.B., Lai, H.C., Manville, A.M., 2022, Low-level EMF effects on wildlife and plants: What research tells us about an ecosystem approach. *Frontiers in Public Health*, 10, 1000840.
- [43] Tkalec, M., Malarić, K., Pevalek-Kozlina, B., 2005, Influence of 400, 900, and 1900 MHz

- [53] Iranian National Standardization Organization, 2016, Non-ionizing radiation exposure limits. INSO 8567, 2<sup>nd</sup> Revision.
- [54] Dhungel, A., Zmirou-Navier, D., van Deventer, E., 2015, Risk management policies and practices regarding radio frequency electromagnetic fields: Results from a WHO survey. *Radiation Protection Dosimetry*, 164(1-2), 22.
- [55] Medbo, J., Kyosti, P., Kusume, K., Raschkowski, L., Haneda, K., Jamsa, T., Nurmela, V., Roivainen, A., Meinila, J., 2016, Radio propagation modeling for 5G mobile and wireless communications. *IEEE Communications Magazine*, 54(6), 144.
- [56] Prados-Garzon, J., Ameigeiras, P., Ordonez-Lucena, J., Muñoz, P., Adamuz-Hinojosa, O., Camps-Mur, D., 2021, 5G non-public networks: Standardization, architectures and challenges. *IEEE Access*, 9, 153893.
- [57] Winzer, P.J., Neilson, D.T., Chraplyvy, A.R., 2018, Fiber-optic transmission and networking: The previous 20 and the next 20 years. *Optics Express*, 26(18), 24190.
- [58] Ismail, A., Din, N.M., Jamaludin, M.Z., Balasubramaniam, N., 2010, Mobile phone base station radiation study for addressing public concern. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(1), 117.

**“Review article”**

**Key applications of artificial intelligence in the Iran’s health system: A comprehensive review of benefits, challenges, and sustainable development strategies**

**Amir Fataei<sup>1,\*</sup>, Babak Nouri Moghadam<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Faculty of Medicine, Ardabil University of Medical Sciences, Ardabil, Iran

<sup>2</sup>Department of Computer Engineering, Ard.C., Islamic Azad University, Ardabil, Iran

\*Corresponding author: a.fataei@arums.ac.ir

(Received: 3 December 2025, Accepted: 1 January 2026)

**Abstract**

Artificial intelligence (AI), recognized as one of the most transformative technologies of the current century, has rapidly permeated medical sciences and public health, giving rise to new paradigms in diagnosis, treatment, prevention, and health system management. This analytical review aims to comprehensively examine key AI applications in healthcare, evaluate clinical and operational benefits, analyze major challenges – particularly within the Iranian context – and propose practical strategies for the sustainable deployment of this technology. The methodology is based on a systematic review and critical analysis of authoritative international and domestic literature published between 2018 and 2025. The findings indicate that AI, particularly through deep learning (DL) and natural language processing (NLP), has improved diagnostic accuracy for conditions such as cancer and diabetic retinopathy to above 94%. In addition, AI has enabled high-precision epidemic prediction, supported personalized medicine and robotic surgery, and enhanced health system efficiency by optimizing resource allocation and reducing waiting times. Despite these advances, substantial barriers remain, including the lack of standardized indigenous multicenter data, algorithmic bias, privacy risks, the absence of transparent regulatory frameworks, insufficient computational infrastructure, and shortages of specialized interdisciplinary workforce, especially in Iran. These challenges have limited the full realization of AI’s potential. Achieving a sustainable AI transformation in Iran’s health system requires coordinated national action in three areas: (1) establishing a secure, standardized National Health Data Bank; (2) developing comprehensive legal, regulatory, and ethical frameworks; and (3) investing in digital infrastructure and interdisciplinary education. Implementing these strategies can help move Iran beyond pilot projects toward the scalable, equitable adoption of AI in healthcare.

**Conflict of interest:** None declared.

**Keywords:** Artificial intelligence, Medical sciences, Deep learning, Data privacy, Algorithmic bias, Sustainable development



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

دوره ۲، شماره ۳، پیاپی ۷  
پاییز ۱۴۰۴، صفحات ۳۲-۱۹

## «مقاله مروری»

# کاربردهای کلیدی هوش مصنوعی در نظام سلامت ایران: بررسی جامع مزایا، چالش‌ها و راهبردهای توسعه پایدار

امیر فتائی<sup>۱\*</sup>، بابک نوری مقدم<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی رشته پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل، اردبیل، ایران  
<sup>۲</sup>استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران  
\*نویسنده مسئول مکاتبات: a.fataei@arums.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱)

## چکیده

هوش مصنوعی (AI) به‌عنوان یکی از تحول‌آفرین‌ترین فناوری‌های قرن حاضر شناخته می‌شود. این فناوری به‌سرعت در حوزه‌های علوم پزشکی و بهداشت نفوذ کرده و الگوهای نوینی در تشخیص، درمان، پیشگیری، مدیریت سلامت و توسعه پایدار ایجاد کرده است. هدف این مقاله مروری تحلیلی، بررسی جامع کاربردهای کلیدی AI در نظام سلامت است. در این راستا، مزایای بالینی و عملیاتی ارزیابی و چالش‌های اصلی، به‌ویژه در بستر ایران، تحلیل شده‌اند. در نهایت، راهبردهای عملی برای توسعه پایدار این فناوری ارائه می‌گردد. روش پژوهش بر پایه مرور نظام‌مند و تحلیل انتقادی منابع معتبر بین‌المللی و بومی منتشر شده در بازه ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۵ استوار است. یافته‌ها نشان می‌دهد که AI، به‌ویژه از طریق یادگیری عمیق و پردازش زبان طبیعی، دقت تشخیص بیماری‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده است. در برخی بیماری‌ها از جمله سرطان و رتینوپاتی دیابتی، این دقت به بیش از ۹۴ درصد رسیده است. همچنین، پیش‌بینی اپیدمی‌ها با دقت بالا امکان‌پذیر شده و درمان‌های شخصی‌سازی شده و جراحی‌های رباتیک بهبود یافته‌اند. کارایی نظام سلامت نیز از طریق بهینه‌سازی منابع و کاهش زمان انتظار بیماران به‌طور معناداری افزایش یافته است. با وجود این دستاوردها، چالش‌هایی همچون کمبود داده‌های بومی استاندارد، سوگیری الگوریتمی، تهدیدهای حریم خصوصی، نبود چارچوب‌های حقوقی شفاف، ضعف زیرساخت‌های محاسباتی و کمبود نیروی انسانی متخصص همچنان وجود دارند که به‌ویژه در ایران برجسته‌تر هستند. دستیابی به تحول پایدار، نیازمند اقدامات هماهنگ ملی در سه حوزه کلیدی است: (۱) ایجاد بانک داده ملی سلامت استاندارد و امن، (۲) تدوین چارچوب‌های حقوقی، نظارتی و اخلاقی جامع و (۳) سرمایه‌گذاری هدفمند در زیرساخت‌های دیجیتال و تربیت نیروی انسانی میان‌رشته‌ای. اجرای این راهبردها می‌تواند ایران را از مرحله پژوهش‌های پایلوت به سمت پیاده‌سازی گسترده، اثربخش و عدالت‌محور AI در مراقبت‌های سلامت هدایت کند.

**کلمات کلیدی:** هوش مصنوعی، نظام سلامت ایران، یادگیری عمیق، حریم خصوصی، سوگیری الگوریتمی، توسعه پایدار

## مقدمه

پیشرفت‌های فناوریانه در دهه‌های اخیر، تحولات بنیادی را در حوزه پزشکی رقم زده است. ظهور هوش مصنوعی (AI) در کانون این دگرگونی‌ها قرار دارد و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین موتورهای نوآوری در مراقبت‌های سلامت شناخته می‌شود (۱). این فناوری توانایی تحلیل حجم انبوهی از داده‌های عظیم<sup>۲</sup> و کشف الگوهای پنهان در میان آن‌ها را دارد. بدین ترتیب، فرصت‌های بی‌سابقه‌ای برای ارتقای کیفیت خدمات درمانی و تصمیم‌گیری‌های بالینی فراهم شده و اکنون AI به یکی از ارکان اصلی تحول سلامت تبدیل شده است (۲).

رشد پرشتاب داده‌های سلامت زمینه‌ساز شکل‌گیری رویکردهای نوین شده است. این داده‌ها شامل پرونده‌های الکترونیک سلامت (EHR<sup>۳</sup>)، داده‌های ژنومیک، تصاویر پزشکی و داده‌های دستگاه‌های پوشیدنی است (۳). تنوع داده‌ها به ظهور روش‌های تحلیلی جدید منجر شده است. همگرایی فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا پزشکی (IoMT<sup>۴</sup>) نیز امکان نظارت مستمر بر وضعیت بیماران را فراهم کرده است (۳). به‌طور کلی، افزایش داده‌های سلامت منجر به شکل‌گیری «مراقبت‌های داده‌محور» شده است؛ رویکردی که تصمیم‌گیری‌های پزشکی را مبتنی بر شواهد و داده‌های واقعی می‌کند (۴). در چنین سیستمی، AI نقش محوری در پردازش، تحلیل و تفسیر داده‌های پیچیده ایفا می‌کند و به استخراج دانش قابل‌اعتماد برای بهبود تشخیص، پیش‌بینی و درمان

کمک می‌نماید (۵). بنابراین، AI نه‌تنها ابزار تحلیل داده است، بلکه بستری برای تحول در مدل‌های آینده-مراقبت محسوب می‌شود.

هسته اصلی بسیاری از سیستم‌های AI در پزشکی، یادگیری ماشین (ML<sup>۵</sup>) است (۴ و ۶). یادگیری ماشین به رایانه‌ها اجازه می‌دهد بدون برنامه‌ریزی صریح و از پیش تعیین‌شده، از داده‌ها بیاموزند و عملکرد خود را بر اساس تجربیات گذشته بهبود بخشند (۷). این فرآیند شامل شناسایی الگوها، ایجاد مدل‌های پیش‌بینی‌کننده و اتخاذ تصمیمات هوشمندانه است (۸). یادگیری عمیق (DL<sup>۱</sup>) نیز با معماری شبکه‌های عصبی مصنوعی چند لایه<sup>۷</sup>، داده‌های پیچیده و غیرساختاریافته مانند تصاویر پزشکی (رادیوگرافی، سی‌تی‌اسکن، ام‌آر‌آی) و متون پزشکی (گزارشات پاتولوژی، مقالات علمی) را با دقت بالا تحلیل می‌کند (۷). الگوریتم‌هایی مانند شبکه‌های عصبی کانولوشنال (CNN<sup>۸</sup>) به‌طور خاص در تحلیل تصاویر پزشکی قدرت خارق‌العاده‌ای نشان داده‌اند. این شبکه‌ها می‌توانند ویژگی‌های کلیدی را از تصاویر استخراج کنند و در تشخیص بیماری‌ها یا ناهنجاری‌ها به کار گیرند. برای مثال، مطالعات نشان داده‌اند که CNN در تشخیص سرطان‌هایی مانند ریه و پستان عملکردی در حد یا بهتر از رادیولوژیست‌های باتجربه دارد (۹). علاوه بر تصویربرداری، پردازش زبان طبیعی (NLP<sup>۹</sup>) نیز در استخراج اطلاعات از پرونده‌های الکترونیک سلامت و متون پزشکی به‌طور گسترده کاربرد یافته است (۱۰ و ۱۱). این فناوری امکان تحلیل خودکار

<sup>6</sup> Deep Learning

<sup>7</sup> Multi-layered artificial neural networks

<sup>8</sup> Convolutional Neural Network

<sup>9</sup> Natural Language Processing

<sup>1</sup> Artificial Intelligence

<sup>2</sup> Big data

<sup>3</sup> Electronic Health Record

<sup>4</sup> Internet of Medical Things

<sup>5</sup> Machine Learning

فرآیند جستجو به صورت نظام‌مند و با استفاده از کلمات کلیدی مرتبط با AI، یادگیری ماشین، علوم پزشکی، بهداشت، تشخیص بیماری، درمان، و مدیریت سلامت به زبان‌های فارسی و انگلیسی انجام شد. برای این منظور از پایگاه‌های داده معتبر بین‌المللی شامل Web of Science, PubMed, Scopus, IEEE Xplore و Google Scholar برای بازیابی مقالات علمی استفاده شد. همچنین، برای بررسی تحقیقات بومی، مجلات تخصصی فارسی زبان مرتبط با علوم پزشکی و فناوری اطلاعات سلامت مورد جستجو قرار گرفتند. بازه زمانی جستجو از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۵ (معادل ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۴ شمسی) انتخاب گردید تا جدیدترین دستاوردها و روندها در این حوزه پوشش داده شود. انتخاب این بازه زمانی به دلیل ماهیت پویا و سریع فناوری AI صورت گرفته است.

اطلاعات مورد استفاده دارای شرایط زیر بودند:

مقالات و پژوهش‌هایی که به طور مستقیم کاربرد AI (شامل یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، پردازش زبان طبیعی، و رباتیک هوشمند) را در حوزه‌های تشخیص بیماری، پیش‌بینی، درمان، توان‌بخشی، مدیریت و بهینه‌سازی نظام سلامت مورد بررسی قرار داده‌اند.

مطالعاتی که به بررسی مزایا، چالش‌ها، ملاحظات اخلاقی و آینده کاربردهای AI در پزشکی و بهداشت پرداخته‌اند.

مقالات منتشر شده در مجلات علمی داوری‌شده، مقالات کنفرانس‌های معتبر و گزارش‌های پژوهشی به زبان‌های فارسی یا انگلیسی

اطلاعات حذف شده نیز دارای شرایط زیر بودند:

گزارشات، خلاصه‌سازی مقالات و شناسایی روابط میان علائم و بیماری‌ها را فراهم می‌کند و به افزایش سرعت و دقت تصمیم‌گیری بالینی کمک می‌کند.

با وجود پتانسیل جهانی، چالش‌های جدی در بهره‌برداری از این فناوری وجود دارد. در ایران، کمبود داده‌های بومی و چندمرکزی که قادر به بازنمایی تنوع جمعیتی و بالینی کشور باشد، یکی از این چالش‌هاست. آموزش الگوریتم‌ها بر داده‌های محدود می‌تواند منجر به سوگیری الگوریتمی و کاهش قابلیت تعمیم شود. همچنین، فقدان قوانین جامع حریم خصوصی، کمبود زیرساخت‌های محاسباتی پیشرفته و نیروی انسانی متخصص از موانع توسعه AI در ایران به شمار می‌روند (۱۲). این مقاله می‌کوشد با مروری تحلیلی و توجه به شرایط بومی، مسیر توسعه پایدار AI در نظام سلامت ایران را هموار سازد.

### روش تحقیق

این پژوهش از نوع مروری - تحلیلی است که با هدف گردآوری، ارزیابی انتقادی و یکپارچه‌سازی شواهد علمی در زمینه کاربرد AI در حوزه سلامت انجام شده است. روش مروری - تحلیلی به ما امکان می‌دهد تا نه تنها یافته‌های مطالعات مختلف را دسته‌بندی و خلاصه کنیم، بلکه با نگاهی نقادانه به کیفیت متدولوژی‌ها، محدودیت‌ها و پتانسیل‌های آینده هر حوزه نیز بپردازیم. این رویکرد همچنین امکان مقایسه دستاوردها و چالش‌های موجود در سطح بین‌المللی با وضعیت موجود در ایران را فراهم می‌آورد. فرآیند انجام این تحقیق شامل مراحل ذیل بوده است:

- شناسایی و جمع‌آوری منابع علمی

مقالات غیرعلمی، مقالات مروری قدیمی (که در بازه زمانی مورد نظر مجدداً منتشر شده‌اند)، نامه‌های سردبیری<sup>۱</sup>، نظرات و سرمقاله‌ها مطالعاتی که صرفاً بر جنبه‌های تئوریک محض AI متمرکز بوده و کاربرد عملی مشخصی در حوزه سلامت نداشته‌اند. مطالعاتی که صرفاً به رباتیک صنعتی یا کاربردهای غیرپزشکی AI پرداخته‌اند. مقالات تکراری یا مطالعاتی که نتایج آن‌ها به طور کامل در سایر مقالات موجود پوشش داده شده بود.

#### - استخراج و تحلیل داده‌ها

به منظور استخراج اطلاعات، پس از غربالگری اولیه عناوین و چکیده‌ها، مقالات کاملاً مرتبط انتخاب شده و اطلاعات کلیدی از آن‌ها استخراج گردید. این اطلاعات شامل:

نوع کاربرد AI (تشخیص، پیش‌بینی، درمان، مدیریت و غیره).

حوزه پزشکی یا بالینی هدف، مانند انکولوژی، بیماری‌های عفونی، رادیولوژی، قلب و عروق.

الگوریتم‌های AI به کاررفته مانند CNN, RNN, SVM, XGBoost, NLP.

نتایج کمی مانند دقت و حساسیت و نتایج کیفی گزارش شده.

مزایای مشاهده شده، مانند بهبود دقت، سرعت، کاهش هزینه.

چالش‌ها و موانع شناسایی شده، مانند حریم خصوصی، سوگیری، زیرساخت، هزینه‌ها.

ملاحظات اخلاقی و قانونی مطرح شده.

ارائه راهکارها و پیشنهادهای مطالعاتی.

تحلیل داده‌های استخراج شده به صورت کیفی و بر اساس روش تحلیل محتوای مقایسه‌ای<sup>۲</sup> انجام شد. این روش امکان شناسایی الگوهای مشترک، تفاوت‌ها، همگرایی‌ها و واگرایی‌ها در نتایج مطالعات را فراهم آورد. در این تحلیل، به دنبال شناسایی روندهای غالب، چالش‌های فراگیر و شکاف‌های دانشی بودیم. همچنین، برای ارزیابی کیفیت مطالعات، به روش‌شناسی ارائه شده در هر پژوهش توجه ویژه شد.

#### - ارزیابی کیفیت مطالعات

به منظور ارتقای سطح علمی مرور و انجام تحلیل نقادانه شواهد، کیفیت متدولوژی مطالعات منتخب به صورت نظام‌مند ارزیابی شد. در این راستا، برای مطالعات تجربی، بالینی و مشاهده‌ای از چک‌لیست‌های استاندارد CASP<sup>۳</sup> استفاده گردید که معیارهایی نظیر وضوح سؤال پژوهش، تناسب طراحی مطالعه و اعتبار نتایج را مورد بررسی قرار می‌دهد. همچنین، برای مطالعات مروری نظام‌مند و متآنالیزها، ابزار AMSTAR-2 به کار گرفته شد که کیفیت طراحی مرور، جامعیت راهبرد جستجو و اعتبار استنتاج‌ها را می‌سنجد. تحلیل داده‌های استخراج شده به صورت کیفی و بر اساس روش تحلیل محتوای مقایسه‌ای انجام شد تا الگوهای مشترک و شکاف‌های دانشی در مطالعات بین‌المللی و داخلی شناسایی شود.

#### نتایج

پس از اجرای فرآیند جستجو و غربالگری طبق معیارهای مشخص شده، مطالعه انجام شده (شامل مقالات بین‌المللی و داخلی) واجد شرایط برای بررسی

<sup>3</sup> Critical Appraisal Skills Programme

<sup>1</sup> Letters to the editor

<sup>2</sup> Comparative content analysis

عمیق‌تر در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۵ شناسایی شدند. یافته‌های این مطالعات در چهار حوزه اصلی کاربرد AI در بهداشت و علوم پزشکی دسته‌بندی و تحلیل گردید:

#### - تشخیص بیماری‌ها

یکی از پرکاربردترین حوزه‌های AI در پزشکی، تشخیص بیماری‌ها، به خصوص از طریق تحلیل داده‌های تصویربرداری است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که الگوریتم‌های یادگیری عمیق، به ویژه شبکه‌های عصبی کانولوشنال (CNN)، در تصویربرداری پزشکی عملکردی هم‌سطح یا حتی بالاتر از متخصصان انسانی ارائه داده‌اند. به عنوان مثال، در حوزه رادیولوژی، CNNها در شناسایی تومورها، ضایعات غیرطبیعی و نشانه‌های اولیه بیماری در تصاویری مانند رادیوگرافی قفسه سینه، سی‌تی‌اسکن، ام‌آرآی و ماموگرافی، دقت قابل توجهی از خود نشان داده‌اند. در برخی مطالعات، دقت تشخیص سرطان سینه با استفاده از AI در تحلیل تصاویر ماموگرافی تا ۹۴ درصد گزارش شده است، که نسبت به روش‌های سنتی حدود ۷ تا ۱۰ درصد بهبود داشته است (۱۳).

مشابه این نتایج در تشخیص رتینوپاتی دیابتی، بیماری‌های چشمی، و تومورهای مغزی نیز مشاهده شده است. در حوزه پاتولوژی نیز، AI در تحلیل اسلایدهای بافتی برای شناسایی سلول‌های سرطانی و طبقه‌بندی تومورها به کار رفته و نتایج امیدوارکننده‌ای به همراه داشته است.

#### - پیش‌بینی و پیشگیری

توانایی مدل‌های AI در شناسایی الگوهای پیچیده در داده‌های کلان، آن‌ها را به ابزاری قدرتمند برای

پیش‌بینی و پیشگیری از وقوع بیماری‌ها تبدیل کرده است. مدل‌های یادگیری ماشین با استفاده از داده‌های اپیدمیولوژیک، اطلاعات آب و هوایی، سوابق الکترونیک سلامت (EHR) و حتی داده‌های جستجو شده در اینترنت، در پیش‌بینی شیوع بیماری‌های واگیردار مانند آنفلوانزا، کووید-۱۹ و مالاریا کارآمد بوده‌اند. برای مثال، الگوریتم‌هایی مانند 'XGBoost' توانسته‌اند وقوع اپیدمی آنفلوانزای فصلی را با دقت ۸۸ درصد و حتی پیش از ثبت رسمی موارد در مراکز بهداشتی، پیش‌بینی کنند (۱۴). این قابلیت پیش‌بینی به سیستم‌های بهداشت عمومی امکان می‌دهد تا اقدامات پیشگیرانه مؤثرتری را قبل از اوج‌گیری بیماری اجرا کنند. علاوه بر این، AI در شناسایی افراد در معرض خطر ابتلا به بیماری‌های مزمن مانند دیابت، بیماری‌های قلبی و انواع سرطان نیز کاربرد دارد. با تحلیل عوامل خطر موجود در سوابق بیماران (مانند سابقه خانوادگی، سبک زندگی، و نتایج آزمایشات)، می‌توان افراد پرخطر را شناسایی کرده و مداخلات پیشگیرانه مناسب را برای آن‌ها آغاز نمود.

#### - درمان و توان‌بخشی شخصی‌سازی شده

یکی از هیجان‌انگیزترین کاربردهای AI، امکان ارائه درمان‌های شخصی‌سازی شده و بهینه‌سازی فرآیندهای درمانی است. سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری بالینی (CDSS<sup>۲</sup>) که مبتنی بر AI هستند، با تحلیل پروفایل ژنتیکی بیمار، تاریخچه پزشکی، پاسخ به درمان‌های قبلی و داده‌های مشابه بیماران، به پزشکان در انتخاب بهترین رویکرد درمانی، دوز داروی مناسب و پیش‌بینی احتمال موفقیت درمان کمک می‌کنند. این رویکرد به ویژه در انکولوژی

<sup>۲</sup> Clinical Decision Support Systems

<sup>۱</sup> Extreme Gradient Boosting

(انکولوژی دقیق)<sup>۱</sup> بسیار حائز اهمیت است، جایی که درمان‌ها باید بر اساس ویژگی‌های مولکولی تومور بیمار تنظیم شوند. همچنین، AI در حوزه جراحی نیز نقش پررنگی ایفا می‌کند. ربات‌های جراحی هوشمند (مانند سیستم داونچی) با بهره‌گیری از الگوریتم‌های AI، قادر به افزایش دقت برش، کاهش لرزش دست جراح و انجام جراحی‌های کم‌تهاجمی با ظرافت بیشتر هستند (۱۵). در حوزه توان‌بخشی، ربات‌های هوشمند و سیستم‌های مبتنی بر واقعیت مجازی (VR) با کمک AI، قادر به ارائه برنامه‌های توان‌بخشی سفارشی برای بیماران سکتۀ مغزی، آسیب‌های نخاعی و سایر اختلالات حرکتی هستند و روند بهبودی را تسریع می‌بخشند.

#### - مدیریت و بهینه‌سازی نظام سلامت

AI می‌تواند نقش قابل توجهی در بهبود کارایی و اثربخشی سیستم‌های سلامت ایفا کند. در حوزه

جدول (۱): حوزه‌های اصلی کاربرد AI در بهداشت و پزشکی (نمونه‌های اصلی)

منبع	شاخص کمی/دقت (عملکرد مدل)	فناوری غالب	نمونه کاربرد	حوزه
(۱)	کاهش ۱۵ درصد زمان انتظار	Predictive ML	پیش‌بینی بار اورژانس	مدیریت سلامت
(۴)	کاهش ۳۰ درصد زمان انتظار بیماران	Optimization Algorithms	بهینه‌سازی نوبت‌دهی کلینیک‌ها	مدیریت سلامت
(۱۳)	دقت ۹۴ درصد	CNN (شبکه عصبی کانولوشنال)	تشخیص سرطان سینه از تصاویر ماموگرافی	تشخیص
(۱۵)	افزایش دقت برش	ML + Robotics	جراحی رباتیک دقیق و کنترل ربات	درمان
(۱۶)	کاهش ۲۰ درصد عوارض خونریزی	ML (Reinforcement Learning)	انتخاب دوز بهینه داروی ضد انعقاد	درمان
(۱۷)	$AUC > 0.85$	ML (Logistic Regression, SVM)	شناسایی بیماران پرخطر سکتۀ قلبی	پیش‌بینی
(۱۸)	دقت $< 90$ درصد	CNN	تشخیص رتینوپاتی دیابتی از تصاویر شبکیه	تشخیص
(۱۹)	دقت ۸۸ درصد (پیش از ثبت رسمی)	XGBoost	پیش‌بینی اپیدمی آنفلوانزا	پیش‌بینی

<sup>2</sup> Area Under the Curve  
۲۵

<sup>1</sup> Precision oncology

## بحث

نتایج این مرور نشان می‌دهد که جهت‌گیری توسعه AI در ایران از نظر فنی، به ویژه در حوزه پژوهش‌های دانشگاهی و پایلوت، تا حد زیادی با روندهای جهانی هم‌تراز است. به عنوان مثال، مطالعات داخلی (۲۰ و ۲۱) توان فنی لازم برای تحلیل تصاویر پزشکی (نظیر CT اسکن بیماران کووید-۱۹) با دقت بالایی را که قابل مقایسه با استانداردهای بین‌المللی است، نشان می‌دهند. در این مطالعات، از معماری‌های پیشرفته شبکه‌های عصبی کانولوشنال برای تشخیص علائم بیماری در تصاویر رادیولوژیک استفاده شده و نتایج دلگرم‌کننده‌ای در زمینه دقت و حساسیت حاصل شده است. همچنین، پژوهش‌هایی در زمینه پردازش زبان طبیعی برای تحلیل متون پزشکی و استخراج اطلاعات بالینی در ایران نیز در حال انجام است.

با این حال، فاصله اصلی بین ایران و کشورهای پیشرو در زمینه AI پزشکی، در مقیاس‌گذاری پروژه‌ها، عملیاتی‌سازی و ادغام با سیستم‌های موجود، و زیرساخت‌های مدیریتی و قانونی نهفته است. در سطح جهانی، پروژه‌های بزرگ AI در حوزه سلامت بر داده‌های چند مرکزی<sup>۱</sup> و پایگاه‌های داده عظیم ملی (مانند داده‌های ژنومی بریتانیا، پروژه All of Us در آمریکا) متکی هستند. این پایگاه‌های داده، که از همکاری چندین بیمارستان و مرکز تحقیقاتی حاصل شده‌اند، با پوشش جمعیتی گسترده و تنوع بالینی بالا، امکان آموزش مدل‌های قوی‌تر، قابل تعمیم‌تر و کم‌سوگیری‌تری را فراهم می‌کنند. در مقابل، مطالعات

داخلی ما اغلب بر داده‌های محدود، تک‌مرکزی و یا با دسترسی دشوار استوارند. این محدودیت داده، قابلیت تعمیم‌پذیری<sup>۲</sup> و اطمینان‌پذیری<sup>۳</sup> الگوریتم‌های توسعه‌یافته در ایران را به شدت کاهش می‌دهد و پیاده‌سازی آن‌ها را در مقیاس ملی با چالش مواجه می‌سازد.

## - چالش‌های اخلاقی و حریم خصوصی

یکی از حیاتی‌ترین و بحث‌برانگیزترین چالش‌های مطرح در کاربرد AI در پزشکی، هم در سطح جهانی و هم در ایران، مسئله حریم خصوصی داده‌ها و سوگیری الگوریتمی است. این دو چالش به طور تنگاتنگی با یکدیگر مرتبط هستند و نیازمند توجه ویژه به موارد زیر می‌باشند:

حریم خصوصی داده‌ها: داده‌های سلامت، ماهیتی بسیار حساس و شخصی دارند. جمع‌آوری، ذخیره‌سازی، پردازش و به اشتراک‌گذاری این داده‌ها برای توسعه و اجرای سیستم‌های AI، نگرانی‌های جدی در خصوص نقض حریم خصوصی بیماران ایجاد می‌کند. فرآیند ناشناس‌سازی<sup>۴</sup> و شبه‌ناشناس‌سازی<sup>۵</sup> داده‌ها، هرچند ضروری است، اما همیشه تضمین‌کننده عدم شناسایی مجدد فرد نخواهد بود.<sup>۶</sup> تدوین پروتکل‌های امنیتی قوی، استفاده از روش‌های حفظ حریم خصوصی در یادگیری ماشینی (PPML)<sup>۷</sup> و ایجاد چارچوب‌های قانونی روشن برای دسترسی و استفاده از داده‌ها، امری حیاتی است. نبود قوانین جامع و به‌روز در خصوص حفاظت

<sup>۵</sup> Pseudonymization<sup>۶</sup> Re-identification risk<sup>۷</sup> Privacy-Preserving Machine Learning<sup>۱</sup> Multi-center data<sup>۲</sup> Generalization<sup>۳</sup> Robustness<sup>۴</sup> Anonymization

درک چگونگی رسیدن الگوریتم به یک تصمیم، برای ایجاد اعتماد و پذیرش توسط پزشکان و بیماران حیاتی است. در ایران، نبود قانون جامع مسئولیت‌پذیری در قبال خطاهای تشخیصی یا درمانی ناشی از سیستم‌های AI، یک خلأ مهم حقوقی و اخلاقی محسوب می‌شود که باید مورد توجه قرار گیرد.

### نتیجه‌گیری

AI در حال تبدیل شدن به یکی از ستون‌های اصلی نظام سلامت آینده است و پتانسیل بی‌نظیری برای ارتقای دقت تشخیص، شخصی‌سازی درمان، پیشگیری هوشمند، بهینه‌سازی منابع و دستیابی به عدالت سلامت در ایران دارد. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که جامعه علمی و پژوهشی کشور از نظر توان فنی و تولید دانش در حوزه AI پزشکی (به‌ویژه در تحلیل تصویر و تشخیص بیماری) در سطحی کاملاً هم‌تراز با استانداردهای جهانی قرار دارد. با این حال، فاصله اصلی میان ایران و کشورهای پیشرو نه در «دانش فنی»، بلکه در مقیاس‌پذیری، عملیاتی‌سازی گسترده و یکپارچه‌سازی پایدار این فناوری در نظام ارائه خدمات سلامت است.

در مسیر توسعه پایدار زیست‌بوم AI سلامت، بازنگری در مدل‌های آموزشی سنتی ضروری است. ایجاد برنامه‌های آموزشی ترکیبی MD-PhD با تمرکز بر حوزه‌هایی مانند علوم داده‌های بالینی<sup>۴</sup> و پزشکی محاسباتی<sup>۵</sup> از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این ساختار آموزشی میان‌رشته‌ای، پیوند واقعی میان پژوهش و بالین را تقویت می‌کند. بدین ترتیب، نسل جدیدی از «پزشکان-داده‌شناسان» پرورش می‌یابد که

از داده‌های سلامت در ایران، به این چالش دامن می‌زند.

سوگیری الگوریتمی<sup>۱</sup>: الگوریتم‌های AI، به ویژه مدل‌های یادگیری ماشین، از داده‌هایی که با آن‌ها آموزش می‌بینند، الگوها را یاد می‌گیرند. اگر داده‌های آموزشی نماینده کافی از تمام گروه‌های جمعیتی (از نظر جنسیت، نژاد، سن، وضعیت اجتماعی-اقتصادی و وضعیت سلامتی) نباشند، الگوریتم، دچار سوگیری خواهد شد. این سوگیری می‌تواند منجر به تشخیص نادرست، توصیه درمان نامناسب یا ارائه خدمات با کیفیت پایین‌تر برای گروه‌هایی شود که به طور ناکافی در داده‌های آموزشی حضور داشته‌اند. به عنوان مثال، اگر یک الگوریتم تشخیص سرطان پوست بر روی داده‌های عمدتاً افراد با پوست روشن آموزش دیده باشد، ممکن است در تشخیص ضایعات مشابه در افراد با پوست تیره با مشکل مواجه شود. این مسئله در ایران، با توجه به تنوع قومیتی و اجتماعی، اهمیت دوچندانی پیدا می‌کند. تدوین چارچوب‌های سخت‌گیرانه برای ارزیابی، اعتبارسنجی و اطمینان از عدالت الگوریتمی<sup>۲</sup> ضروری است.

اخلاقیات پزشکی و مسئولیت‌پذیری: با پیشرفت AI در تصمیم‌گیری‌های بالینی، سؤالاتی در مورد مسئولیت‌پذیری در قبال خطاهای احتمالی مطرح می‌شود. چه کسی مسئول خطای تشخیصی ناشی از یک الگوریتم AI است؟ پزشک، توسعه‌دهنده نرم‌افزار، بیمارستان، یا خود الگوریتم؟ سازمان جهانی بهداشت (۲۰۲۲) بر ضرورت شفافیت<sup>۳</sup> و توضیح‌پذیری<sup>۴</sup> الگوریتم‌های AI در حوزه سلامت تأکید کرده است.

<sup>4</sup> Explainability

<sup>5</sup> Clinical data science

<sup>6</sup> Computational medicine

<sup>1</sup> Algorithmic bias

<sup>2</sup> Algorithmic fairness

<sup>3</sup> Transparency

برای ارتقای سلامت آحاد جامعه بهره‌برداری کامل نمود.

#### - محدودیت‌های پژوهش

این مطالعه یک مرور تحلیلی-کیفی از ادبیات علمی موجود است. هدف اصلی آن، ارائه یک تصویر کلی از وضعیت موجود، شناسایی روندهای اصلی و چالش‌های فراوری کاربرد AI در علوم پزشکی و بهداشت، با تمرکز ویژه بر وضعیت ایران بوده است. با این حال، ماهیت این تحقیق دارای محدودیت‌هایی است:

- فقدان تحلیل آماری کمی: این پژوهش شامل تحلیل‌های آماری کمی مانند متاآنالیز<sup>۱</sup> نبوده است. به همین دلیل، نمی‌توان به طور دقیق تأثیر کمی برخی کاربردها یا مقایسه‌های آماری دقیقی بین مطالعات مختلف ارائه داد. تمرکز اصلی بر تحلیل کیفی و روندهای کلی بوده است.

- محدودیت دسترسی به داده‌های بومی: بخشی از چالش‌های پژوهش در ایران، محدودیت دسترسی به داده‌های پژوهشی جامع و کامل، به خصوص پروژه‌های در حال اجرا یا داده‌های بخش خصوصی است. تمرکز اصلی این مطالعه بر داده‌های خلاصه‌شده منتشرشده در مجلات و کنفرانس‌های علمی معتبر داخلی و بین‌المللی بود. مقالات خاکستری<sup>۲</sup> و گزارش‌های پروژه‌های صنعتی به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفتند.

- پویایی سریع حوزه: حوزه AI با سرعتی بسیار بالا در حال تحول است. در حالی که سعی بر پوشش جدیدترین پژوهش‌ها تا سال ۲۰۲۵ (یا ۱۴۰۴ شمسی) بوده است، ممکن است برخی از پیشرفت‌های بسیار

هم درک بالینی عمیق و هم تسلط الگوریتمیک لازم برای توسعه و ارزیابی سیستم‌های هوشمند را دارا هستند. چنین برنامه‌هایی می‌توانند ایران را در مسیر تربیت نیروی انسانی رقابتی در سطح بین‌المللی قرار دهند و شکاف میان تحقیقات دانشگاهی و کاربردهای واقعی بالینی را کاهش دهند.

تحقق کامل این تحول نیازمند گذار سریع و هماهنگ از مرحله پژوهش‌های پراکنده و پایلوت به مرحله اجرای ملی و بالینی است. اقدامات راهبردی و اولویت‌دار در این زمینه عبارتند از:

- ایجاد بانک داده ملی سلامت یکپارچه، استاندارد، چندمرکزی و امن به‌عنوان زیربنای توسعه الگوریتم‌های بومی و کم‌سوگیری؛

- تدوین و اجرای چارچوب حقوقی-اخلاقی جامع برای حفاظت از حریم خصوصی، مسئولیت‌پذیری الگوریتمی، شفافیت و عدالت در AI پزشکی؛

- سرمایه‌گذاری هدفمند در زیرساخت‌های محاسباتی پیشرفته، یکپارچه‌سازی سامانه‌های اطلاعات سلامت و توسعه ابررایانه‌های پزشکی؛

- تربیت گسترده نیروی انسانی میان‌رشته‌ای (پزشک-داده‌شناس، مهندس پزشکی هوش‌محور و اخلاق‌گرایان حوزه فناوری سلامت)؛

- تقویت همکاری‌های بین‌بخشی (دولت، دانشگاه، بخش خصوصی و بیمارستان‌ها) و حمایت از اکوسیستم نوآوری سلامت دیجیتال.

تنها با اجرای همزمان و هماهنگ این راهبردها می‌توان AI را از یک ابزار پژوهشی به یک شتاب‌دهنده واقعی عدالت و کیفیت در نظام سلامت ایران تبدیل کرد و از فرصت طلایی همگرایی فناوری و پزشکی

<sup>2</sup> Grey literature

<sup>1</sup> Meta-analysis

است. این امر امکان آموزش الگوریتم‌های AI بومی با داده‌های چندمرکزی و نماینده جمعیت کشور را فراهم خواهد کرد.

برای تضمین سازگاری طولانی‌مدت «بانک داده ملی سلامت» با استانداردهای جهانی و تسهیل تبادل داده میان پلتفرم‌ها، پیشنهاد می‌شود چارچوب‌های بین‌المللی 'ISO/HL7 FHIR' به‌عنوان مبنای فنی و ارتباطی این زیرساخت در نظر گرفته شوند. به‌کارگیری استاندارد FHIR باعث می‌شود داده‌های سلامت از منابع مختلف (EHR, مراکز تصویربرداری و آزمایشگاه‌ها) با حداقل ناسازگاری معنایی<sup>۲</sup> مجتمع شوند. این اقدام نه تنها قابلیت همکاری را افزایش می‌دهد، بلکه زیرساخت سلامت ایران را برای تعاملات بین‌المللی آماده می‌سازد.

تدوین و اجرای چارچوب نظارتی، حقوقی و اخلاقی شفاف:

قوای قانون‌گذار، سازمان‌های نظارتی و وزارت بهداشت باید فوراً اقدام به تدوین چارچوب‌های حقوقی و اخلاقی مشخص و جامعی نمایند که جنبه‌های کلیدی زیر را پوشش دهد:

- مسئولیت‌پذیری الگوریتمی<sup>۳</sup>: تعریف دقیق مسئولیت پزشکان، توسعه‌دهندگان، و مؤسسات در قبال خطاهای تشخیصی یا درمانی ناشی از سیستم‌های AI.  
- حریم خصوصی و امنیت داده‌ها: تدوین مقررات سخت‌گیرانه برای حفاظت از داده‌های سلامت در فرآیندهای جمع‌آوری، ذخیره‌سازی، پردازش و اشتراک‌گذاری.

جدید و نوظهور که هنوز به طور رسمی منتشر نشده‌اند، در این مرور لحاظ نشده باشند.

- سوگیری انتخاب: هرچند تلاش بر جستجوی جامع بوده است، اما همواره احتمال وجود سوگیری در انتخاب مطالعات نهایی وجود دارد.

با وجود این محدودیت‌ها، این مطالعه، سعی کرده است تا با ارائه یک دیدگاه جامع و تحلیلی، به درک بهتر وضعیت AI در علوم پزشکی و بهداشت، چالش‌های پیش رو و راهکارهای بالقوه کمک کند.

### پیشنهادات

برای بهره‌برداری مؤثرتر، پایدار و اخلاقی از AI در نظام سلامت ایران، پیشنهادات عملیاتی زیر ارائه می‌گردد:

تأسیس و تقویت بانک داده ملی سلامت:

- وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی باید با همکاری سازمان‌های مربوطه (مانند سازمان نظام پزشکی، سازمان فناوری اطلاعات ایران) و مراکز علمی، اقدام به تأسیس یک «بانک داده ملی سلامت» جامع، استاندارد شده و امن نماید. این بانک داده باید شامل انواع داده‌های سلامت (پرونده الکترونیک، تصاویر پزشکی، داده‌های ژنومیک، داده‌های دستگاه‌های پوشیدنی و غیره) باشد و از پروتکل‌های امنیتی بالا و مکانیسم‌های قوی حفظ حریم خصوصی (مانند ناشناس‌سازی پیشرفته و رمزنگاری) برخوردار باشد.

- ایجاد یک چارچوب قانونی مشخص برای دسترسی پژوهشگران و توسعه‌دهندگان مجاز به این داده‌ها، با رعایت کامل اصول اخلاقی و حریم خصوصی، الزامی

<sup>3</sup> Algorithmic accountability

<sup>1</sup> Fast Healthcare Interoperability Resources

<sup>2</sup> Semantic interoperability

برنامه‌نویسی و یادگیری ماشین را فرا گرفته‌اند مانند «پزشک-داده‌شناس» یا «پزشک-محقق».

- تشکیل تیم‌های چندتخصصی در مراکز درمانی و پژوهشی که شامل پزشکان، دانشمندان داده، متخصصان IT و اخلاق‌گرایان برای هدایت و اجرای پروژه‌های AI باشد.

حمایت از تحقیقات و نوآوری بومی:

- اختصاص بودجه‌های پژوهشی کافی برای حمایت از پروژه‌های تحقیقاتی نوآورانه در حوزه AI پزشکی، با اولویت‌بندی پروژه‌هایی که به رفع نیازهای خاص نظام سلامت ایران می‌پردازند.

- ایجاد مراکز نوآوری و شتاب‌دهنده‌های تخصصی در حوزه فناوری سلامت<sup>۷</sup> و AI، برای حمایت از استارت‌آپ‌ها و شرکت‌های دانش‌بنیان فعال در این زمینه.

- تشویق همکاری‌های بین‌المللی و انتقال دانش، ضمن اولویت‌بخشی به توسعه راهکارهای بومی و قابل انطباق با شرایط کشور.

توسعه زیرساخت‌های فنی و فناوری اطلاعات:

- سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های محاسباتی قدرتمند (مانند مراکز داده، GPU clusters) برای پردازش داده‌های عظیم و اجرای مدل‌های پیچیده AI.

- بهبود و یکپارچه‌سازی سامانه‌های پرونده الکترونیک سلامت (EHR) در سراسر کشور، تا داده‌ها به صورت استاندارد و قابل دسترسی باشند.

- عدالت و اجتناب از سوگیری<sup>۱</sup>: الزامات برای ارزیابی و کاهش سوگیری در الگوریتم‌ها و اطمینان از ارائه خدمات برابر برای تمامی گروه‌های جمعیتی.

- شفافیت و توضیح‌پذیری<sup>۲</sup>: تعیین استانداردهایی برای قابلیت درک و توضیح عملکرد سیستم‌های AI در تصمیم‌گیری‌های بالینی.

ایجاد یک کمیته اخلاقی تخصصی در حوزه AI پزشکی برای بررسی و تأیید پروژه‌های مرتبط:

از منظر اخلاقی، توصیه می‌شود مکانیسمی الزام‌آور برای ارزیابی اخلاقی الگوریتم‌ها بر اساس شاخص‌های توضیح‌پذیری<sup>۳</sup> ایجاد شود. در پزشکی، جعبه‌سیاه بودن الگوریتم‌ها<sup>۴</sup> پذیرفتنی نیست. بنابراین، هر مدل AI پیش از استقرار بالینی باید از نظر میزان شفافیت تصمیم‌گیری و قابلیت تفسیر خروجی‌ها برای پزشکان و بیماران رتبه‌بندی شود. این رویکرد، ضمن تقویت اعتماد حرفه‌ای، مسئولیت‌پذیری در قبال خطاهای احتمالی را شفاف‌تر می‌سازد.

سرمایه‌گذاری در آموزش و تربیت نیروی انسانی متخصص:

- دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزش عالی باید دوره‌های تخصصی مشترک و میان‌رشته‌ای در زمینه‌های «علوم داده سلامت»<sup>۵</sup>، «AI پزشکی»<sup>۶</sup> و «مهندسی زیست‌پزشکی با تمرکز بر AI» را راه‌اندازی یا تقویت کنند.

- برنامه‌های آموزشی باید بر تربیت نسل جدیدی از متخصصان متمرکز باشند که هم دانش عمیقی در علوم پزشکی دارند و هم مهارت‌های لازم در علوم داده،

<sup>5</sup> Health data science

<sup>6</sup> Medical AI

<sup>7</sup> Health technology

<sup>1</sup> Fairness and bias mitigation

<sup>2</sup> Transparency and explainability

<sup>3</sup> Explainability

<sup>4</sup> Black-box nature

Architectures, workflow, applications and future directions. *Computers*, 12(5), 91.

[9] Ardila, D., Kiraly, A.P., Bharadwaj, S., Choi, B., Reicher, J.J., Peng, L., Tse, D., Etemadi, M., Ye, W., Corrado, G., Naidich, D. P., Shetty, S., 2019. End-to-end lung cancer screening with three-dimensional deep learning on low-dose chest CT. *Nature Medicine*, 25(6), 954.

[10] Rojas-Carabali, W., Agrawal, R., Gutierrez-Sinisterra, L., Baxter, S.L., Cifuentes-González, C., Wei, Y.C., Abisheganaden, J., Kannapiran, P., Wong, S., Lee, B., de-la-Torre, A., Agrawal, R., 2024. Natural language processing in medicine and ophthalmology: A review for the 21<sup>st</sup>-century clinician. *Asia-Pacific Journal of Ophthalmology*, 13(4), 100084.

[11] Sheikhalishahi, S., Miotto, R., Dudley, J.T., Lavelli, A., Rinaldi, F., Osmani, V., 2019. Natural language processing of clinical notes on chronic diseases: Systematic review. *JMIR Medical Informatics*, 7(2), e12239.

[12] Ghasempour, A., 2025, Medical big data and its ethical challenges in violation of patient privacy. *Ethics in Science and Technology*, 20 (2), 9. (in Persian)

[13] Yasaka, K., Abe, O., 2018, Deep learning and artificial intelligence in radiology: Current applications and future directions. *PLoS Medicine*, 15(11), e1002707.

[14] Chen, X., Tao, F., Chen, Y., Cheng, J., Zhou, Y., Wang, X., 2024, Forecasting influenza epidemics in China using transmission dynamic model with absolute humidity. *Infectious Disease Modelling*, 10(1), 50.

[15] Shademan, A., Decker, R.S., Opfermann, J.D., Leonard, S., Krieger, A., Kim, P.C.W., 2016, Supervised autonomous robotic soft tissue surgery. *Science Translational Medicine*, 8(337), 337ra64.

[16] Vamathevan, J., Clark, D., Czodrowski, P., Dunham, I., Ferran, E., Lee, G., Li, B., Madabhushi, A., Shah, P., Spitzer, M., Zhao, S., 2019, Applications of machine learning in drug discovery and development. *Nature Reviews Drug Discovery*, 18(6), 463.

[17] Ali, F., El-Sappagh, S., Islam, S.M.R., Kwak, D., Ali, A., Imran, M., Kwak, K.S.,

- استفاده از فناوری‌های ابری<sup>۱</sup> با رعایت پروتکل‌های امنیتی بالا برای افزایش مقیاس پذیری و انعطاف پذیری زیرساخت‌ها.

## تعارض منافع

نویسندگان این مقاله هیچ گونه تعارض منافع مالی، شخصی، یا حرفه‌ای در رابطه با نتایج، یافته‌ها، و محتوای این مقاله گزارش نمی‌کنند.

## منابع

[1] Topol, E.J., 2019, High-performance medicine: The convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine*, 25, 44.

[2] Hong, S., Choi, Y.A., Joo, D.S., Gursay, G., 2024, Privacy-preserving model evaluation for logistic and linear regression using homomorphically encrypted genotype data, *Journal of Biomedical Informatics*, 156, 104678.

[3] Nahavandi, D., Alizadehsani, R., Khosravi, A., Acharya, U.R., 2022, Application of artificial intelligence in wearable devices: Opportunities and challenges. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 213, 106541.

[4] Rajkomar, A., Dean, J., Kohane, I., 2019, Machine learning in medicine. *The New England Journal of Medicine*, 380(14), 1347.

[5] Krittanawong, C., Rogers, A.J., Aydar, M., Choi, E., Johnson, K.W., Wang, Z., Narayan, S.M., 2020, Integrating blockchain technology with artificial intelligence for cardiovascular medicine. *Nature Reviews. Cardiology*, 17(1), 1.

[6] Alhumaidi, N.H., Dermawan, D., Kamaruzaman, H.F., Alotaiq, N., 2025, The use of machine learning for analyzing real-world data in disease prediction and management: Systematic review. *JMIR Medical Informatics*, 13, e68898.

[7] Arkoudis, N.-A., Papadakis, S.P., 2025, Machine learning applications in healthcare clinical practice and research. *World Journal of Clinical Cases*, 13(1), 99744.

[8] Taye, M.M., 2023, Understanding of machine learning with deep learning:

<sup>1</sup> Cloud computing

- 2020, A smart healthcare monitoring system for heart disease prediction based on ensemble deep learning and feature fusion. *Information Fusion*, 63, 208.
- [18] Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B. E., Setio, A.A.A., Ciampi, F., Ghafoorian, M., van der Laak, J.A.W.M., van Ginneken, B., Sánchez, C.I., 2017, A survey on deep learning in medical image analysis. *Medical Image Analysis*, 42, 60.
- [19] Zhu, Q., Zhang, Y., Luo, Y., Li, Y., Wang, Y., 2023, Forecasting influenza activity using a multi-source data-driven model based on deep learning. *BMC Infectious Diseases*, 23(1), 89.
- [20] Mousavi, M., Hosseini, S., Omid, M.R., 2024, Improved deep neural network algorithm for COVID-19 detection in the internet of things. *Soft Computing Journal*, 12(2), 54. (in Persian)
- [21] Zhou, S.K., Greenspan, H., Davatzikos, C., Duncan, J.S., van Ginneken, B., Madabhushi, A., Prince, J. L., Rueckert, D., Summers, R.M., 2021, A review of deep learning in medical imaging: Imaging traits, technology trends, and challenges with ecosystem. *Proceedings of the IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 109(5), 820.
- [22] World Health Organization (WHO), 2021, Ethics and governance of artificial intelligence for health. (Available online: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240029200>)

“Research article”

## Feasibility assessment of biodiesel production from Tehran’s urban organic waste using alkaline transesterification

Maryam Yahaghi<sup>1</sup>, Shahrzad Khoramnejadian<sup>2,\*</sup>, Lobat Taghavi<sup>3</sup>, Ali Dehghan Banadaki<sup>4</sup>,  
Keivan Saeb<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Department of Environment, Dam.C., Islamic Azad university, Damavand, Iran

<sup>2</sup>Department of Civil & Environmental Engineering, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

<sup>3</sup>Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>4</sup>Department of Civil Engineering, Dam.C., Islamic Azad university, Damavand, Iran

<sup>5</sup>Department of Environment, To.C., Islamic Azad university, Tonekabon, Iran

\*Corresponding author: shkhoramnejadi@iau.ir

(Received: 3 December 2025, Accepted: 1 January 2026)

### Abstract

This study investigates the feasibility of biodiesel production from urban wet municipal solid waste in Tehran using an alkaline transesterification process. Waste samples were collected from municipal collection stations, impurities were removed, and samples were analyzed under two conditions: before drying and after drying. Lipid extraction was performed using a Soxhlet apparatus with n-hexane as the selected solvent, following AOAC 920.39 (2016) and ASTM D3178-21 (2021). The results indicated that the mean lipid extraction yield of the undried samples (11.55%) was significantly higher than that of the dried samples (9.22%) ( $p < 0.05$ ). Biodiesel was produced under optimized conditions, including a methanol-to-oil molar ratio of 6:1, a reaction temperature of 60 °C, and a reaction time of 70 min. The physicochemical properties of the produced biodiesel—density (ASTM D4052), viscosity (ASTM D445), and flash point (ASTM D93)—met the requirements of ASTM D6751 (2020) and EN 14214 (2019), confirming acceptable fuel quality. Statistical analyses (independent t-tests and one-way ANOVA) showed that reaction time, methanol-to-oil molar ratio, and catalyst loading had statistically significant effects on biodiesel yield ( $p < 0.05$ ). Based on the experimental data, the potential daily biodiesel production from Tehran’s urban wet waste was estimated at approximately 21,730 L, corresponding to an annual production of about 7.93 million liters. Overall, the findings suggest that urban wet municipal solid waste is a promising feedstock for biodiesel production and, if scaled up, could significantly contribute to sustainable waste management, renewable energy generation, and the development of a circular economy.

**Conflict of interest:** None declared.

**Keywords:** Biodiesel, Municipal wet waste, Transesterification, Soxhlet, SPSS, Economic analysis, Renewable energy



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

دوره ۲، شماره ۳، پیاپی ۷  
پاییز ۱۴۰۴، صفحات ۴۳-۳۳

## «مقاله پژوهشی»

# امکان‌سنجی تولید بیودیزل از پسماند تر شهری تهران با استفاده از فرایند ترانس استریفیکاسیون قلیایی

مریم یاحقی<sup>۱</sup>، شهرزاد خرم‌نژادیان<sup>۲\*</sup>، لعبت تقوی<sup>۳</sup>، علی دهقان بنادکی<sup>۴</sup>، کیوان صائب<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی علوم و مهندسی محیط زیست، گروه محیط زیست، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار گروه علمی عمران و محیط زیست، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

<sup>۳</sup> استاد گروه محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۴</sup> دانشیار گروه عمران، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران

<sup>۵</sup> دانشیار گروه محیط زیست، واحد تنکابن، دانشگاه آزاد اسلامی، تنکابن، ایران

\* نویسنده مسئول مکاتبات: shkhoramnejadi@iau.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱)

## چکیده

در این پژوهش، امکان‌سنجی تولید بیودیزل از پسماند تر شهری با استفاده از فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون قلیایی و تحلیل آماری نتایج با نرم‌افزار SPSS مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های پسماند از ایستگاه‌های جمع‌آوری شهر تهران برداشت شده، در دو حالت پیش از خشک شدن و پس از خشک شدن مورد آزمایش قرار گرفتند. به منظور استخراج چربی از پسماند تر، از دستگاه سوکسله با حلال نرمال هگزان طبق استانداردهای AOAC 920.39 (2016) و ASTM D3178-21 (2021) استفاده شد. نتایج نشان داد که میانگین راندمان استخراج چربی در نمونه‌های پیش از خشک شدن (۱۱/۵۵٪) به‌طور معناداری بیشتر از نمونه‌های خشک شده (۹/۲۲٪) است ( $p < 0/05$ ). فرآیند تولید بیودیزل با استفاده از نسبت مولی متانول به روغن ۶:۱، دمای ۶۰ درجه سلسیوس و زمان واکنش ۷۰ دقیقه انجام شد. آزمون‌های فیزیکی شامل چگالی (ASTM D4052)، ویسکوزیته (ASTM D445) و نقطه اشتعال (ASTM D93) نشان دادند که کیفیت سوخت تولیدی در محدوده مجاز استانداردهای ASTM D6751 (2020) و EN 14214 (2019) قرار دارد. تحلیل‌های آماری (آزمون‌های t مستقل و آنالیز واریانس یک‌طرفه) نشان داد که زمان واکنش، نسبت مولی متانول به روغن و میزان بارگذاری کاتالیزور، اثرات آماری معنی‌داری بر بازده بیودیزل داشتند ( $p < 0/05$ ). بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده، پتانسیل تولید روزانه بیودیزل در شهر تهران حدود ۲۱،۷۳۰ لیتر و تولید سالانه آن نزدیک به ۷/۹۳ میلیون لیتر برآورد شد. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که پسماند تر شهری، منبعی مناسب برای تولید سوخت زیستی محسوب می‌شود و ترکیب تحلیل‌های آماری با روش‌های استاندارد آزمایشگاهی می‌تواند مبنای طراحی مدل‌های صنعتی برای بازیافت انرژی از پسماندهای آلی شهری در ایران قرار گیرد.

**کلمات کلیدی:** بیودیزل، پسماند تر شهری، ترانس‌استریفیکاسیون، سوکسله، SPSS، تحلیل اقتصادی، انرژی تجدیدپذیر

## مقدمه

رشد روزافزون جمعیت شهری و گسترش فعالیت‌های صنعتی در کلان‌شهرهایی مانند تهران، منجر به افزایش چشمگیر تولید پسماندهای شهری شده است. بر اساس آمار سازمان مدیریت پسماند شهر تهران، روزانه حدود ۵۸۹۷ تن پسماند شهری در این شهر تولید می‌شود که نزدیک به ۶۰ درصد آن پسماند تر یا آلی است. این حجم از پسماند، اگر بدون مدیریت مناسب دفن یا سوزانده شود، می‌تواند به آلودگی منابع آب، خاک و هوا منجر گردد و هزینه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی قابل توجهی را تحمیل کند. این حجم از پسماند معادل ۳۵۰۰ تن در روز مواد آلی قابل تبدیل به انرژی است که در صورت استفاده کامل، می‌تواند بیش از ۲۱ هزار لیتر بیودیزل در روز (حدود ۷/۹ میلیون لیتر در سال) تولید کند. به علاوه، در حال حاضر، تنها حدود ۱۵ درصد از پسماند آلی تهران بازیافت یا فرآوری انرژی می‌شود و مابقی به محل دفن آرادکوه منتقل می‌گردد، که خود منجر به انتشار روزانه مقادیر بالای CO<sub>2</sub> می‌شود، بنابراین پتانسیل بازیافت انرژی ضروری است (۱).

در دهه‌های اخیر، استفاده از پسماندهای آلی به عنوان منبع انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه برای تولید سوخت‌های زیستی (Biofuels) مورد توجه محققان قرار گرفته است (۲). بیودیزل یکی از مهم‌ترین سوخت‌های زیستی نسل دوم است که از واکنش ترانس‌استریفیکاسیون چربی‌ها و روغن‌ها با الکل (معمولاً متانول) در حضور کاتالیست قلیایی تولید می‌شود. این سوخت از نظر خواص فیزیکی و شیمیایی مشابه گازوئیل بوده، اما زیست‌تخریب‌پذیر، غیرسمی و با انتشار کم‌تر آلاینده‌ها همراه است (۳).

سوخت‌های زیستی به مجموعه‌ای از سوخت‌های جامد، مایع و گازی اطلاق می‌شود که از منابع تجدیدپذیر زیست‌توده حاصل می‌شوند. این منابع شامل فرآورده‌های کشاورزی، پسماندهای غذایی و دامی، بقایای گیاهان و حتی زباله‌های شهری و صنعتی هستند که از طریق فرآیندهای زیستی و شیمیایی به انرژی قابل استفاده تبدیل می‌گردند. از میان انواع مختلف سوخت‌های زیستی می‌توان به بیواتانول، بیودیزل، بیوگاز، بیوهیدروژن و زغال زیستی اشاره کرد که قابلیت جایگزینی با سوخت‌های فسیلی را دارند و نقش مؤثری در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کنند. این دسته از سوخت‌ها با تکیه بر منابع تجدیدپذیر، ظرفیت بالایی برای تحقق اهداف توسعه پایدار، اقتصاد چرخشی و ارتقای امنیت انرژی جهانی دارند (۴).

از سوی دیگر، استفاده از پسماند تر شهری به عنوان خوراک تولید بیودیزل، علاوه بر کاهش هزینه‌های مواد اولیه، مشکلات ناشی از انباشت پسماند در مراکز دفن مانند آرادکوه را نیز به حداقل می‌رساند. بر اساس داده‌های این پژوهش، میزان چربی قابل استخراج از پسماند تر پیش از خشک شدن برابر با ۵۵/۱۱٪ و پس از خشک شدن ۲۲/۹٪ بود. این چربی خام، پتانسیل بالایی برای تبدیل به سوخت زیستی دارد.

در پژوهش‌های بین‌المللی، منابعی مانند روغن‌های سرخ‌کردنی مصرف‌شده در رستوران‌ها، چربی‌های حیوانی، ضایعات غذایی و فاضلاب شهری به عنوان خوراک مناسب در فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون مورد

افزایش توان خروجی، کاهش آلاینده‌های CO و UHC تا حدود ۷۳٪ و افزایش آلاینده NOx تا حدود ۳۲٪ نسبت به گازوئیل معمولی گردید. این یافته‌ها بیانگر ظرفیت بالای روغن‌های پسماند و کاتالیست‌های ناهمگن در ارتقای کیفیت و پایداری سوخت‌های جایگزین هستند (۸).

مرتضی و همکاران در سال ۱۴۰۲ تولید سوخت زیستی از پسماند روغن پخت و پز را بررسی نمودند (۹). هدف این پژوهش، بررسی تئوری و تجربی عملکرد موتور دیزل با سوخت حاوی بیودیزل از منظر علم ارزیابی چرخه حیات بود، این مطالعه کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای را تأیید نمود. در پژوهشی فرایندهای تولید بیودیزل از جلبک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ریزجلبک‌ها به دلیل دارا بودن میزان بالای چربی، نرخ رشد زیاد و توانایی جذب دی‌اکسیدکربن و تصفیهٔ پساب‌ها، منبعی پایدار و زیست‌سازگار برای تولید بیودیزل محسوب می‌شوند (۱۰).

بیش‌تر مطالعات انجام‌شده در سطح کشور محدود به منابع روغنی گیاهی یا روغن‌های مصرفی بوده و بررسی مستقیم پسماند تر شهری به‌عنوان منبع تولید بیودیزل کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلاء علمی و ارائه مدلی بومی برای استخراج چربی و تولید بیودیزل از پسماند تر شهر تهران، انجام شد.

### مواد و روش‌ها

- جمع‌آوری و آماده‌سازی نمونه‌ها

استفاده قرار گرفته‌اند (۵). در مطالعه ایگباکس<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۳ گزارش شده که در تولید بیودیزل از روغن/پسماند روغنی، با نسبت روغن به متانول ۶:۱ و با گردش/اختلاط تا حدود ۷۰ دقیقه، بازده بسیار بالا حاصل می‌شود و همچنین توضیح داده شده که مصرف بیش از حد کاتالیست می‌تواند به تشکیل صابون و افت عملکرد منجر شود (۶). همچنین پاشا<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۴ با بهره‌گیری از شبکه عصبی مصنوعی<sup>۳</sup> توانستند راندمان پیش‌بینی‌شده‌ای معادل ۸۸٪ در دمای بهینه ۶۰ سانتی‌گراد به دست آورند (۷).

در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در زمینه بررسی تولید و به‌کارگیری بیودیزل به‌عنوان جایگزینی پایدار برای سوخت دیزل انجام شده است. بیش‌تر این پژوهش‌ها بر کاهش هزینه‌های تولید از طریق استفاده از روغن‌های پسماند و غیرخوراکی به‌جای روغن‌های گیاهی خوراکی تمرکز داشته‌اند. به‌منظور بهبود کارایی واکنش و صرفه‌جویی اقتصادی، استفاده از کاتالیست‌های ناهمگن نیز به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از مطالعات انجام‌شده، به سنتز بیودیزل از روغن پسماند رستوران با به‌کارگیری کاتالیست مغناطیسی فریت باریم تلقیح‌شده با پتاسیم هیدروکسید پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان داد که محصول تولیدی با استاندارد ASTM D6751 انطباق داشته و استفاده از ترکیبات ۱۰ تا ۳۰ درصد حجمی بیودیزل در موتور تک‌سیلندر، عملکرد مناسبی از نظر توان، گشتاور و احتراق ارائه می‌دهد. به‌ویژه، مخلوط ۲۰٪ بیودیزل منجر به بهبود راندمان احتراق،

<sup>1</sup> Igbax

<sup>2</sup> Pasha

<sup>3</sup> Artificial Neural Networks

راندمان تولید بیودیزل، واکنش ترانس استریفیکاسیون در بازه دمایی ۶۰ تا ۶۵ سانتی‌گراد و زمان واکنش ۶۰ تا ۹۰ دقیقه و در نسبت‌های مختلف مولی متانول به روغن انجام شد. بر اساس نتایج آزمایش‌ها و تحلیل آماری، شرایط بهینه نهایی واکنش شامل نسبت مولی متانول به روغن ۶:۱، درصد وزنی کاتالیست ۱٪، دمای ۶۰ سانتی‌گراد و زمان واکنش ۷۰ دقیقه تعیین شد که در این شرایط بیشترین راندمان تولید بیودیزل حاصل گردید. بنابراین، کلیه نتایج نهایی، جداول و تحلیل‌های ارائه شده در این مقاله بر مبنای این شرایط بهینه گزارش شده‌اند. کیفیت بیودیزل تولیدی مطابق با استانداردهای ASTM D6751 و EN 14214 مورد ارزیابی قرار گرفت (۱۳).

#### - آنالیز سوخت تولیدی

ویژگی‌های بیودیزل شامل چگالی، ویسکوزیته، نقطه اشتعال و محتوای استر مورد سنجش قرار گرفتند. آزمون‌ها مطابق با استانداردهای ASTM D4052 (چگالی)، ASTM D445 (ویسکوزیته سینماتیک در ۴۰ سانتی‌گراد)، ASTM D93 (نقطه اشتعال) و EN 14103 (محتوای استر) انجام شدند (۲).

#### - تحلیل داده‌ها و روش‌های آماری

داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ تحلیل شدند. روش‌های آماری ساده شامل محاسبه میانگین و انحراف معیار، آزمون t مستقل برای مقایسه میانگین‌ها، و تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) برای بررسی تفاوت گروه‌ها به کار گرفته شد (۳).

#### نتایج و بحث

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سه پارامتر زمان واکنش، نسبت مولی متانول به روغن، و درصد وزنی

پسماند تر شهری از ایستگاه‌های جمع‌آوری پسماند تهران برداشت شد. پس از جداسازی ناخالصی‌ها، نمونه‌ها به دو بخش پیش از خشک شدن و پس از خشک شدن تقسیم شدند. رطوبت اولیه نمونه‌ها مطابق با روش استاندارد ASTM E1756-08 (۱۱) تعیین گردید.

#### - استخراج چربی

فرآیند استخراج چربی پسماند تر شهری با استفاده از دستگاه سوکسله انجام شد. در مرحله پیش‌آزمون، حلال‌های هگزان نرمال، متانول، اتانول و استون به منظور ارزیابی اولیه قابلیت استخراج مورد بررسی قرار گرفتند (۱۲). نتایج این مرحله نشان داد که نرمال‌هگزان به دلیل گزینش‌پذیری بالاتر نسبت به ترکیبات لیپیدی، پایداری مناسب و انطباق با استانداردهای مرجع، بالاترین راندمان استخراج چربی را ارائه می‌دهد. بر این اساس، در ادامه پژوهش و در تمامی آزمایش‌های نهایی، استخراج چربی صرفاً با استفاده از هگزان نرمال و مطابق با استانداردهای AOAC 920.39 (۲۰۱۶) و ASTM D3178-21 (۲۰۲۱) انجام شد. راندمان استخراج به صورت نسبت وزنی چربی استخراج شده به وزن ماده خشک محاسبه گردید.

#### - ترانس استریفیکاسیون و تولید بیودیزل

فرآیند تولید بیودیزل از چربی استخراج شده با استفاده از واکنش ترانس استریفیکاسیون قلیایی انجام گرفت. در این فرآیند، متانول به عنوان الکل واکنش‌دهنده و سدیم هیدروکسید (NaOH) به عنوان کاتالیست مورد استفاده قرار گرفت. واکنش در یک راکتور نیمه‌صنعتی مجهز به همزن مغناطیسی انجام شد. به منظور بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر

برخی موارد حتی به کاهش آن منجر شد، زیرا زمان طولانی باعث تبخیر بخشی از متانول و تشکیل صابون شد. روند افزایش راندمان تا زمان ۷۰ دقیقه و سپس کاهش آن به دلیل تبخیر متانول و صابونی شدن، دقیقاً با یافته‌های راشید و انور<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۸ منطبق است که راندمان بهینه را در دمای ۶۵ سانتی‌گراد و زمان ۶۰ تا ۷۵ دقیقه گزارش کردند (۱۴). همچنین مطالعه قبادیان و همکارانش در سال ۱۳۸۴ نیز شرایط مشابهی را برای واکنش ترانس استریفیکاسیون گزارش کرده است (۳).

جدول (۲) تأثیر درصد وزنی کاتالیست بر راندمان تولید بیودیزل را نشان می‌دهد. داده‌های بدست آمده بیان می‌کند که درصد وزنی کاتالیست بر راندمان تولید بیودیزل تأثیر قابل توجهی دارد. افزایش درصد وزنی کاتالیست از ۰/۵٪ به ۱/۰٪ باعث افزایش راندمان از ۷۴/۵٪ به ۸۶/۶٪ شده است که نشان‌دهنده بهبود واکنش ترانس استریفیکاسیون و کارایی بالاتر کاتالیست در این مقدار است. با افزایش درصد کاتالیست به ۱/۵٪، راندمان کاهش نسبی به ۸۲/۰٪ دارد که ممکن است به دلیل اشباع سطح واکنش‌دهنده‌ها، تشکیل صابون بیش‌تر یا اثرات جانبی ناشی از مصرف بیش از حد کاتالیست باشد که بازدهی کلی را کاهش می‌دهد. افزایش کاتالیست تا ۱٪ مفید بود اما مقادیر بالاتر موجب واکنش‌های جانبی شد.

جدول (۲): تأثیر درصد کاتالیست بر راندمان تولید بیودیزل

ردیف / پارامتر	درصد وزنی کاتالیست (%)	راندمان بیودیزل (%)	انحراف معیار (±SD)
۱	۰/۵	۷۴/۵	۲/۵
۲	۱/۰	۸۶/۶	۳/۲۳
۳	۱/۵	۸۲/۰	۲/۹

کاتالیست تأثیر قابل توجهی بر راندمان تولید بیودیزل دارند. جدول (۱) تأثیر زمان واکنش بر راندمان تولید بیودیزل را نشان می‌دهد. افزایش زمان واکنش تا ۷۰ دقیقه موجب افزایش راندمان شد ولی پس از آن به دلیل تبخیر متانول راندمان کاهش یافت. تجزیه و تحلیل داده‌های جدول نشان می‌دهد که مدت زمان واکنش نقش مهمی در بهبود راندمان تولید بیودیزل دارد. افزایش زمان واکنش از ۶۰ به ۷۰ دقیقه باعث افزایش راندمان از حدود ۷۸٪ به ۸۶/۶٪ شده است، زیرا این مدت زمان کافی است تا واکنش ترانس استریفیکاسیون کامل شود و مقدار بیش‌تری بیودیزل تولید گردد. با این حال، پس از ۷۰ دقیقه، ادامه دادن واکنش اثری معنی‌دار در افزایش میزان راندمان ندارد، بلکه سبب کاهش راندمان می‌شود. این کاهش احتمالاً ناشی از تبخیر متانول در اثر طولانی بودن زمان واکنش است، که منجر به کاهش میزان واکنش‌دهنده در محیط واکنش شده و در نتیجه، تشکیل صابون و کاهش کارایی فرایند را در پی دارد.

جدول (۱): تأثیر زمان واکنش بر راندمان تولید بیودیزل

ردیف / پارامتر	زمان واکنش (دقیقه)	راندمان بیودیزل (%)	انحراف معیار (±SD)
۱	۶۰	۷۸/۲	۲/۸
۲	۷۰	۸۶/۶	۳/۲۳
۳	۸۰	۸۴/۱	۳/۱

بیش‌ترین بازده در حضور کاتالیست سدیم هیدروکسید و در دمای ثابت ۶۵ سانتی‌گراد حاصل شد. داده‌ها حاکی از آن است که افزایش زمان واکنش از ۶۰ به ۷۰ دقیقه موجب افزایش راندمان از حدود ۷۸٪ به ۸۶/۶٪ گردید، اما افزایش زمان بیش از ۷۰ دقیقه، تأثیر معنی‌داری بر افزایش بازده نداشت و در

<sup>1</sup> Rashid & Anwar

به دلیل برگشت پذیری واکنش و نیاز به پیشبرد تعادل واکنش، نسبت‌های بیش تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. نسبت‌های معمول بهینه برای این واکنش بین ۶:۱ تا ۹:۱ گزارش شده است که بیش‌ترین راندمان را حاصل می‌کنند (۱۵ و ۱۶).

در این تحقیق نسبت مولی ۶:۱ بالاترین راندمان را ایجاد کرد و نسبت‌های بیش‌تر باعث افت بازده شدند. نتایج نشان داد که افزایش نسبت تا ۶:۱ موجب بهبود راندمان تولید بیودیزل شد، اما نسبت‌های بالاتر از این مقدار به دلیل رقیق شدن فاز واکنش و کاهش تماس بین مولکولی، باعث کاهش بازده نهایی گردید. در شرایط بهینه (۶:۱) حداکثر راندمان  $۸۶/۶ \pm ۳/۲۳$  درصد حاصل شد؛ اما افزایش بیش از حد متانول (بالاتر از مقدار بهینه) مشکلاتی مانند افزایش حلالیت گلیسرول در متانول اضافی ایجاد می‌کند، که منجر به کاهش جدایش فازها و برگشت واکنش به سمت مواد اولیه می‌شود. همچنین متانول اضافی می‌تواند باعث غیر فعال شدن کاتالیست شود و تشکیل امولسیون‌هایی که جداسازی بیودیزل را مشکل می‌کند (۱۷).

جدول (۴) ویژگی‌های فیزیکی بیودیزل تولیدی در شرایط بهینه را نشان می‌دهد. ویژگی‌های فیزیکی بیودیزل تولیدی با استانداردهای جهانی مطابقت دارد.

جدول (۴): ویژگی‌های فیزیکی بیودیزل تولیدی در شرایط بهینه

ویژگی فیزیکی	مقدار اندازه‌گیری شده	استاندارد EN ۱۴۲۱۴	استاندارد ASTM D6۷۵۱	واحد
چگالی در ۱۵ °C	۰/۸۷۹	۰/۸۶-۰/۹۰	۰/۸۶-۰/۹۰	g/cm <sup>3</sup>
ویسکوزیته سینماتیکی	۴/۸	۳/۵-۵/۰	۱/۹-۶/۰	mm <sup>2</sup> /s
نقطه اشتعال	۱۶۸	>۱۲۰	>۱۳۰	°C
عدد ستان	۵۲	>۵۱	>۴۷	-

۱۴۲۱۴ قرار دارند. چگالی اندازه‌گیری شده ۰/۸۷۹ g/cm<sup>3</sup> است که در بازه ۰/۸۶-۰/۹۰ این استانداردها

راندمان حداکثری ۸۶/۶٪ در حضور ۱٪ کاتالیست، با نتایج موجود در منابع هم‌خوانی دارد. هر دو مطالعه نشان دادند که غلظت‌های بیش از ۱٪ موجب صابونی شدن و افت راندمان می‌شود.

جدول (۳) تأثیر نسبت مولی متانول به روغن بر راندمان تولید بیودیزل را نشان می‌دهد. تغییر نسبت مولی متانول به روغن در محدوده ۳:۱ تا ۹:۱ بررسی گردید. با افزایش نسبت مولی از ۳:۱ به ۶:۱ افزایش چشم‌گیری در راندمان از ۸۰/۴٪ به ۸۶/۶٪ رخ می‌دهد، اما افزایش بیش‌تر نسبت به ۹:۱ منجر به کاهش نسبی راندمان به ۸۲/۷٪ شد.

جدول (۳): تأثیر نسبت مولی متانول به روغن بر راندمان تولید

ردیف / پارامتر	نسبت مولی متانول به روغن	راندمان بیودیزل (%)	انحراف معیار (±SD)
۱	۳:۱	۸۰/۴	۲/۶
۲	۶:۱	۸۶/۶	۳/۲۳
۳	۹:۱	۸۲/۷	۳/۰

مطالعات پیشین تأیید کرده‌اند که وجود متانول اضافی در واکنش ترانس استریفیکاسیون ضروری است تا واکنش به سمت تشکیل بیودیزل پیش برود؛ نسبت استوکیومتریک متانول به روغن ۳:۱ است، اما

ویژگی‌های فیزیکی بیودیزل تولیدی در شرایط بهینه، مطابق با استانداردهای ASTM D6751 و EN

کیفیت بالای احتراق، کاهش تأخیر اشتعال و بهبود عملکرد موتور می‌باشد. این مشخصات نشان می‌دهد که بیودیزل تولید شده از نظر کیفیت و ایمنی در سطح مورد قبول و قابل مقایسه با سوخت‌های تجاری است. جدول (۵) نتایج تحلیل آماری ANOVA برای پارامترهای مؤثر بر راندمان تولید بیودیزل را بیان می‌کند. بر اساس آزمون ANOVA، تمام پارامترها در سطح اطمینان ۹۵ درصد بر راندمان بیودیزل تأثیر معنی‌دار دارند ( $p < 0/05$ ).

می‌باشد، نشان‌دهنده تراکم مناسب سوخت و تطابق آن با معیارهای جهانی است. ویسکوزیته سینماتیکی برابر  $4/8 \text{ mm}^2/\text{s}$  است که در محدوده مجاز  $6/0 - 1/9$  (ASTM) و  $3/5 - 5/0$  (EN) قرار دارد و این پارامتر نشان دهنده جریان‌پذیری مناسب و عملکرد مطلوب در موتورهای دیزلی است. همچنین، نقطه اشتعال  $168^\circ\text{C}$  که بالاتر از حداقل مورد نیاز استاندارد است، بیانگر ایمنی بیشتر در حمل و نقل و نگهداری سوخت است.

عدد ستان ۵۲ ثبت شده، که فراتر از حداقل‌های استاندارد (47) ASTM و (51) EN است و نشان‌دهنده

جدول (۵): نتایج تحلیل آماری ANOVA برای پارامترهای مؤثر بر راندمان تولید بیودیزل

متغیر	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	سطح معنی‌داری (Sig.)
زمان واکنش	۱۴۲/۶	۲	۷۱/۳	۸/۴۵	۰/۰۱۲
نسبت مولی	۹۸/۴	۲	۴۹/۲	۶/۸۷	۰/۰۱۹
درصد کاتالیست	۱۵۶/۳	۲	۷۸/۱۵	۹/۱۲	۰/۰۰۹
خطا	۷۸/۵	۶	۱۳/۰۸	-	-
مجموع کل	۴۷۵/۸	۱۲	-	-	-

درصد وزنی کاتالیست (NaOH) نیز اثر معنی‌داری نشان داده است، اما شدت تأثیر آن نسبت به دو عامل دیگر کمتر است؛ در این میان، غلظت ۱٪ بهترین تعادل بین سرعت واکنش و خلوص محصول را فراهم کرده است.

نتایج آزمون تعقیبی Tukey HSD نیز اختلاف معنی‌داری را بین گروه‌ها تأیید کرده است، به طوری که بیش‌ترین راندمان در شرایط ۱:۶ متانول به روغن، ۷۰ دقیقه زمان واکنش و ۱٪ کاتالیست مشاهده شد. این یافته‌ها با نتایج مطالع تساولیدیس<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۳ همخوانی دارد. در این تحقیق گزارش شد در

در میان عوامل بررسی‌شده، نسبت مولی متانول به روغن بیش‌ترین مقدار را داشته است که بیانگر نقش تعیین‌کننده این پارامتر در واکنش ترانس استریفیکاسیون می‌باشد. در نسبت بهینه ۱:۶، بیش‌ترین راندمان (حدود ۸۷٪) حاصل شده است که با شرایط استوکیومتری واکنش برای تبدیل کامل‌تر گلیسیرید به متیل‌استر مطابقت دارد. پارامتر زمان واکنش نیز تأثیر قابل توجهی داشته است؛ افزایش زمان تا ۷۰ دقیقه باعث افزایش راندمان شده ولی در زمان‌های طولانی‌تر (بیش از ۸۰ دقیقه)، به دلیل تبخیر متانول و تشکیل صابون، بازده کاهش یافته است.

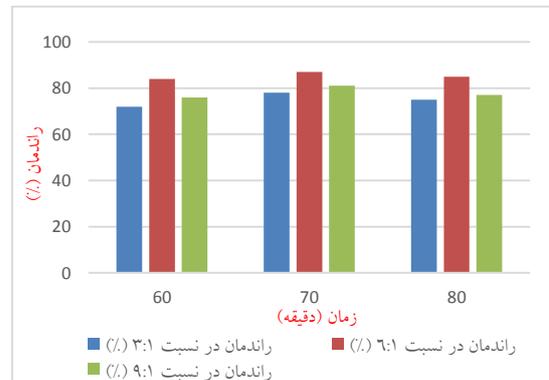
<sup>1</sup> Tsaoulidis

کردند که نسبت ۱:۶ و زمان ۶۰ تا ۸۰ دقیقه، راندمان بهینه‌ای بین ۸۵ تا ۹۰ درصد فراهم می‌کند (۱۸ و ۱۹). در مطالعه ایگباکس و همکاران<sup>۱</sup> در سال ۲۰۲۳، از نسبت‌های ۴:۱، ۶:۱، و ۸:۱ (حجم روغن به الکل) استفاده گردید و برای نسبت ۶:۱ کنترل‌شده، بازده قابل توجهی گزارش گردید، که مؤید بهبود جداسازی و واکنش کامل در مقایسه با شرایط نامناسب‌تر است (۶). همچنین، توسط پاشا<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۴ یک چارچوب حسگر نرم هیبریدی برای پیش‌بینی برخط راندمان تولید بیودیزل ارائه شده است که در آن از شبکه عصبی مصنوعی به‌عنوان هسته داده‌محور مدل استفاده شده است. مدل شبکه مصنوعی با دریافت پارامترهای عملیاتی فرایند ترانس‌استریفیکاسیون (مانند نسبت مولی الکل به روغن، زمان واکنش و دما) و ترکیب آن با مدل‌های مکانیکی، توانسته است رفتار غیرخطی فرایند را با دقت بالا شبیه‌سازی کند (۷).

با وجود نتایج امیدوارکننده به‌دست‌آمده در این مطالعه، برخی محدودیت‌ها وجود دارد که باید در تفسیر و تعمیم نتایج مورد توجه قرار گیرند. نخست، ترکیب پسماند تر شهری ذاتاً متغیر است و بسته به فصل، الگوی مصرف شهروندان، شرایط اقتصادی و نوع ایستگاه‌های جمع‌آوری، درصد مواد آلی و چربی موجود در پسماند می‌تواند دچار نوسان شود. این تغییرپذیری ممکن است بر راندمان استخراج چربی و بازده نهایی تولید بیودیزل تأثیرگذار باشد و در مقیاس صنعتی نیازمند سیستم‌های پایش و تنظیم مداوم خوراک ورودی است.

محدوده نسبت‌های میانی الکل به روغن (۱۰-۶)، برای زمان‌هایی تقریباً بالای ۷۰ ثانیه تا چند دقیقه، راندمان می‌تواند بیش از ۸۰ تا ۹۰٪ باشد و نسبت بسیار زیاد الکل باعث کاهش جدایی فاز و بازده می‌شود (۱۸).

شکل (۱) نمودار روند تغییر راندمان بیودیزل با زمان واکنش در نسبت‌های مختلف متانول به روغن را نشان می‌دهد. نمودار نشان‌دهنده اثر هم‌زمان زمان واکنش ۶۰، ۷۰، ۸۰ دقیقه و نسبت مولی متانول به روغن (۱:۳، ۱:۶، ۱:۹) بر راندمان تولید بیودیزل است.



شکل (۱): روند تغییر راندمان بیودیزل با زمان واکنش در نسبت‌های مختلف متانول به روغن

بر اساس نتایج، راندمان تولید در همه نسبت‌ها تا زمان ۷۰ دقیقه افزایش یافت و در نسبت ۱:۶ به مقدار بیشینه خود ۸۷٪ رسید. افزایش بیش‌تر زمان واکنش یا نسبت مولی بالاتر ۱:۹ موجب کاهش راندمان شد که این افت عملکرد به دلیل تشکیل صابون در محیط قلیایی و کاهش تماس مؤثر بین متانول و تری‌گلیسیریدها تفسیر می‌شود. این روند با یافته‌های عطاپور و همکاران در سال ۲۰۲۳ و تساوالیدیس و همکاران در سال ۲۰۲۳ هم‌خوان است؛ آن‌ها گزارش

<sup>1</sup> Igbax

<sup>2</sup> Pasha

تبدیل گردید. بهینه‌سازی پارامترهای واکنش نشان داد که نسبت مولی متانول به روغن ۱:۶، درصد وزنی کاتالیست ۱٪ و زمان واکنش ۷۰ دقیقه در دمای ۶۰ سانتی‌گراد شرایط بهینه نهایی تولید بیودیزل را فراهم می‌کنند. در این شرایط، بیش‌ترین راندمان تولید بیودیزل برابر با  $۳/۲۳ \pm ۸۶/۶$  درصد به دست آمد که از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با سایر شرایط آزمایش شده داشت ( $p < ۰/۰۵$ ). بررسی ویژگی‌های فیزیکی محصول نشان داد که بیودیزل حاصل دارای چگالی  $۰/۸۷۹ \text{ g/cm}^3$ ، ویسکوزیته  $۴/۸ \text{ mm}^2/\text{s}$  و نقطه اشتعال  $۱۶۸ \text{ }^\circ\text{C}$  است که کاملاً با حدود استانداردهای ASTM D6751 و EN 14214 مطابقت دارد. این نتایج گویای کیفیت بالای سوخت تولیدی و قابلیت استفاده مستقیم آن در موتورهای دیزلی بدون نیاز به تغییرات فنی قابل توجه است. از نظر زیست‌محیطی، بیودیزل تولیدشده، فاقد ترکیبات گوگردی و آروماتیک بوده، در مقایسه با گازوئیل فسیلی طبق تحقیقات پیشین، منجر به کاهش میانگین حدود ۵۵٪ در انتشار گاز  $\text{CO}_2$ ، ۵۰٪ در ذرات معلق ( $\text{PM}_{2.5}$ ) و ۶۰٪ در گازهای مضر نظیر  $\text{SO}_2$  و  $\text{CO}$  می‌شود. بنابراین استفاده از بیودیزل حاصل از پسماند نه تنها به بهبود کیفیت هوا و کاهش اثرات گلخانه‌ای کمک می‌کند، بلکه با بازیافت مواد زائد، رویکردی عملی در جهت توسعه اقتصاد چرخشی و مدیریت پایدار پسماند شهری محسوب می‌شود.

### تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی برای اعلام ندارند.

دوم، هزینه و پیچیدگی فرآیند جداسازی و آماده‌سازی پسماند تر از جمله چالش‌های مهم این رویکرد محسوب می‌شود. اگرچه استفاده از پسماند به‌عنوان ماده اولیه، هزینه خرید خوراک را کاهش می‌دهد، اما مراحل تفکیک، حذف ناخالصی‌ها، کاهش رطوبت و استخراج چربی می‌تواند هزینه‌های عملیاتی و مصرف انرژی را افزایش دهد. این موضوع به‌ویژه در شهرهای بزرگ با حجم بالای پسماند، نیازمند طراحی بهینه خطوط پیش‌فرآوری و استفاده از فناوری‌های کم‌هزینه‌تر است.

سوم، مقیاس‌پذیری فرآیند از سطح نیمه‌صنعتی به مقیاس صنعتی یکی دیگر از محدودیت‌های این پژوهش است. آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی انجام شده‌اند و انتقال نتایج به مقیاس صنعتی ممکن است با چالش‌هایی نظیر افت راندمان واکنش، افزایش مصرف انرژی، دشواری کنترل دما و زمان واکنش، و مسائل مربوط به بازیافت متانول و مدیریت گلیسرول همراه باشد. بنابراین، انجام مطالعات پایلوت صنعتی و تحلیل‌های دقیق اقتصادی و زیست‌محیطی (مانند ارزیابی چرخه حیات) برای تأیید نهایی قابلیت اجرایی این فرآیند در مقیاس کلان ضروری است.

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که پسماند تر شهری تهران می‌تواند به‌عنوان منبعی ارزشمند و بالقوه مقرون‌به‌صرفه برای تولید بیودیزل مورد استفاده قرار گیرد. استخراج چربی از پسماند با استفاده از حلال نرمال‌هگزان انجام شد و چربی استخراج‌شده در فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون قلبیایی با استفاده از متانول و کاتالیست سدیم هیدروکسید ( $\text{NaOH}$ ) به بیودیزل

- perspective. *Journal of Environmental Science Studies*, 8(3), 6962. (in Persian)
- [10] Akhlaghi, N., Najafpour Darzi, G., 2022, A review on effective processes in biodiesel production using microalgae. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 21(122), 63. (in Persian)
- [11] ASTM, 2015, ASTM E1756-08: Standard test method for determination of total solids in biomass. ASTM International.
- [12] Ma, F., Hanna, M.A., 1999, Biodiesel production: A review. *Bioresource Technology*, 70(1), 1.
- [13] ASTM, 2020, ASTM D6751: Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels. ASTM International.
- [14] Rashid, U., Anwar, F., 2008, Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of rapeseed oil. *Fuel*, 87(3), 265.
- [15] Farouk, S.M., Tayeb, A.M., Abdel-Hamid, S.M.S., Osman, R.M., 2024, Recent advances in transesterification for sustainable biodiesel production, challenges, and prospects: A comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(9), 12722.
- [16] Elgharbawy, A.S., 2025, The technical and financial potential of producing biodiesel from low-quality feedstocks via an innovative glycerolysis treatment. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(1), 1359.
- [17] Erchamo, Y.S., Mamo, T.T., Workneh, G.A., Mekonnen, Y.S., 2021, Improved biodiesel production from waste cooking oil with mixed methanol-ethanol using enhanced eggshell-derived CaO nano-catalyst. *Scientific Reports*, 11, 6708.
- [18] Tsaoulidis, D., Garciadiego-Ortega, E., Angeli, P., 2023, Intensified biodiesel production from waste cooking oil and flow pattern evolution in small-scale reactors. *Frontiers in Chemical Engineering*, 5, 1144009
- [19] Atapour, M., Kariminia, H.R., Moslehabadi, P.M., 2014, Optimization of biodiesel production by alkali-catalyzed transesterification of used frying oil. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(2), 179.
- [1] Ebrahimi Toloun, S.A., Khoramnejdian, S., Zavareh, S.R.A., Behbahaninia, A., 2025, Assessment of landfill gases by LandGEM and energy recovery potential from municipal solid waste of Robat Karim. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15, 2857.
- [2] Atabani, A.E., Silitonga, A.S., Badruddin, I.A., Mahlia, T.M.I., Masjuki, H.H., Mekhilef, S., 2012, A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2070.
- [3] Ghobadian, B., Rahimi, H., Nikbakht, A.M., Najafi, G., Yusaf, T.F., 2009, Diesel engine performance and exhaust emission analysis using waste cooking biodiesel fuel with an artificial neural network. *Renewable Energy*, 34(4), 976.
- [4] Zaky, A.S., Wahid, R., Moirangthem, K., 2022, Biofuels: An overview. In: *Waste-to-energy: Recent developments and future perspectives towards circular economy*. Springer, pp. 85-144.
- [5] Bagherpoor, H., Ghobadian, B., Tavakoli Hashjin, T., Mohammadi, A., Feizolanejad, M., Zenoozi, A., 2010, Optimizing effective parameters in biodiesel fuel production using trans-esterification method. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 41(1), 37.
- [6] Igbax, S.I., Swartling, D., ElSawy, A., Idem, S., 2023, Impact of ultrasonic mixing on virgin and waste vegetable oils for biodiesel production. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1268172
- [7] Pasha, M.K., Dai, L., Liu, D., Du, W., Guo, M., 2024, A hybrid soft sensor framework for real-time biodiesel yield prediction: Integrating mechanistic models and machine learning algorithms. *Renewable Energy*, 237, 121888
- [8] Salimi, Z., Hosseini, S.A., 2020, Production and investigation of properties of biodiesel produced from used oil catalyzed by barium ferrite loading by potassium hydroxide. *Journal of Petroleum Research*, 30(3), 100. (in Persian)
- [9] Mortaza, M., Najafi, B., Faizollahzadeh Ardabili, S., 2023, Production of biodiesel with waste cooking oil from a life cycle assessment



**“Research article”**

**Assessment of pollution levels and sources of heavy metals in dried Kaftar Wetland sediments using quantitative and qualitative indices**

**Malihesadat Afzalizadeh<sup>1</sup>, Mozghan Ahmadi Nadoushan<sup>\*2</sup>, Ahmad Jalalian<sup>3</sup>, Atefeh Chamani<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Department of Environmental Sciences, Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

<sup>2</sup>Department of Environmental Sciences, Waste and Wastewater Research Center, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

<sup>3</sup>Department of Soil Science, Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

<sup>\*</sup>Corresponding Author: m.ahmadi@iau.ac.ir

(Received: 18 November 2025, Accepted: 6 January 2026)

**Abstract**

The Kaftar Wetland, covering approximately 5,600 km<sup>2</sup>, is located about 180 km north of Fars Province and has completely dried up. The present study evaluated the concentrations of selected heavy metals – cadmium, arsenic, cobalt, lead, chromium, nickel, zinc, and manganese – in sediments of the dried Kaftar Wetland, where wetland desiccation and upstream agricultural activities have contributed to the formation of critical dust and pollution hotspots. A systematic sampling method was used to determine sediment sampling locations. The wetland area was divided into 24 blocks, and one point in each block was randomly selected for sampling. Surface sediment samples were collected in spring and autumn 1400 (Iranian calendar) from a depth of 0 - 10 cm. Samples were transported to the laboratory in zip-lock bags and, after drying, digestion, and preparation, metal concentrations were measured using an Agilent MP-AES (Model 4100). Quality control was performed using control samples and reference standards to ensure analytical accuracy. Among the measured metals, cadmium showed the highest concentration (0.84 mg/kg), placing it in the strong to very strong contamination range at several stations, whereas other elements generally remained within lower contamination ranges across both seasons. The elevated cadmium levels were attributed primarily to upstream agricultural activities.

**Conflict of interest:** None declared.

**Keywords:** Heavy metals, Sediment, Kaftar wetland, Quality indicators, Cadmium



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

دوره ۲، شماره ۳، پیاپی ۷  
پاییز ۱۴۰۴، صفحات ۵۶-۴۵

«مقاله پژوهشی»

## ارزیابی آلودگی و منشأیابی فلزات سنگین در رسوبات تالاب خشک شده کافترا با استفاده از شاخص‌های کمی و کیفی

ملیحه سادات افضلی<sup>۱</sup>، مژگان احمدی ندوشن<sup>۲\*</sup>، احمد جلالیان<sup>۳</sup>، عاطفه چمنی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>گروه محیط زیست، دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

<sup>۲</sup>گروه محیط زیست، مرکز تحقیقات پسماند و پساب، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

<sup>۳</sup>گروه خاک، دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها، واحد اصفهان (خوراسگان)؛ دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

\*نویسنده مسئول مکاتبات: m.ahmadi@iau.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۱۰/۱۶)

### چکیده

تالاب کافترا با مساحت ۵۶۰۰ کیلومترمربع در ۱۸۰ کیلومتری شمال استان فارس واقع است و به طور کامل خشک شده است. پژوهش حاضر به ارزیابی غلظت فلزات سنگین کادمیوم، آرسنیک، کبالت، سرب، کروم، نیکل، روی و منگنز در رسوبات تالاب کافترا پرداخته که در اثر خشک شدن تالاب همراه با فعالیت‌های کشاورزی بالادست به ایجاد نقاط بحرانی گرد و غبار و آلودگی در این نواحی منجر شده است. از این رو برای جانمایی نقاط برداشت نمونه رسوب از روش نمونه‌برداری سیستماتیک استفاده شد. محدوده تالاب به ۲۴ بلوک تقسیم شد. سپس در هر بلوک یک نقطه با انتخاب تصادفی برای نمونه‌برداری مشخص شد. نمونه‌برداری سطحی خاک در فصل پاییز ۱۴۰۰، از عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری انجام شد. سپس نمونه‌ها در کیسه‌های زیپ کیف به آزمایشگاه منتقل شد و پس از خشک شدن، هضم و آماده‌سازی به وسیله دستگاه MP-AES برند AGILENT مدل ۴۱۰۰ برای فلزات شناسایی و غلظت آن‌ها اندازه‌گیری شد. کنترل کیفیت با استفاده از نمونه‌های شاهد و استانداردهای مرجع انجام شد تا دقت نتایج تضمین گردد. در بین فلزات سنگین کادمیوم، به مراتب غلظت بیش‌تری را در نمونه رسوب خاک (۰/۸۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) از خود نشان داد. این فلز را در برخی ایستگاه‌ها در محدوده آلودگی قوی یا بسیار قوی قرارداد؛ حال آنکه سایر عناصر عموماً در هر دو فصل در محدوده بدون آلودگی یا بدون آلودگی باقی ماندند. این مطالعه، افزایش آلاینده کادمیوم را به دلیل فعالیت‌های کشاورزی در بالادست تالاب مرتبط می‌داند.

**واژه‌های کلیدی:** فلزات سنگین، رسوب، تالاب کافترا، شاخص‌های کیفی، کادمیوم

## مقدمه

تالاب‌ها و دریاچه‌های موقت در مناطق خشک و نیمه‌خشک، در صورت خشک‌شدن، به یکی از مهم‌ترین منابع تولید گرد و غبار تبدیل می‌شوند. زمانی که یک تالاب خشک می‌شود، رسوب‌های باقی‌مانده در بستر آن که معمولاً شامل ذرات ریز و کم‌چگالی هستند، در معرض فرسایش بادی قرار می‌گیرند. این رسوبات، به دلیل اندازه کوچک و وزن سبک، به راحتی توسط باد جابه‌جا می‌شوند و به صورت گرد و غبار در محیط پراکنده می‌شوند (۱). در مقایسه با خاک‌های اراضی طبیعی، رسوب‌های تالاب‌های خشک‌شده حاوی ذرات ریزتری هستند که توانایی بیش‌تری برای تشکیل گرد و غبار دارند. علاوه بر این، این رسوبات اغلب شامل مواد شیمیایی و معدنی خاصی هستند که می‌توانند اثرات مخربی بر سلامت انسان و محیط زیست داشته باشند. تخریب پوشش گیاهی و خشک‌شدن تالاب‌ها هر دو به طور مستقیم و غیرمستقیم در تولید گرد و غبار نقش دارند، اما تفاوت‌هایی در نحوه تأثیرگذاری آن‌ها وجود دارد. تخریب پوشش گیاهی بیش‌تر به‌عنوان یک فرایند تدریجی و ناشی از فعالیت‌های انسانی مطرح است، درحالی‌که خشک‌شدن تالاب‌ها می‌تواند به سرعت و در اثر تغییرات اقلیمی یا مدیریت نادرست منابع آبی رخ دهد (۲). در عین حال، این دو عامل می‌توانند به طور هم‌زمان و متقابل عمل کنند. تخریب پوشش گیاهی در اطراف تالاب‌ها می‌تواند منجر به تشدید خشک‌شدن آن‌ها شود، زیرا پوشش گیاهی نقش مهمی در تنظیم چرخه آب و کاهش تبخیر دارد. از سوی دیگر، رسوب‌های ناشی از تالاب‌های خشک‌شده می‌توانند بر خاک‌های اطراف تأثیر منفی گذاشته و

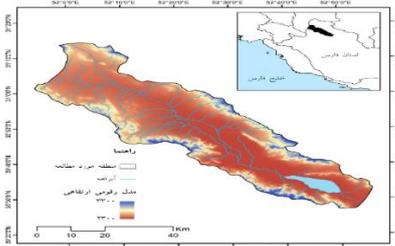
فرسایش بادی را در مناطق مجاور افزایش دهند. بر این اساس، تخریب پوشش گیاهی و رسوب‌های تالاب‌های خشک‌شده هر دو نقش برجسته‌ای در تولید گرد و غبار دارند، اما با مکانیزم‌های متفاوتی عمل می‌کنند. در حالی که پوشش گیاهی به‌عنوان یک سد طبیعی در برابر فرسایش بادی عمل می‌کند، تالاب‌های خشک‌شده به دلیل وجود رسوب‌های ریز و مستعد، مستقیماً به منابع گرد و غبار تبدیل می‌شوند (۳). فلزات سنگین شامل عناصری مانند سرب، کادمیوم و جیوه هستند که به دلیل تراکم بالای اتمی و پایداری شیمیایی، به‌سختی از محیط حذف می‌شوند. این فلزات معمولاً از طریق فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و حمل و نقل وارد خاک و رسوبات می‌شوند و با فرسایش بادی به گرد و غبار منتقل می‌شوند (۴). رسوبات و گرد و غبار آلوده به فلزات سنگین می‌توانند اثرات قابل توجهی بر سلامت انسان داشته باشند، زیرا این مواد از طریق استنشاق یا تماس پوستی وارد بدن می‌شوند. به‌طور کلی، تجمع فلزات سنگین در رسوبات بیش‌تر به دلیل رسوب‌گذاری تدریجی و خاصیت جذب بالای ذرات ریز رخ می‌دهد، در حالی‌که در گرد و غبار، انتقال و پراکندگی این فلزات سریع‌تر است و اثرات گسترده‌تری دارد (۵). در دنیا توجه به غلظت فلزات سنگین در خاک به دلیل خطرات بالقوه آنها برای محیط زیست و سلامت انسان افزایش یافته است (۶). فلزات سنگین به‌عنوان گروهی از آلاینده‌ها در نظر گرفته می‌شوند که به دلیل سمیت زیاد، تجزیه‌ناپذیری، تجمع زیستی و بزرگ‌نمایی زیستی، به‌ویژه در تمام محیط‌های ساحلی و دریایی، خطرات زیست‌محیطی قابل توجهی را به همراه دارند (۷). فلزات سنگین مانند سرب، روی، مس، کادمیوم،

آرسنیک و کروم به دلیل خاصیت سمی و تجمع زیستی، از جمله مهم‌ترین و جدی‌ترین عوامل آلودگی محیط‌زیست را تشکیل می‌دهند (۸). استفاده بیش از حد از فلزات سنگین می‌تواند منجر به مسمومیت‌های حاد و مزمن، از جمله آسیب به سیستم عصبی مرکزی، ترکیب خون، ریه، کلیه، کبد و حتی مرگ گردد (۹). این فلزات به دلیل غیرقابل تجزیه بودن و تأثیرات فیزیولوژیکی بر انسان و سایر موجودات زنده، حتی در غلظت‌های کم اهمیت قابل توجهی دارند (۱۰). کودکان نسبت به بزرگسالان، مقدار بیش‌تری از این فلزات را جذب می‌کنند. این باعث اختلال در رفتارهای متابولیکی آنها می‌شود (۱۱). توسعه گسترده فعالیت‌های انسانی و صنایع، مقادیر زیادی از آلاینده‌ها، شامل فلزات سنگین را وارد محیط زیست می‌کند (۱۲). فلزات سنگین از راه‌های مختلف وارد محیط زیست می‌شوند. این آلاینده‌ها به هوا، خاک و در نهایت اکوسیستم‌های آبی وارد می‌شوند (۱۳). و فور آلاینده‌ها، سمیت و پایداری آنها در اکوسیستم‌های آبی، توجه مجامع علمی جهانی را به خود جلب کرده است. فلزات سنگین موجود در اکوسیستم‌های آبی منشأ طبیعی و یا انسانی دارند. منشأ طبیعی آن از هوازدگی خاک‌ها و سنگ‌ها، فرسایش محیط، آتش‌سوزی اکوسیستم‌های طبیعی و فعالیت‌های آتشفشانی حاصل می‌شود (۱۴). منشأ انسانی نیز از تخلیه پساب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی و تخلیه مواد زائد کشاورزی و معدن‌کاوی و سایر فعالیت‌های انسانی حاصل می‌شود (۱۵). مطالعات متعدد انجام شده نشان از بالاتر بودن غلظت برخی از عناصر سنگین در رسوبات و در نتیجه موجودات محیط‌های

آبی داشته و این امر ناشی از انباشتگی این آلاینده‌ها در سیستم‌های اکولوژیکی در طول زمان دارد (۱۶). فلزات سنگین اثرات مستقیمی بر سیستم‌های حیاتی مختلف بدن دارند. سرب، یکی از شایع‌ترین فلزات سنگین، به‌ویژه در کودکان، اثرات مخربی بر سیستم عصبی دارد و منجر به کاهش ضریب هوشی، اختلالات یادگیری و مشکلات رفتاری می‌شود. در بزرگسالان، سرب، می‌تواند باعث افزایش فشارخون، آسیب به کلیه‌ها و اختلالات قلبی - عروقی شود. جیوه، عمدتاً سیستم عصبی را تحت‌تأثیر قرار داده، می‌تواند باعث لرزش، اختلالات حافظه و کاهش هماهنگی حرکتی شود. اثرات جیوه در زنان باردار خطرناک‌تر است، زیرا می‌تواند به جنین منتقل شده و موجب اختلالات رشد مغزی شود (۱۷). کادمیوم، به‌ویژه از طریق مصرف مواد غذایی آلوده، موجب آسیب‌های کلیوی، پوکی‌استخوان و افزایش خطر ابتلا به سرطان ریه می‌شود. آرسنیک نیز که معمولاً از طریق آب آشامیدنی آلوده وارد بدن می‌شود، می‌تواند باعث آسیب به پوست، سیستم گوارشی و افزایش خطر انواع مختلفی از سرطان‌ها، به‌ویژه سرطان مثانه و پوست، شود (۱۸).

آنجانا<sup>۷۶</sup> و همکارانش در مطالعه‌ای (۱۹) به بررسی وجود عناصر بالقوه سمی (PTEs) در رسوبات سطحی و آب تالاب آشتامودی، در ساحل جنوب غربی هند، می‌پردازد. شاخص‌های آلودگی و ریسک اکولوژیکی (مانند EF, CF, Jgeo, mCd, EI, RI, mHQ, TRI, PLI) خطرات و آلودگی اکولوژیکی متوسط تا قابل توجه را نشان می‌دهند. ارزیابی‌های ریسک سلامت، افزایش ریسک سرطان مرتبط با نیکل، کادمیوم، سرب

گونه‌های شاخص تالاب عبارت‌اند از: تنجه، چنگر معمولی، اردک سرخ‌پایی، خوتکا، اردک سرسبز، غاز خاکستری، عقاب دم‌سفید و انواع پرندگان کنار آبی است. اراضی حاشیه تالاب محل زمستان‌گذرانی جمعیت‌های درنا است. تالاب کافت‌ر در سال‌های اخیر به طور کامل خشک بود که با بارندگی ۵۸۰ میلی‌متری زمستان گذشته نزدیک به ۳۰٪ آن آبیگری شد (۲۰).



شکل (۱): حوضه آبخیز تالاب کافت‌ر

### نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل داده‌ها

#### - نمونه‌برداری رسوب

در این مطالعه برای بررسی غلظت فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه رسوب تالاب کافت‌ر از روش نمونه‌برداری سیستماتیک استفاده شد. برای این منظور محدوده تالاب با توجه به مساحت آن به ۲۴ بلوک تقسیم شد. سپس در هر بلوک یک نقطه برای نمونه‌برداری مشخص شد. در این نقاط، نمونه‌های سطحی در انتهای فصل پاییز از عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری سطح خاک برداشت شد. این روش باعث کاهش توزیع در انتخاب نقاط نمونه‌برداری شده، پوشش فضایی مناسبی از کل محدوده فراهم ساخت.

#### - آماده‌سازی نمونه‌ها جهت سنجش فلزات سنگین

برای محاسبه غلظت فلزات سنگین، نمونه‌های خاک در دمای محیط خشک شدند تا رطوبت آنها از بین برود. سپس نمونه‌ها به صورت پودری همگن درآمد و از الک با مش ۶۳ میکرون عبور داده شدند تا برای هضم اسیدی آماده شوند. برای هر نمونه،

و کروم را در مناطق با آلودگی بالا شناسایی می‌کند. این کار تغییرات فصلی، شاخص‌های ریسک پیشرفته، ارزیابی ریسک سلامت و تکنیک‌های اصلاح را که برای مدیریت پایدار حیاتی هستند، ادغام می‌کند. بنابراین، یافته‌ها خواستار استراتژی‌های اصلاحی هدفمند برای کاهش آلودگی فلزات سنگین و حفاظت از یکپارچگی اکولوژیکی و سلامت عمومی تالاب آشتامودی هستند.

در این پژوهش به ارزیابی غلظت فلزات سنگین کادمیوم، آرسنیک، کبالت، سرب، کروم، نیکل، روی و منگنز در رسوبات تالاب کافت‌ر پرداخته که در اثر خشک‌شدن تالاب همراه با فعالیت‌های کشاورزی بالادست به ایجاد نقاط بحرانی گرد و غبار و آلودگی در این نواحی منجر شده است.

### مواد و روش‌ها

#### - منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز کافت‌ر با مساحت ۵۶۰۰ کیلومتر مربع و با مختصات جغرافیایی از ۵۱ درجه و ۵۴ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۲۷،۲۲ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۱۴،۴۹ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی در استان فارس واقع شده است (شکل (۱)).

فعالیت‌های کشاورزی اصلی‌ترین فعالیت انسانی در منطقه مورد مطالعه است، حال آن‌که سکونت‌گاهی انسانی قابل توجهی در منطقه وجود نداشته و عمدتاً از مراکز کوچک روستایی تشکیل شده‌اند که بخش بزرگی از آن‌ها به دلیل خشک‌شدن تالاب کافت‌ر از منطقه مهاجرت کرده‌اند. منبع تأمین آب تالاب کافت‌ر، رودخانه شادکام با دبی متوسط ۱ مترمکعب و آهکی است. کیفیت آب دریاچه در پایان دوره بارندگی بهترین و در آغاز بارندگی نامناسب‌ترین است.

آلودگی بسیار شدید (اعداد بیش از ۵) مورد ارزیابی قرار می‌دهد (جدول (۱)) (۲۱).

$$I_{geo} = \text{Log}_2 \frac{c_n}{1.5B_n} - 1 \quad (۱)$$

جدول (۱): معیارهای طبقه‌بندی شاخص زمین‌انباشتگی

شدت آلودگی	محدوده تغییرات (Igeo)
آلودگی بسیار شدید	بیش‌تر از ۵
آلودگی شدید	بین ۴-۵
آلودگی زیاد	بین ۳-۴
آلودگی متوسط	بین ۲-۳
آلودگی کم	بین ۱-۲
فاقد آلودگی	کم‌تر از ۱-۰

#### - شاخص غنی‌شدگی

این فاکتور برای ارزیابی درجه آلودگی فلزات سنگین با نرمال‌سازی غلظت فلزات سنگین نسبت به یک عنصر مرجع (معمولاً عنصری که پایدار و به طور طبیعی فراوان است، مانند آهن یا آلومینیوم) استفاده می‌شود. این فاکتور به تفکیک سهم طبیعی و انسان‌ساخت فلزات سنگین پرداخته و به تعیین منابع احتمالی طبیعی یا انسانی غلظت‌های به‌دست‌آمده کمک می‌کند. برای محاسبه این شاخص از معادله (۲) استفاده می‌شود که در آن نسبت X مربوط به غلظت فلز اندازه‌گیری شده و C مربوط به غلظت عنصر مرجع مورد استفاده است. در این شاخص، اعداد کم‌تر از ۲ نشان‌دهنده محیط غیر آلوده است و اعداد بیش از ۵، نشان‌دهنده آلودگی بسیار شدید به فلزات سنگین به دلیل فعالیت‌های انسانی است (جدول (۲)) (۲۲).

$$EF = \frac{(c_n)_x}{(c_n)_c} \quad (۲)$$

جدول (۲): رده‌بندی مقادیر غنی‌شدگی

مقادیر شاخص غنی‌شدگی	شدت غنی‌شدگی
EF < 2	غناى حداقل
2 ≤ EF < 5	غناى متوسط
5 ≤ EF < 20	غناى قابل توجه
20 ≤ EF < 40	غناى شدید
EF ≤ 40	غناى بسیار شدید

حدود ۰/۵ گرم از خاک توزین شده و با مخلوطی از ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ، ۳ میلی‌لیتر اسید هیدروفلوریک و ۱ تا ۲ میلی‌لیتر اسید پرکلریک یا اسید کلریدریک ترکیب شد. سپس نمونه‌ها در رآکتور ماکروویو در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۰ بار قرار داده و به مدت ۶۰ دقیقه هضم گردید. پس از اتمام هضم، نمونه‌ها خنک شده و محلول از فیلتر عبور داده می‌شود تا ذرات جامد جدا شوند. سپس محلول فیلتر شده با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. در مرحله نهایی، فلزات سنگین موجود در محلول نمونه‌ها شامل کروم (Cr)، نیکل (Ni)، منگنز (Mn)، سرب (Pb)، روی (Zn)، کبالت (Co)، آرسنیک (As) و کادمیوم (Cd) با استفاده از دستگاه MP-AES برند AGILENT مدل ۴۱۰۰ شناسایی و غلظت آن‌ها را اندازه‌گیری شد. کنترل کیفیت نیز با استفاده از نمونه‌های شاهد و استانداردهای مرجع انجام شد تا دقت نتایج تضمین گردد.

#### - محاسبه شاخص‌های آلودگی

#### - شاخص زمین - شیمیایی مولر

شاخص زمین‌انباشت برای ارزیابی سطح آلودگی فلزات سنگین در رسوبات با مقایسه غلظت‌های فعلی با سطوح پیش‌صنعتی استفاده می‌شود. این شاخص با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود که در آن  $c_n$  غلظت اندازه‌گیری شده فلز در نمونه و  $B_n$  غلظت زمینه‌ای فلز است. در این رابطه، ضریب ۱/۵ برای در نظر گرفتن تغییرات احتمالی در مقادیر زمینه‌ای به علت عوامل طبیعی استفاده می‌شود. همچنین این شاخص، آلودگی رسوبات به عناصر سنگین را در ۷ کلاس، از رده کاملاً غیر آلوده (اعداد کم‌تر از صفر) تا

## - شاخص بار آلودگی

جدول (۳): طبقه بندی شاخص خطر		
رده	محدوده ریسک	شدت ریسک
۱	RI<150	خطر کم
۲	150≤RI<300	خطر متوسط
۳	300≤RI<600	خطر قابل توجه
۴	RI≤600	خطر بسیار زیاد

## بحث و نتیجه‌گیری

## - غلظت فلزات سنگین در رسوب

غلظت کروم در فصل بهار نسبت به پاییز افزایش چشمگیری نشان داد که این می‌تواند به عوامل محیطی مانند جهت و شدت باد، به‌علاوه فرایندهای بیولوژیکی فصلی که ممکن است آلاینده‌ها را جابه‌جا یا متمرکز کنند، ارتباط داشته باشد. این نتایج با یافته‌های (۲۴) هم‌راستا است که نشان داده‌اند تغییرات فصلی، از جمله بارش و الگوهای باد، تأثیر زیادی بر پراکندگی و غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های محیطی دارند.

غلظت نیکل در رسوبات بیش‌تر تحت تأثیر شرایط محیطی مانند بارش‌های فصلی قرار دارد که می‌تواند موجب شست‌وشوی فلزات از سطح خاک به سمت رسوبات شود. این پدیده که به «شست‌وشو» یا «آب‌شویی» معروف است، در مطالعات مختلفی از جمله (۲۵) گزارش شده است که در آن بارش به عنوان عامل کلیدی در انتقال فلزات سنگین از لایه‌های سطحی به لایه‌های عمیق‌تر خاک یا رسوب شناخته شده است.

کبالت بیش‌تر به‌عنوان یک فلز با منابع طبیعی ثابت، شناخته می‌شود که تغییرات آن کم‌تر به عوامل فصلی وابسته است. در این راستا، (۱۲) نیز نشان دادند که این فلز سنگین عموماً رفتار ژئوشیمیایی ثابتی دارد کم‌تر تحت تأثیر تغییرات فصلی قرار می‌گیرد.

این شاخص یک شاخص تجمعی از سطح کلی آلودگی فلزات سنگین در یک منطقه خاص است. این شاخص به‌عنوان میانگین هندسی عوامل آلودگی فلزات C برابر با نسبت غلظت فلز اندازه‌گیری شده ( $C_{metal}$ ) به غلظت طبیعی آن فلز در خاک ( $C_{background}$ ) محاسبه می‌شود (معادله (۳)). در این شاخص، اعداد کم‌تر از ۱، نشان‌دهنده عدم وجود آلودگی در منطقه است که با افزایش مقدار آن به‌شدت آلودگی اضافه می‌شود. اعداد بیش‌تر از ۳ در این شاخص نشان‌دهنده آلودگی بسیار شدید خاک است. شاخص بار آلودگی یک ارزیابی از وضعیت سمی بودن کلی نمونه است (۲۳).

$$PLI = (C_1 C_2 \dots C_n)^{1/n} \quad \text{معادله (۳)}$$

## - شاخص ریسک اکولوژیک

شاخص ارزیابی خطر اکولوژیکی فلزات سنگین در ابتدا به‌وسیله هاکنسون (۱۹۸۰) مطرح شد تا درجات آلودگی فلزات در خاک ارزیابی و حساسیت جوامع مختلف اکولوژیکی خاک نسبت به سمیت فلزات سنگین سنجیده شود. در این شاخص،  $E_r^i$  شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی است که از طریق غلظت اندازه‌گیری شده هر فلز نسبت به مقدار غلظت زمینه (طبیعی) آن به‌دست می‌آید. مقدار فاکتور سمیت (معادله (۴)) در تعیین این شاخص استفاده می‌شود و برای هر عنصر متفاوت است. مقادیر به دست آمده از این شاخص نیز مقادیر مثبت را شامل می‌شود که اعداد کم‌تر از ۱۵۰، خطر اکولوژیکی کم و اعداد بیش از ۶۰۰، خطر اکولوژیکی بالا و معنی‌دار را نشان می‌دهد (جدول (۳)).

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad \text{معادله (۴)}$$

- شاخص ژئوشیمیایی مولر  
بر اساس شاخص ژئوشیمیایی مولر (Igeo) در  
جداول (۴) و (۵)، تغییرات فصلی در مقادیر این  
شاخص برای عناصر مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

در فصل پاییز، مقادیر Igeo برای عناصر کروم، نیکل،  
و منگنز عمدتاً در محدوده «بدون آلودگی» یا «بدون  
آلودگی تا آلودگی متوسط» طبقه‌بندی شدند.

جدول (۴): نتایج ژئوشیمیایی مولر فلزات سنگین در نمونه‌های رسوب فصل پاییز

ایستگاه	Cd	As	Co	Zn	Pb	Mn	Ni	Cr
1	2.138	1.021	-1.565	0.334	0.080	-1.523	-1.808	-1.174
2	2.503	0.678	-1.312	0.547	0.553	-1.687	-0.760	-1.160
3	2.553	1.047	-0.866	0.557	0.661	-1.209	-0.783	-1.360
4	2.360	0.962	-0.784	0.362	0.117	-1.183	-0.885	-1.582
5	2.181	0.995	-0.793	0.608	0.505	-1.179	-1.215	-1.223
6	2.451	0.940	-0.923	0.553	0.364	-1.064	-1.121	-1.099
7	2.663	1.333	-0.808	0.556	0.351	-1.069	-0.920	-1.350
8	1.708	1.366	-1.254	0.281	0.344	-1.919	-1.008	-1.190
9	2.360	1.254	-1.008	-0.146	0.503	-0.887	-0.947	-1.174
10	2.263	0.563	-0.955	0.032	0.408	-1.662	-1.530	-1.297
11	2.379	0.516	-0.838	0.319	0.383	-1.502	-0.912	-0.971
12	2.222	0.915	-1.381	0.058	0.244	-1.167	-1.973	-1.663
13	2.360	1.256	-0.880	0.433	0.173	-1.447	-1.486	-1.461
14	1.900	0.872	-1.069	0.151	0.266	-1.267	-1.068	-0.954
15	1.926	0.497	-0.748	0.096	0.155	-1.378	-1.172	-1.452
16	2.024	1.086	-0.808	0.318	0.512	-1.376	-0.832	-1.528
17	2.397	0.937	-1.261	0.447	0.173	-1.061	-1.694	-1.634
18	2.243	1.115	-1.315	0.428	0.399	-1.901	-0.934	-1.132
19	1.766	1.118	-1.275	0.122	0.523	-1.861	-1.734	-1.377
20	2.047	1.211	-1.075	-0.219	0.336	-1.734	-0.846	-1.702
21	1.585	1.101	-1.743	0.366	0.484	-1.315	-1.057	-1.504
22	2.047	1.192	-0.968	0.398	0.132	-1.542	-1.650	-1.794
23	2.222	1.078	-1.258	0.482	0.269	-1.573	-1.813	-1.035
24	2.138	1.021	-1.565	0.334	0.080	-1.523	-1.808	-1.174

جدول (۵): نتایج ژئوشیمیایی مولر فلزات سنگین در نمونه‌های رسوب فصل بهار

ایستگاه	Cd	As	Co	Zn	Pb	Mn	Ni	Cr
1	2.541	1.047	-1.512	0.335	0.092	-1.522	-1.769	-1.171
2	2.821	0.756	-1.260	0.549	0.559	-1.686	-0.752	-1.156
3	2.859	1.108	-0.847	0.558	0.668	-1.208	-0.774	-1.356
4	2.638	0.995	-0.754	0.363	0.130	-1.182	-0.876	-1.579
5	2.627	1.030	-0.770	0.610	0.510	-1.178	-1.196	-1.218
6	2.773	1.004	-0.894	0.555	0.376	-1.064	-1.107	-1.096
7	2.952	1.374	-0.787	0.558	0.357	-1.068	-0.908	-1.345
8	2.283	1.395	-1.207	0.282	0.349	-1.919	-0.994	-1.188
9	2.555	1.287	-0.986	-0.142	0.510	-0.887	-0.932	-1.170
10	2.551	0.641	-0.929	0.035	0.416	-1.662	-1.505	-1.293
11	2.554	0.566	-0.818	0.321	0.391	-1.502	-0.903	-0.968
12	2.627	0.954	-1.353	0.060	0.254	-1.167	-1.943	-1.658
13	2.646	1.304	-0.841	0.434	0.181	-1.447	-1.454	-1.457
14	2.225	0.901	-1.021	0.152	0.271	-1.267	-1.052	-0.950
15	2.192	0.535	-0.722	0.098	0.168	-1.377	-1.159	-1.448
16	2.282	1.140	-0.779	0.320	0.522	-1.376	-0.821	-1.524
17	2.703	0.967	-1.215	0.448	0.183	-1.061	-1.673	-1.631
18	2.676	1.162	-1.265	0.429	0.405	-1.900	-0.917	-1.127
19	2.191	1.156	-1.222	0.125	0.530	-1.860	-1.716	-1.375
20	2.498	1.249	-1.032	-0.216	0.343	-1.733	-0.825	-1.697
21	2.114	1.133	-1.675	0.368	0.493	-1.314	-1.032	-1.499
22	2.449	1.222	-0.942	0.400	0.138	-1.541	-1.615	-1.790
23	2.523	1.132	-1.228	0.484	0.281	-1.573	-1.772	-1.030
24	2.601	1.076	-1.499	0.336	0.089	-1.523	-1.780	-1.170

## - فاکتور غنی‌شدگی EF

در فصل پاییز، مقادیر EF برای بیش‌تر عناصر در محدوده آلودگی «کم» یا «متوسط» قرار گرفتند. برای مثال، عناصر کروم، نیکل و منگنز در تمامی ایستگاه‌ها مقادیر کم‌تر از ۲ داشتند و در محدوده «کم» طبقه‌بندی شدند.

بررسی فاکتور غنی‌شدگی (EF) برای عناصر مختلف در دو فصل پاییز (جدول (۶)) و بهار (جدول (۷)) نشان‌دهنده تغییرات قابل توجهی در سطح غنی‌شدگی این عناصر در ایستگاه‌های مختلف است.

جدول (۶): نتایج شاخص غنی‌شدگی فلزات سنگین در نمونه‌های رسوب فصل پاییز

ایستگاه	Cr	Ni	Mn	Pb	Zn	Co	As	Cd
1	0.276	0.178	0.216	0.658	0.784	0.210	1.262	2.736
2	0.262	0.346	0.182	0.860	0.857	0.236	0.938	3.322
3	0.230	0.342	0.255	0.932	0.867	0.323	1.218	3.458
4	0.204	0.331	0.269	0.662	0.785	0.355	1.190	3.135
5	0.241	0.243	0.249	0.799	0.858	0.325	1.122	2.553
6	0.299	0.294	0.306	0.824	0.940	0.338	1.229	3.502
7	0.243	0.327	0.295	0.789	0.910	0.354	1.558	3.919
8	0.298	0.338	0.180	0.863	0.827	0.285	1.754	2.223
9	0.250	0.292	0.304	0.798	0.509	0.280	1.343	2.891
10	0.244	0.208	0.190	0.797	0.614	0.310	0.888	2.883
11	0.313	0.327	0.217	0.801	0.766	0.344	0.879	3.195
12	0.198	0.159	0.279	0.741	0.651	0.240	1.179	2.920
13	0.200	0.196	0.202	0.620	0.742	0.299	1.313	2.822
14	0.301	0.279	0.243	0.702	0.648	0.278	1.069	2.181
15	0.220	0.267	0.231	0.670	0.643	0.358	0.849	2.286
16	0.238	0.385	0.264	0.978	0.855	0.392	1.455	2.789
17	0.215	0.206	0.320	0.752	0.909	0.278	1.277	3.512
18	0.272	0.311	0.159	0.784	0.800	0.239	1.289	2.816
19	0.232	0.181	0.166	0.867	0.657	0.249	1.309	2.051
20	0.220	0.398	0.215	0.903	0.615	0.340	1.657	2.958
21	0.240	0.327	0.273	0.951	0.876	0.203	1.458	2.040
22	0.173	0.191	0.206	0.657	0.790	0.307	1.370	2.478
23	0.277	0.161	0.190	0.683	0.792	0.237	1.196	2.645
24	0.276	0.178	0.216	0.658	0.784	0.210	1.262	2.736

جدول (۷): نتایج شاخص غنی‌شدگی فلزات سنگین در نمونه‌های رسوب فصل بهار

ایستگاه	Cr	Ni	Mn	Pb	Zn	Co	As	Cd
1	0.276	0.182	0.216	0.663	0.785	0.218	1.285	3.618
2	0.263	0.348	0.182	0.864	0.858	0.245	0.990	4.144
3	0.230	0.345	0.255	0.937	0.868	0.328	1.270	4.275
4	0.204	0.333	0.269	0.668	0.786	0.362	1.217	3.802
5	0.242	0.246	0.249	0.802	0.859	0.330	1.150	3.480
6	0.300	0.298	0.307	0.831	0.941	0.345	1.285	4.379
7	0.244	0.330	0.295	0.793	0.911	0.359	1.603	4.789
8	0.299	0.342	0.180	0.867	0.827	0.295	1.789	3.311
9	0.250	0.295	0.305	0.802	0.510	0.284	1.374	3.311
10	0.245	0.212	0.190	0.801	0.615	0.315	0.936	3.520
11	0.314	0.329	0.217	0.806	0.768	0.349	0.910	3.608
12	0.198	0.163	0.279	0.746	0.652	0.245	1.212	3.863
13	0.200	0.201	0.202	0.623	0.743	0.307	1.357	3.440
14	0.302	0.282	0.243	0.705	0.649	0.288	1.091	2.732
15	0.220	0.269	0.232	0.676	0.644	0.365	0.871	2.748
16	0.238	0.388	0.264	0.985	0.856	0.400	1.511	3.335
17	0.215	0.209	0.320	0.757	0.910	0.287	1.303	4.343
18	0.272	0.315	0.159	0.788	0.801	0.247	1.331	3.803
19	0.233	0.184	0.166	0.871	0.658	0.259	1.344	2.754
20	0.221	0.404	0.215	0.908	0.616	0.350	1.701	4.043
21	0.241	0.332	0.273	0.957	0.878	0.213	1.492	2.943
22	0.173	0.196	0.206	0.660	0.791	0.312	1.399	3.273
23	0.277	0.166	0.191	0.689	0.792	0.242	1.242	3.257
24	0.276	0.181	0.216	0.661	0.785	0.220	1.311	3.773

## - شاخص‌های PLI و RI

مقدار PLI برابر با ۱/۱۸۲ در ایستگاه ۱۲ و بیش‌ترین مقدار آن ۱/۶۰۱ در ایستگاه ۷ ثبت شد. ایستگاه‌های دارای مقادیر بالاتر، مانند ایستگاه ۷، نشان‌دهندهٔ تجمع بالاتر آلودگی بوده و ممکن است به دلیل مجاورت با منابع آلاینده یا فعالیت‌های انسانی بیش‌تر باشد.

تحلیل شاخص‌های PLI و RI برای فصل‌های پاییز و بهار (جدول ۸) نیز نشان‌دهندهٔ تغییرات فصلی در سطح آلودگی کلی و خطر عناصر مورد بررسی است. در فصل پاییز، مقادیر شاخص PLI در اکثر ایستگاه‌ها در محدودهٔ «متوسط» (۱-۲) قرار داشتند. کم‌ترین

جدول (۸): نتایج شاخص بار آلودگی و ریسک اکولوژیک در نمونه‌های رسوب فصل پاییز و بهار

ایستگاه	پاییز		بهار	
	RI	PLI	RI	PLI
1	244.79	1.208	309.38	1.266
2	301.45	1.419	366.01	1.478
3	319.36	1.580	383.20	1.637
4	280.36	1.420	330.37	1.466
5	256.32	1.484	331.30	1.555
6	296.15	1.513	359.27	1.573
7	344.69	1.601	409.16	1.655
8	205.59	1.298	278.55	1.376
9	288.52	1.494	323.04	1.531
10	257.82	1.242	306.91	1.289
11	277.34	1.421	308.48	1.454
12	255.13	1.182	323.95	1.237
13	285.70	1.369	337.71	1.420
14	215.45	1.355	258.64	1.407
15	211.59	1.253	246.90	1.293
16	237.52	1.424	274.79	1.470
17	283.36	1.295	340.25	1.343
18	266.12	1.364	342.03	1.432
19	204.89	1.185	258.39	1.243
20	240.58	1.263	309.99	1.327
21	187.09	1.252	247.83	1.327
22	238.08	1.241	298.63	1.297
23	260.04	1.303	310.12	1.354
24	244.79	1.208	321.20	1.276

## نتیجه‌گیری

شاخص‌های آلودگی محاسبه شده نشان دادند که کادمیوم به‌عنوان مهم‌ترین تهدید اکولوژیکی در منطقه، ناشی از استفاده از کودهای فسفاتی و شیوه‌های آبیاری سنتی، در بسیاری از ایستگاه‌ها در طبقهٔ «آلودگی متوسط تا شدید» قرار دارد. مقادیر بالای شاخص غنی‌شدگی و شاخص ریسک اکولوژیکی برای کادمیوم به‌وضوح نشان می‌دهد که این عنصر بیش‌ترین سهم را در تهدیدات زیست‌محیطی منطقه ایفا می‌کند.

بر اساس این نتایج، می‌توان نتیجه گرفت که الگوهای آلودگی در منطقه، تحت تأثیر عوامل طبیعی

و انسانی متعددی قرار دارند. فرایندهای طبیعی مانند وزش باد، توپوگرافی محلی و ساختار خاک در کنار فعالیت‌های انسانی شامل کشاورزی فصلی و استفاده از کودهای شیمیایی، مهم‌ترین محرک‌های آلودگی هستند. این مطالعه اهمیت مدیریت پایدار منابع طبیعی و کشاورزی را برای کاهش اثرات آلودگی در این مناطق برجسته می‌کند. اقداماتی مانند تثبیت خاک، کنترل روان‌آب‌های آلوده و کاهش استفاده از مواد شیمیایی در کشاورزی می‌توانند به کاهش بار آلودگی کمک کنند. علاوه بر این، طراحی و اجرای سیاست‌های حفاظتی و احیای تالاب‌های خشک‌شده،

- [8] Javid, A., Nasiri, A., Mahdizadeh, H., Momtaz, S.M., Azizian, M., Javid, N., 2021, Determination and risk assessment of heavy metals in air dust fall particles. *Environmental Health Engineering And Management Journal*, 8(4), 319.
- [9] Ali, M.U., Yu, Y., Yousaf, B., Munir, M.A.M., Ullah, S., Zheng, C., Kuang, X., Wong, M.H., 2021, Health impacts of indoor air pollution from household solid fuel on children and women. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 126127.
- [10] Bai, B., Bai, F., Sun, C., Nie, Q., Sun, S., 2023, Adsorption mechanism of shell powders on heavy metal ions  $Pb^{2+}/Cd^{2+}$  and the purification efficiency for contaminated soils. *Frontiers in Earth Science*, 10, 1071228.
- [11] Bist, P., Choudhary, S., 2022, Impact of heavy metal toxicity on the gut microbiota and its relationship with metabolites and future probiotics strategy: A review. *Biological Trace Element Research*, 200(12), 5328.
- [12] Yang, T., Wang, Y., Wu, Y., Zhai, J., Cong, L., Yan, G., Zhang, Z., Li, C., 2020, Effect of the wetland environment on particulate matter and dry deposition. *Environmental Technology*, 41(8), 1054.
- [13] Aazami, J., Taban, P., 2018, Monitoring of heavy metals in water, sediment and phragmites australis of Aras River along the Iranian-Armenian border. *Iranian Journal of Toxicology*, 12(2), 1.
- [14] Yang, X., Duan, J., Wang, L., Li, W., Guan, J., Beecham, S., Mulcahy, D., 2015, Heavy metal pollution and health risk assessment in the Wei River in China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(3), 111.
- [15] Shang, Z., Ren, J., Tao, L., Wang, X., 2015, Assessment of heavy metals in surface sediment and section of Yellow River, China. *Environmental Monitoring Assessment*, 187(3), 79.
- [16] Mohammadi Galangash, M., Koopi, M., Bani, A., 2019, Heavy metal accumulation capability in the shells of *Cerastoderma lamarcki* in the south west coast of the Caspian sea; Guilan province, *Journal of Animal Research*, 32(2), 135. (in Persian)
- [17] Kumar, M., Mishra, G.V., 2024, Causes and impacts of water pollution on various water bodies in the state of Rajasthan, India: A

می‌تواند نقش مهمی در بهبود شرایط زیست‌محیطی منطقه ایفا کند.

### تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی برای اعلام ندارند.

### منابع

- [1] Papi, R., Attarchi, S., Darvishi-Bolorani, A., Neysani-Samany, N., 2022, Characterization of hydrologic sand and dust storm sources in the Middle East. *Sustainability*, 14(22), 15352.
- [2] Luo, H., Wang, Q., Guan, Q., Ma, Y., Ni, F., Yang, E., Zhang, J., 2022, Heavy metal pollution levels, source apportionment and risk assessment in dust storms in key cities in Northwest China. *Journal of Hazardous Materials*, 422, 126878.
- [3] Rana, A., Kobayashi, T., Ralph, T.J., 2021, Planktonic metabolism and microbial carbon substrate utilization in response to inundation in semi-arid floodplain wetlands. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(4), e2019JG005571.
- [4] Sandeep, P., Reddy, G.P., Jegankumar, R., Arun Kumar, K.C., 2021, Monitoring of agricultural drought in semi-arid ecosystem of Peninsular India through indices derived from time-series CHIRPS and MODIS datasets. *Ecological indicators*, 121, 107033.
- [5] Chu, H., Liu, Y., Xu, N., Xu, J., 2023, Concentration, sources, influencing factors and hazards of heavy metals in indoor and outdoor dust: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(2), 1203.
- [6] Shahabazi, K., Fathi-Gerdelidani, A., Marzi, M., 2022, Investigation of the status of heavy metals in soils of Iran: A comprehensive and critical review of reported studies. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(5), 1163. (in Persian)
- [7] Ji, Z., Zhang, Y., Zhang, H., Huang, C., Pei, Y., 2019, Fraction spatial distributions and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Baiyangdian Lake. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174, 417.

- review. *Environment and Ecology*, 42(2A), 645.
- [18] Tiwari, M., Singh, B.P., Khichi, P., Kumari, S., Gupta, J., Jain, P., Masih, J., 2024, Long-term analysis of BTEX concentrations and health risks in semi-arid urban regions. *Discover Public Health*, 21, 147.
- [19] Anjana, K.R., Suresh, A., Soman, V., Rahman K, H., 2025, Metal contamination in the Ashtamudi Wetland ecosystem: Source identification , toxicological risk assessment of Ni, Cd,Cr and Pb and remediation strategies. *Marine Pollution Bulletin*, 212, 117534.
- [20] Taghvaei, M., Kiumarsi, H., 2014, Application of the analytical hierarchy process and GIS in optimal site selection for coastal tourist towns: A case study of Kaftar lake beach. *Geographical Research on Desert Areas*, 3(2), 215.
- [21] Huang, S.H., Yang, Y., Yuan, C.Y., Li, Q., Ouyang, K., Wang, B., Wang, Z.X., 2017, Pollution evaluation of heavy metals in soil near smelting area by index of geoaccumulation (Igeo). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 52, 012095.
- [22] Buat-Ménard, P., Chesselet, R., 1979, Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter. *Earth and Planetary Science Letters*, 42(3), 399.
- [23] Joksimović, D., Perošević, A., Castelli, A., Pestorić, B., Šuković, D., Đurović, D., 2020, Assessment of heavy metal pollution in surface sediments of the Montenegrin coast: A 10-year review. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 2598.
- [24] da Silva, M.V., Pandorfi, H., Jardim, A.M.D.R.F., Oliveira-Júnior, J.F.D., Divincula, J.S.D., Giongo, P.R., da Silva, T.G.F., de Almeida, G.L.P., Moura, G.B.D.A., Lopes, P.M.O., 2021, Spatial modeling of rainfall patterns and groundwater on the coast of northeastern Brazil. *Urban Climate*, 38, 100911.
- [25] Chang, X., Li, Y. 2020, Lead distribution in urban street dust and the relationship with mining, gross domestic product GDP and transportation and health risk assessment. *Environmental Pollution*, 262, 114307.

“Research article”

## A legal framework for combating climate change in Iran: Commitments to sustainable development and pollution reduction

Shabab Jahanbin<sup>1</sup>, Ali Faghih Habibi<sup>2,\*</sup>, Ali Mohammadi<sup>1</sup>, Shirin Shirazian<sup>1</sup>, Hadi Kiadliri<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Management, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Department of Law, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Department of Environmental and Forest Sciences, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

\*Corresponding author: a\_faghih@azad.ac.ir

(Received: 1 November 2025, Accepted: 21 November 2025)

### Abstract

The failure of the UN’s series of international climate change conferences has contributed to increasing violations of societies’ fundamental rights to a sustainable climate in various parts of the world, particularly in developing countries. Iran has also been affected by the adverse consequences of climate change, due in part to the ineffectiveness of the international legal system and insufficient attention within the domestic legal system. Accordingly, this study aims to develop a legal pattern for combating climate change in Iran, with a view to reducing environmental pollution and advancing sustainable development. The research is organized into three operational phases and employs a Likert-scale instrument and the Analytic Hierarchy Process (AHP) model. The most significant climate-change-related impacts that undermine public rights in Iran include declining livelihoods, the recurrence of regional dust storms, and weakening production and economic cycles due to reduced industrial access to energy resources. Among the most important mechanisms for addressing climate change in Iran are the development and strengthening of incentive-based guidelines by the Ministry of Energy for the injection of green energy, as well as the allocation of financial resources for the revitalization and effective implementation of the Clean Air Law. Finally, in view of the extensive scope of the impacts of climate change, this study emphasizes that the realization of the aforementioned mechanisms requires the adoption of two fundamental strategies: first, strengthening regulatory frameworks and enforcement mechanisms within the domestic legal system in response to climate change; and second, the establishment and institutionalization of a joint regional climate organization.

**Conflict of interest:** None declared.

**Keywords:** Climate change, Environmental rights, Environmental pollution, Right to climate sustainability, Sustainable development



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

دوره ۲، شماره ۳، پایب ۷  
پایب ۱۴۰۴، صفحات ۷۲-۵۷

«مقاله پژوهشی»

## الگوی حقوقی مقابله با تغییرات اقلیمی ایران: التزامی بر اکتساب توسعه پایدار و کاهش آلودگی‌ها

شباب جهانین<sup>۱</sup>، علی فقیه حبیبی<sup>۲\*</sup>، علی محمدی<sup>۳</sup>، شیرین شیرازیان<sup>۴</sup>، هادی کیادلیری<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup>دکتری حقوق محیط زیست، گروه مدیریت محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۲</sup>استاد گروه حقوق، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۳</sup>استادیار گروه مدیریت محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۴</sup>دانشیار گروه علوم محیط زیست و جنگل، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\*نویسنده مسئول مکاتبات: a\_faghih@azad.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰)

### چکیده

عدم توفیق سلسله نشست‌های بین‌المللی تغییرات اقلیمی سازمان ملل متحد، موجبات افزایش تضييع حقوق بنیادین جوامع در حق برخورداری از اقلیم پایدار در نقاط مختلف سیاره، بالخصوص کشورهای در حال توسعه شده است. پهنه سرزمینی ایران نیز به واسطه ناکارآمدی نظام حقوق بین‌الملل و کم‌توجهی نظام حقوق داخلی در مواجهه با تغییرات اقلیمی، متأثر از پیامدهای ناگوار آن شده است. از همین منظر، این مطالعه با هدف تکوین الگوی حقوقی مقابله با تغییرات اقلیمی ایران برای غلبه بر آلودگی‌های زیست‌محیطی و اکتساب توسعه پایدار به انجام رسیده است. سازماندهی این تحقیق برای دستیابی به نتایج متعالی شده، متشکل از سه فاز عملیاتی تحقیقاتی و بهره‌برداری از طیف لیکرت و مدل تحلیلی سلسله مراتبی (AHP) می‌باشد. مهم‌ترین پیامدهای تضييع‌کننده حقوق عمومی جامعه ایران متأثر از تغییرات اقلیمی، تقلیل معیشتی جامعه، تکرر وقوع طوفان‌های گرد و غبار منطقه‌ای و تضعیف چرخه‌های تولید و اقتصاد کشور به واسطه کاهش دسترسی صنایع به منابع انرژی می‌باشند. از مهم‌ترین سازوکارهای مقابله با تغییرات اقلیمی در ایران می‌توان به تدوین و تقویت شیوه‌نامه‌های تشویقی وزارت نیرو در زمینه تزریق انرژی سبز و نیز تخصیص منابع مالی برای بازآفرینی و اجرای مؤثر قانون هوای پاک اشاره کرد. در نهایت، با توجه به گستردگی دامنه پیامدهای تغییرات اقلیمی، این مطالعه تأکید می‌کند که تحقق سازوکارهای یادشده مستلزم بهره‌گیری از دو راهبرد اساسی است: نخست، تقویت ضوابط و ضمانت‌های اجرایی نظام حقوق داخلی در مواجهه با تغییرات اقلیمی و دوم، ایجاد و نهادینه‌سازی یک سازمان اقلیمی مشترک در سطح منطقه‌ای.

**واژه‌های کلیدی:** تغییرات اقلیمی، حقوق محیط زیست، آلودگی‌های محیط زیست، حق بر پایداری اقلیمی، توسعه پایدار

## مقدمه

## - نشست‌های بین‌المللی تغییرات اقلیمی و تزییع حقوق

## عمومی کشورهای در حال توسعه و ایران

از مهم‌ترین نشست‌های بین‌المللی می‌توان به بیست‌وهفتمین کنفرانس اعضاء یا COP27 اشاره نمود، که در سال ۲۰۲۲ در شهر شرم‌الشیخ کشور مصر به انجام رسید. این کنفرانس با تأکید بر تأسیس صندوق ضرر و زیان، نقش مهمی در نهادینه‌سازی عدالت اقلیمی ایفا کرد. در ادامه بیست‌وهفتمین کنفرانس اعضاء یا COP28 در شهر دبی کشور امارات برگزار شد. این کنفرانس نقطه عطفی در اتصال عدالت اقلیمی با حقوق بشر بود. از بیانیه‌های این کنفرانس، تحقق اقلیم پایدار در معیت بهره‌برداری از حقوق بشر بود. علاوه بر آن، این کنفرانس در اهتمام به اهمیت پایداری برای مقابله با تغییرات آب و هوایی، تمرکززایی بر شناسایی فرصت‌هایی برای ایجاد جوامع و شهرهای سالم‌تر و پایدارتر را به عنوان یک ضرورت حایز اهمیت مطرح کرد (۱). کنفرانس بعدی، یعنی COP29 که در سال ۲۰۲۴ در شهر باکوی جمهوری آذربایجان برگزار شد، بر تأمین مالی و رعایت حقوق بشر به عنوان الزامات دستیابی به اقلیم پایدار و تحقق عدالت اقلیمی تأکید کرد. اهتمام بر مقوله عدالت، از طریق توزیع عادلانه منابع، مصرف پایدار و توازن در عوامل زیست-محیطی مشخص می‌شود، از همین منظر برای ارتقای عدالت اجتماعی، تقویت رشد اقتصادی پایدار و دستیابی به اهداف زیست‌محیطی از اهمیت قابل توجهی در اکتساب به آینده پایدار<sup>۴</sup> برخوردار می‌باشد (۲). همه این تلاش‌ها در حالی است که در دهه حاضر، تشدید پیامدهای تغییرات اقلیمی و وقوع

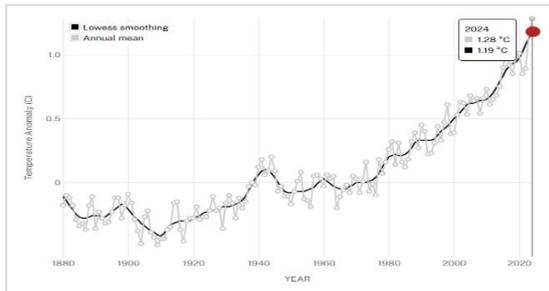
در عصر کنونی تلفات و خسارات ناشی از تشدید رویدادهای ناگوار تغییرات آب و هوایی، اهتمام روزافزونی را به خود جلب کرده است. سازمان ملل متحد در سطح بین‌الملل به عنوان یکی از بازیگران اصلی حقوق بین‌الملل در پدیده مقابله با تغییرات آب و هوایی می‌باشد. با هدایت سازمان ملل متحد و با هدف افزایش حساسیت نسبت به پدیده تغییر اقلیم و ضرورت مقابله با آن، از سال ۱۹۸۸ اقداماتی آغاز شد که در همین راستا، کنفرانس تغییر جو زمین با مشارکت ۴۶ کشور در شهر تورنتوی کانادا برگزار گردید و طی آن بر لزوم ایجاد چارچوبی معاهده‌ای برای مقابله با تغییرات آب و هوایی تأکید شد. این بدین معنی است، که تغییرات آب و هوایی از مسائل حایز اهمیت در قرن بیست‌ویکم محسوب می‌شود، که اهتمام کشورها و سازمان‌های بین‌المللی را به خود جلب کرد، و پایه‌ای برای حق داشتن آب و هوای پایدار<sup>۱</sup> را ایجاد نمود. از این رو، تمامی کشورها به صورت جمعی متعهد شدند در چارچوب معاهده تغییرات آب‌وهوایی به بررسی، مدیریت و مقابله با تغییرات اقلیم و پیامدهای آن پردازند. در حوزه حقوق بین‌الملل، کنوانسیون تغییرات آب و هوایی را می‌توان نقطه عطفی در معاهدات بین‌المللی در مقابله با تغییرات اقلیمی احتساب نمود. این کنوانسیون، منشأ تدوین و آغاز به کار سلسله نشست‌ها و تعهدات بین‌المللی دامنه‌داری شد، که بر پایه رویکردهای توسعه پایدار<sup>۲</sup> و حقوق بشری<sup>۳</sup> نهادینه‌سازی شدند.

<sup>4</sup> Sustainable future

<sup>1</sup> Right to Climate sustainability

<sup>2</sup> Sustainable development

<sup>3</sup> Human rights



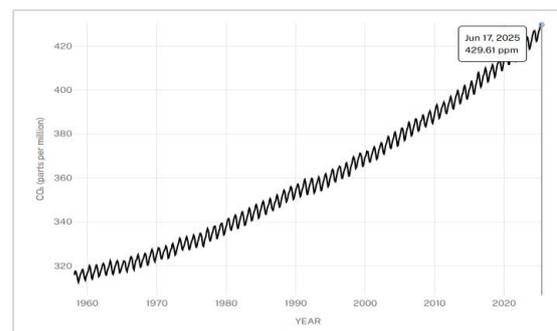
شکل (۲): روند تشدید گرمایش جهانی منتهی شده به سال ۲۰۲۴

تصدیق افزایش ناپایداری اقلیم در گزارش سازمان‌های بین‌المللی، مؤید عدم توفیق معاهده تغییرات آب و هوایی و نشست‌های بین‌المللی می‌باشد. از همین منظر می‌توان تقریر نمود، در شرایط کنونی، بحران تغییرات اقلیمی و سایر اشکال دگرگونی‌های بی‌سابقه جهانی نظیر وقوع جنگ و بهره‌کشی‌های نابخردانه از منابع طبیعی از سوی طرف‌های حاکمیت‌های متخاصم، موجبات افزایش بی‌ثباتی در حوزه‌های اقتصاد، منابع طبیعی و منابع انرژی در جامعه بین‌الملل شده است (۷). به‌طور کلی، ناکامی توافق‌نامه‌های بین‌المللی در خصوص تغییرات آب‌وهوایی موجب تشدید تضييع حق برخورداری از اقلیم پایدار برای دستیابی به اجتماع پایدار، اقتصاد چرخشی و پایدار و محیط زیست سالم در کشورهای در حال توسعه، از جمله ایران، شده است.

#### - بحران تغییرات آب و هوایی و تشدید ناپایداری اقلیمی در ایران

پهنه سرزمینی ایران به واسطه موقعیت خاص ویژگی‌های توپوگرافیک آن، از بارش و آب و هوای متفاوتی برخوردار است و میزان بارش متوسط سالانه آن، حدود یک سوم متوسط بارش سیاره می‌باشد، به

ناپایداری اکوسیستم‌های کره زمین، موجبات بروز چالش‌های بین‌المللی گسترده‌ای برای جامعه جهانی شده است (۳). مسئله گرم شدن اقلیم با توجه به مشاهدات افزایش میانگین دمای هوا، ذوب شدن برف و یخ‌ها و نیز افزایش میانگین سطح دریاها کاملاً روشن است. تحقیقات دانشکده حقوق و علوم اجتماعی دانشگاه بانگور بریتانیا در سال ۲۰۲۴ مشخص نمود، کنوانسیون چارچوب تغییر اقلیم از اثرات مخرب انتشار گازهای گلخانه‌ای بر مؤلفه‌های حیات در کره زمین جلوگیری نمی‌کند (۴). گزارش سازمان‌های بین‌المللی در بررسی شاخص‌های محیط زیست، اختلال در بوم‌سازگان‌های بزرگ کره زمین را تصدیق می‌نماید. از همین منظر مطابق یافته‌های رصدخانه ماونا لوا<sup>۱</sup> در شکل (۱) تشدید انتشار دی‌اکسید کربن در جو منتهی به سال ۲۰۲۵ قابل ملاحظه می‌باشد (۵). همچنین، مطابق یافته‌های مؤسسه مطالعات فضایی گودارد ناسا<sup>۲</sup> در سال ۲۰۲۵، روند افزایش گرمایش جهانی منتهی به سال ۲۰۲۴ مطابق با شکل (۲)، تشدید شده است که بیانگر بی‌ثباتی دمایی در جو می‌باشد (۶).



شکل (۱): روند تشدید انتشار گاز دی‌اکسید کربن در جو منتهی شده به سال ۲۰۲۵

<sup>1</sup> Mauna Loa Observatory

<sup>2</sup> NASA's Goddard Institute for Space Studies

بحران تغییرات اقلیمی به واسطه تشدید انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش ناپایداری اقلیمی در کشور ایران را به دو دسته کلی می‌توان تقسیم‌بندی نمود. دسته اول، چالش‌ها و آسیب‌های زیست‌محیطی نظیر خشک‌سالی و وقوع طوفان‌های مخرب می‌باشد، که ایران نیز همچون سایر کشورها در معرض آن قرار خواهد گرفت. دوم، وقوع آسیب‌های احتمالی اقتصادی و اجتماعی ناشی از تغییرات اقلیمی است، که تزییع حقوق عمومی جامعه را به همراه خواهد داشت.

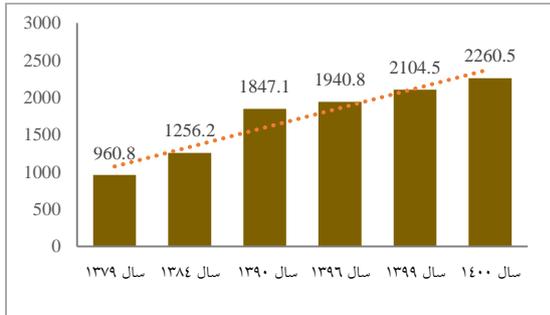
در همین راستا این مطالعه، تمرکزایی بر تکوین الگوهای حقوقی بومی‌سازی شده را به عنوان یک هدف متعالی شده، رافع چالش‌های فوق و لزوم اکتساب به توسعه پایدار اعلان می‌نماید. در راستای دستیابی به نتایج متعالی شده تحقیق، سه سؤال زیر مطرح خواهد شد: الف) بارزترین پیامدهای تغییرات آب و هوایی ایران کدامند؟ ب) مؤثرترین سازوکارها و الگوی حقوقی مقابله با تغییرات آب و هوایی ایران در اکتساب به پایداری اقلیمی چیست؟ ج) مشخصه الگوی حقوقی مقابله با تغییرات آب و هوایی ایران در تسهیل فرایند اجرایی سازوکارها چه خواهد بود؟

از همین منظر می‌توان تشریح کرد، با این فرض که پیامدهای تغییرات اقلیمی در حال حاضر یکی از مهم‌ترین تهدیدها در اکتساب به پایداری محسوب می‌شود. تحقق حق بر پایداری اقلیمی باید شامل ادعایی بر تثبیت میزان افزایش دمای جو پایین‌تر از میزان ناپایدار دو درجه سانتی‌گراد و پیشگیری از تزییع حقوق عمومی جامعه باشد. بدین معنی که برای اکتساب به پایداری مبتنی بر رویکرد کاهش گازهای گلخانه‌ای و سازگاری با پیامدهای تغییرات آب و

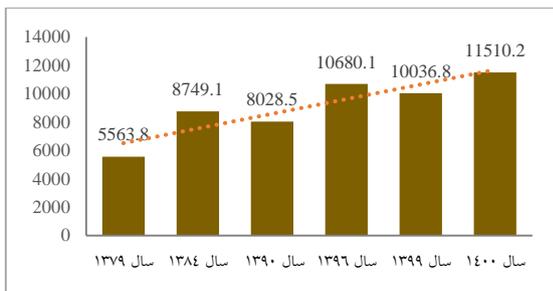
همین دلیل قسمت اعظم ایران در قلمرو اقلیمی، خشک جهان مستقر شده است. از همین منظر، تأثیرپذیری از پیامدهای بحران تغییرات اقلیمی برای منطقه ایران قابل توجه می‌باشد. از طرفی، عدم توفیق نظام حقوق بین‌الملل در مواجهه با بحران، سبب شده است که پیامدهای بحران، تأثیری نابرابر بر جوامع در سراسر جهان داشته باشد و بر کشورهای در حال توسعه که سهم کم‌تری در انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای داشته‌اند، بیش‌تر از کشورهای جهان اول و جوامع ثروتمند تأثیر گذاشته شود (۸).

در خصوص حوزه قوانین و مقررات محیط زیست در نظام حقوق داخلی ایران، در مواجهه با آلودگی‌های زیست‌محیطی و بحران تغییرات اقلیمی، به صورت کلی می‌توان تقریر نمود، که در کشور ایران مقررات جزیره‌ای و پراکنده بسیاری در زمینه حفظ محیط زیست به تصویب رسیده است. رویکرد اصلی قوانین و مقررات برای حفاظت از چند حوزه مشخص محیط زیست و اعمال مجازات‌های ملایم می‌باشد. همچنین یک رویکرد کلی نگرانه و پیشگیرانه نسبت به مدیریت محیط زیست نگاشته شده است. اگرچه موقعیت حاکمیتی سازمان حفاظت محیط زیست در ایران به عنوان معاونت رئیس‌جمهور، از جایگاهی مهم و بالا در سلسله مراتب اداری برخوردار است، اما غالباً به لحاظ عملکرد حقوقی، از یک جایگاه اجرایی با مدیریت قوی و یکپارچه برخوردار نمی‌باشد. از این رو، بحران تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی، از طریق تأثیر بر پایداری آب و هوایی ایران موجبات افزایش دما، کاهش بارش، خشک‌سالی‌های فراگیر، گرد و غبار، سیل‌های مهیب و مهاجرت‌های اقلیمی را فراهم کرده است. لذا مسئله، چالش‌ها و پیامدهای ناشی از

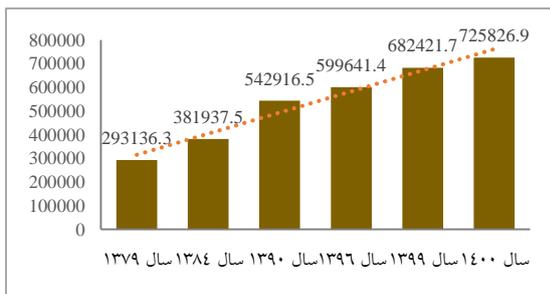
ساخت، سهم عمده‌ای را در تغییرات آب و هوایی دارد، به طوری که افزایش کربن اتمسفر یکی از چالش‌برانگیزترین مشکلات جامعه جهانی محسوب می‌شود (۱۲).



شکل (۳): میزان انتشار آلاینده NOx ناشی از تولید و مصرف انرژی در کشور، هزار تن



شکل (۴): میزان انتشار آلاینده CO ناشی از تولید و مصرف انرژی در کشور، هزار تن



شکل (۵): میزان انتشار آلاینده CO2 ناشی از تولید و مصرف انرژی در کشور، هزار تن

این در حالی است، که وقوع افزایش میانگین دمای هوای جهانی، سبب شده است کشور ایران، یکی از

هوایی، التزام به مقوله‌های اکتساب به اجتماع پایدار، اقتصاد پایدار و چرخشی<sup>۱</sup> و محیط زیست پایدار<sup>۲</sup> برای همه جوامع به صورت عادلانه نهادینه‌سازی گردد. در تکوین سازوکارهای اجرایی، مقابله با تغییرات اقلیمی اهتمام همزمان به سه مقوله فوق، موجبات تحقق حق بر پایداری اقلیمی و تفریق مخاطرات برخاسته از بحران تغییرات اقلیمی را به همراه خواهد داشت (۹). ضرورت اهتمام به اهمیت اکتساب به پایداری در مقوله مقابله با تغییرات آب و هوایی، تا آنجا است، که در دستور کار ۲۰۳۰ سازمان ملل متحد نیز جهت دستیابی به اهداف توسعه پایدار، برای اکتساب به پایداری در سه حوزه اجتماع، اقتصاد و محیط‌زیست تأکید شده است (۱۰).

- توسعه پایدار و غلبه بر آلودگی‌های زیست محیطی ایران

انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های اقتصادی و مصرف انرژی‌های فسیلی، عامل مهمی در وقوع گرمایش هوا و تغییرات اقلیمی در ایران محسوب می‌شود. بر اساس گزارش معاونت امور برق و انرژی وزارت نیرو در سال ۱۴۰۲، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در بازه‌های زمانی مختلف در کشور ایران روندی صعودی را نشان می‌دهد (۱۱). از مصادیق حایز اهمیت افزایش میزان آلاینده‌های گلخانه‌ای ناشی از تولید و مصرف انرژی در کشور، می‌توان به تشدید انتشار گاز اکسیدهای نیتروژن (NOx)، مونواکسید کربن (CO) و دی‌اکسید کربن (CO<sub>2</sub>) مطابق شکل‌های (۳) الی (۵) اشاره نمود. در سطح منطقه‌ای نیز، افزایش بی‌رویه دی‌اکسید کربن و سایر گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسان

<sup>1</sup> Sustainable and circular economy

<sup>2</sup> Sustainable environment

قربانیان تغییرات اقلیمی محسوب شود. در حال حاضر آنچه در سال‌های اخیر، بحران تغییرات اقلیمی را در صدر فهرست چالش‌های جهانی و بالاخص منطقه خاورمیانه قرار داده است، قرار گرفتن جوامع انسانی در معرض خطرات ناشی از این تغییرات می‌باشد. مطالعات بین‌المللی بر این نکته تأکید دارند که غلبه بر تغییرات اقلیمی مستلزم اهتمامی یکپارچه و همسوسازی فرایندهای زیست‌محیطی و اقتصادی در تدوین و اجرای سیاست‌های آب و هوایی است (۱۳). لذا، توفیق برنامه‌ها و سازوکارهای مقابله با تغییرات اقلیمی، نیازمند اهتمام به تکوین الگوهای مقابله با تغییرات آب و هوایی برای اکتساب توسعه پایدار می‌باشد، زیرا تضمین توسعه پایدار همچنان یک چالش عمده برای سیاست‌گذاران در اجرای برنامه‌های توسعه منطقه‌ای به واسطه نادیده گرفتن مقوله محیط زیست محسوب می‌شود و تمرکززیایی بر اهداف پایداری موجبات تقویت برنامه‌های حفاظت محیط زیست را در کنار توجه به رشد اقتصادی فراهم‌آوری می‌نماید (۱۴).

### پیشینه تحقیق

از سوابق مطالعاتی حایز اهمیت در حوزه مقابله با تغییرات اقلیمی و سیاست‌گذاری آب و هوایی، می‌توان به تحقیق دانشگاه فنی مونیخ آلمان در سال ۲۰۲۵ اشاره نمود. این تحقیق بیان می‌دارد، که گرمایش جهانی و بحران تغییرات آب و هوایی ناشی از فعالیت‌های نابخردانه جامعه انسانی و سیاست‌گذاران، تهدیدهای مهمی هستند، که جهان امروز ما با آن مواجه است. از همین منظر، برای کاهش

بدترین پیامدهای زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی تغییرات آب و هوایی، موافقت‌نامه‌های بین‌المللی متعددی امضاء شده است. برای دستیابی به اهداف تعیین شده در سلسله نشست‌های بین‌المللی آب و هوایی، ضروری است، که سیاست‌های آب و هوایی مطالبه‌گرانه‌ای در مقیاس جهانی اجرا شود (۱۵). تحقیقات دانشگاه جیاتونگ هم در سال ۲۰۲۴ بر ضرورت ایجاد تعادل در رشد اقتصادی و انتشار کربن برای مدیریت تغییرات آب و هوایی از طریق بهره‌گیری از سیاست‌های زیست‌محیطی<sup>۱</sup> و مکانیسم‌های پایداری تأکید نموده است. این تحقیق بر لزوم توجه به مقوله‌های اقتصاد، اجتماع و محیط زیست در فرایندهای پرداختن به ساز و کارهای مقابله با تغییرات آب و هوایی اشاره نموده است (۱۶). همچنین، دانشگاه اوکلند، نیوزلند با همکاری دانشگاه ویسکانسین-مدیسون، ایالات متحده آمریکا در سال ۲۰۲۴ تحقیقی را در خصوص عدالت اقلیمی<sup>۲</sup> به انجام رسانده است. این مطالعه بیان می‌دارد، که در طول سه دهه گذشته، موضوع عدالت اقلیمی در فضاها و قالب‌های مختلفی مطرح شده است. فعالان آب و هوا و برخی رهبران سیاسی جهان از اصطلاح عدالت اقلیمی به عنوان فراخوانی برای اقدام جهانی استفاده می‌کنند. علاوه بر آن، از عدالت اقلیمی به عنوان معیاری برای ارزیابی میزان موفقیت پروژه‌های کاهش آب و هوا و سازگاری استفاده می‌کنند (۱۷). از دیگر مطالعات حایز اهمیت در حوزه مقابله با تغییرات اقلیمی می‌توان به پژوهش دانشگاه صنعتی آینده‌وون هلند در سال ۲۰۲۳ اشاره نمود، که در زمینه عدالت

<sup>1</sup> Environmental policy

<sup>2</sup> Climate justice

اقلیمی به انجام رسیده است. این تحقیق پرداختن به مقوله عدالت اقلیمی را یکی از ابزارهای اصلی برای مبارزه با تغییرات آب و هوایی و گذار به سیستم‌های انرژی کم کربن بیان نموده است. نیاز فوری به اقدام اقلیمی، احساس فوریت برای انجام و تسریع عادلانه انتقال فناوری‌های پاک از سوی همه جوامع، ضروری است (۱۸). بی‌گمان برخورداری از سیاست‌های عادلانه و پایداری آب و هوایی موجبات هم‌افزایی قابل توجهی در برنامه‌های مقابله با بحران تغییرات اقلیمی، در دستیابی عادلانه همه جوامع به مقوله‌های پیشرفت اجتماعی، اقتصاد چرخشی و پایدار و محیط زیست سالم فراهم خواهد کرد.

#### روش تحقیق

این مطالعه با هدف تکوین الگوی حقوقی مقابله با تغییرات آب و هوایی ایران در جهت کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و اکتساب به توسعه پایدار در سه فاز عملیاتی و تحقیقاتی زیر به انجام رسیده است: در فاز نخست (پیامدهای تغییرات آب و هوایی ایران از منظر بررسی گزارش‌های سازمان حاکمیتی و نظارتی و بهره‌برداری از نظرسنجی خبرگان مشخص گردید. در فاز دوم) شناسایی و تجزیه و تحلیل بارزترین سازوکارهای مقابله با تغییرات آب و هوایی ایران در معیت بهره‌برداری از مدل تحلیلی سلسله مراتبی (AHP) صورت پذیرفت. در نهایت در فاز سوم) الگوی حقوقی مقابله با تغییرات آب و هوایی ایران برای اکتساب توسعه پایدار مورد استقصا واقع شده است.

برای تعیین حجم جامعه آماری در این تحقیق جهت بهره‌برداری در پرسش‌نامه‌ها و چک‌لیست‌ها، از رابطه ویلیام کوکران استفاده شده است. بدین شرح که در

محاسبات کوکران با جامعه نامعلوم،  $Z_{\alpha/2}$  با سطح خطای  $\alpha$  برابر با ۵ درصد (سطح اطمینان ۹۵ درصد) محاسبه و برابر  $1/96$  تعیین شده است. از همین منظر، با احتساب میزان خطای  $0/1$  و انحراف معیار  $0/5$ ، حداقل جامعه آماری ۹۶ مشخص گردید. انتخاب مخاطبان جامعه آماری از حوزه‌های منابع طبیعی، محیط زیست، حقوق محیط زیست و حقوق صورت پذیرفته است. تحقیقات نشان می‌دهد، بهره‌برداری از فرمول کوکران در زمانی که جامعه بزرگ می‌باشد، از ساز و کارهای مناسب در فرایند تحقیق می‌باشد (۱۹). در خصوص تأثیر بهره‌برداری از طیف لیکرت در این تحقیق می‌توان تقریر نمود، که لیکرت، ابزاری حایز اهمیت برای سنجش نگرش افراد محسوب می‌شود و برای تهیه پرسش‌نامه‌های سنجش نگرش در علوم انسانی کاربرد دارد. مرسوم‌ترین شکل طیف لیکرت، به صورت پنج درجه است. همچنین، از این مقیاس می‌توان برای بیان توافق یا سنجش اهمیت یا وضعیت استفاده کرد. مقیاس‌های نوع لیکرت که برای اولین بار توسط لیکرت معرفی شد، به طور متداول هم در صنعت و هم در دانشگاه مورد استفاده قرار گرفته است (۲۰). همچنین در توجیه استفاده از مدل AHP در تجزیه و تحلیل سازوکارهای مقابله با تغییرات اقلیمی می‌توان اذعان نمود، که منطق مقایسه زوجی دقت تشخیص را افزایش می‌دهد، و یکی از ویژگی‌های برجسته این روش این است، که در یک زمان به مقایسه مؤلفه می‌پردازد. لذا، روشی مفید برای تعیین معیارهای چندگانه و ارائه یک ارزیابی جامع است. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در حال حاضر در حوزه‌های مختلفی مانند توسعه اجتماعی، برنامه‌ریزی

منابع و حفاظت از محیط زیست از محبوبیت برخوردار است (۲۱).

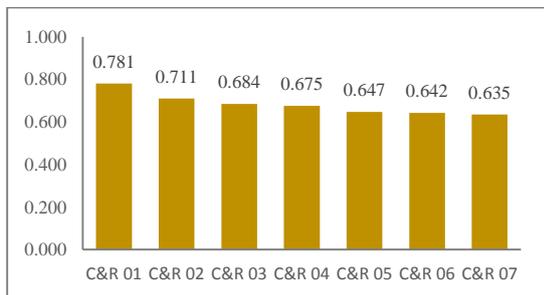
### نتایج و بحث

همانطور که تقریر شد، افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی و تشدید ناپایداری اقلیمی در کشور ایران، از طریق بررسی و استقصا گزارش‌های

سازمان‌های حاکمیتی و مؤسسات علمی قابل تصدیق می‌باشد. علاوه بر آن، مطابق فرایند سازماندهی این تحقیق در بهره‌برداری از نظرسنجی خبرگان، بارزترین پیامدهای تغییرات آب و هوایی ایران که تضييع کننده حقوق عمومی جامعه در بهره‌مندی از حق برخورداری از اقلیم پایدار می‌شود، مطابق جدول (۱)، مشخص گردید.

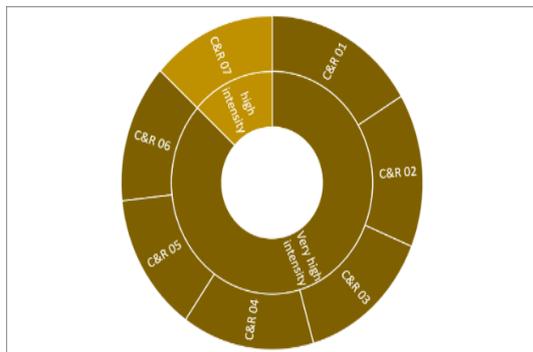
جدول (۱): شناسایی بارزترین پیامدهای تغییرات آب و هوایی ایران

ردیف	پیامدهای تغییرات آب و هوایی	کد ردیابی
۱	کمبود منابع غذایی و تقلیل معیشتی جوامع محلی	C&R 01
۲	تنش و مخاصمات استانی بر اکتساب به منابع آبی	C&R 02
۳	اختلال در کیفیت زندگی ناشی از افزایش فراوانی وقوع طوفان‌های گرد و غبار منطقه‌ای و برون‌مرزی بر کشور	C&R 03
۴	کاهش دسترسی صنایع به منابع انرژی (برق) ناشی از وقوع تابستان گرم و فراتر از نرمال	C&R 04
۵	کاهش عملکردی حوزه صنایع راهبردی کشور ناشی از محدودیت منابع انرژی	C&R 05
۶	کاهش تولیدات کشاورزی	C&R 06
۷	تشدید مهاجرت‌های اجباری از روستا به شهر و توسعه حاشیه‌نشینی	C&R 07



شکل (۶): میزان تأثیرگذاری پیامدهای تغییرات آب و هوایی

شناسایی شده در ایران



شکل (۷): سطوح پیامدهای تغییرات آب و هوایی ایران منطبق

بر میزان شدت تأثیرگذاری

همچنین، تجریه و تحلیل و تعیین سطح صورت گرفته در این تحقیق مطابق شکل‌های (۶) و (۷) نشان داد، پیامدهای کمبود منابع غذایی و تقلیل معیشتی جوامع و افزایش تنش و مخاصمات استانی بر اکتساب به منابع آبی و تکرر وقوع طوفان‌های گرد و غبار منطقه‌ای بیش‌ترین تأثیرگذاری را بر تضييع حقوق عمومی جامعه در برخورداری از یک اقلیم پایدار در ایران دارند. از طرفی، کاهش دسترسی صنایع به منابع انرژی ناشی از وقوع تابستان‌های گرم و فراتر از نرمال نیز، تضعیف چرخه‌های تولید و اقتصادی کشور را به همراه خواهد داشت.

### - سازوکارهای مقابله با تغییرات آب و هوایی ایران و اعاده حقوق عمومی جامعه

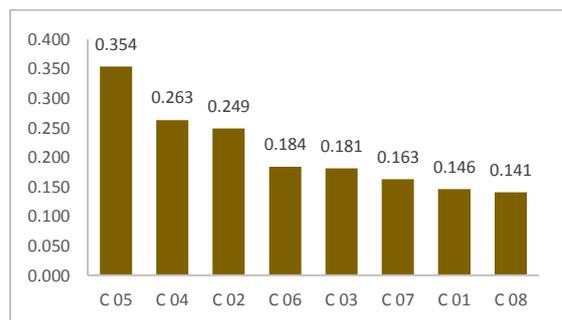
در حال حاضر این مقوله مسجل شده است که تشدید پیامدهای ناگوار تغییرات آب و هوایی در ایران خواهد توانست، به یکی از نگرانی‌های اصلی جامعه تبدیل شود، که در صورت عدم اهتمام ضابطه‌مند و عدم مدیریت آن، موجبات بروز خسارات جبران‌ناپذیری را ایجاد نماید. بررسی پیامدهای گسترده تغییرات اقلیمی بر بخش‌های مختلف کشور و مطالعات روند بررسی شاخص‌های آب و هوایی نشان

می‌دهد، که تشدید پیامدهای تغییر اقلیم و ناپایداری آب و هوایی در کشور قابل ملاحظه است و نیازمند اقدام عاجل و ملی در این حوزه می‌باشد. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در این مطالعه و با بهره‌گیری از الگوی تحلیلی سلسله مراتبی (AHP)، مهم‌ترین سازوکارهای مقابله با تغییرات آب و هوایی در ایران، مطابق با جدول (۲) و شکل (۸)، در راستای تحقق پایداری اقلیمی و دستیابی به جامعه‌ای پایدار، اقتصادی چرخشی و پایدار و محیط زیستی سالم می‌باشد.

جدول (۲): ساز و کارهای مقابله با تغییرات آب و هوایی ایران

کد ردیابی	ساز و کار مقابله با تغییرات آب و هوایی	ردیف
C 01	تکوین سند التزام‌آور بهره‌برداری از فن‌آوری‌های صرفه‌جویی در مصرف منابع آبی بالاخص صنایع بزرگ	۱
C 02	ضرورت همکاری‌های منطقه‌ای در زمینه سازگاری در حوزه دستیابی به تکنولوژی‌های مدیریت منابع انرژی	۲
C 03	بازآفرینی و تقویت شیوه‌نامه‌های مدیریت بحران سریع در تأمین شرایط بازگشت به پایداری اقلیمی در رخدادها در حال وقوع آسیب‌رسان	۳
C 04	تکوین و تقویت شیوه‌نامه‌های تشویقی وزارت نیرو در تزریق انرژی سبز به شبکه برق کشور از سوی صنایع بزرگ	۴
C 05	تخصیص منابع مالی جهت بازآفرینی اجرای قانون هوای پاک در افزایش رفاه و تسهیلات حوزه حمل و نقل عمومی درون شهری	۵
C 06	بسترسازی تقنین ضوابط ضمانت اجرایی قوی در تمکین برنامه‌های کاهش در صنایع نیروگاهی و پالایشگاهی	۶
C 07	التزام به تکوین آیین‌نامه اجرایی ملی نحوه محاسبه ردپای کربن (Carbon footprint) در صنایع کشور به تفکیک	۷
C 08	تنظیم اساس‌نامه الزام‌آور امهال تنوع بخشی به سبد انرژی با توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر	۸

از جمله بحران کمبود منابع پایه و انرژی و تقلیل معیشت جامعه ایرانیان روبرو می‌باشد. لذا، برای مواجهه با این پیامدهای ناخواسته و آسیب‌رسان و همچنین تأمین حق داشتن یک اقلیم پایدار، می‌بایست تمرکززایی لازم بر سازوکارهای مقابله با تغییرات آب و هوایی در قالب الگوهای توزین و تدقیق شده از سوی نهادهای قانون‌گذار و دستگاه‌های نظارتی به‌عمل آید. در همین راستا، برخی از سازوکارهای حایز اهمیت مستخرج از مدل AHP در این مطالعه، به شرح زیر بررسی و تشریح می‌شود.



شکل (۸): وزن‌دهی سازوکارهای مقابله با تغییرات آب و هوایی ایران با بهره‌گیری از مدل تحلیلی سلسله مراتبی (AHP) از همین منظر، در شرایط کنونی کشور ایران، با رخداد تشدید پیامدهای ناگوار تغییرات آب و هوایی

## - لزوم تخصیص منابع مالی و بازآفرینی اجرای قانون هوای پاک در افزایش رفاه و تسهیلات حوزه حمل‌ونقل عمومی درون شهری

عملکرد نامطلوب خودروها، مقوله قابل توجهی در تولید آلاینده‌های گلخانه‌ای در کلان‌شهرها در پهنه سرزمینی ایران محسوب می‌شود. در همین راستا، معمولاً راه‌کارهای دائمی کاهش آلودگی هوا در حوزه حمل‌ونقل پرهزینه و بلندمدت هستند؛ راه‌کارهایی از جمله نوسازی ناوگان حمل‌ونقل عمومی، توسعه وسایل نقلیه برقی و اصلاح کیفیت سوخت، نیازمند بودجه و زمان زیاد است. در شرایط اقتصادی فعلی حاکم بر کشور، طبیعتاً اجرای این راه‌کارها با مشکل و روند کندی مواجه است.

قانون‌گذار برای برون رفت از عملکرد نامطلوب وسایل نقلیه عمومی در سال ۱۳۹۶، نسبت به تصویب قانون هوای پاک اقدام نموده است. ماده ۹ و ماده ۱۰ این قانون بر به‌روزرسانی و نوسازی حمل‌ونقل عمومی کشور تصریح نموده است. ماده ۹ قانون هوای پاک مصوب مجلس شورای اسلامی در سال ۱۳۹۶ مقرر نموده است که وزارت کشور موظف است، با همکاری وزارتخانه‌های صنعت، معدن و تجارت و امور اقتصادی و دارایی، زمینه نوسازی ناوگان حمل‌ونقل عمومی شهری با اولویت شهرهای بالای دویست هزار نفر جمعیت را ظرف مدت پنج سال از محل منابع درآمدی ماده ۶ این قانون از طریق کمک بلاعوض، یارانه، تسهیلات، واردات خودروهای برقی - بنزینی (هیبریدی) و خودروهای الکتریکی و موتورسیکلت برقی به انجام برساند. همچنین تبصره ماده ۹ قانون هوای پاک، مقرر می‌دارد، که خودروهای

برقی - بنزینی، موتورسیکلت و خودروهای الکتریکی تولید داخل از پرداخت مالیات بر ارزش افزوده معاف می‌باشند.

این در حالی است، که عدم تمرکززایی بر جاری‌سازی مقوله‌های تأمین مالی سبز<sup>۱</sup> و فقدان روند نظارتی قوی و تکمیل‌پذیر، روند اسقاط خودروهای فرسوده و نوسازی ناوگان حمل‌ونقل عمومی را با کندی مواجه نموده است. روند افزایشی گازهای گلخانه‌ای و ثبت تعداد روزهای ناسالم و بسیار ناسالم در کلان‌شهرهای ایران، مصادق بارز عدم اهتمام به ماده ۹ و ۱۰ قانون هوای پاک و تشدید ناپایداری اقلیمی محسوب می‌گردد. در همین راستا تقریر می‌شود، که از منظر این مطالعه بازآفرینی قانون هوای پاک و تدوین دستورالعمل‌های حمایتی مصرف‌کننده‌ها و هم‌افزایی بر جاری‌سازی فرایندهای نظارتی تمکین‌پذیر، خواهد توانست، از پتانسیل‌های آسیب به محیط زیست ناشی از فرسودگی حمل و نقل کشور ممانعت نماید.

- تکوین و تقویت شیوه‌نامه‌های تشویقی وزارت نیرو در تزریق انرژی سبز به شبکه برق کشور از سوی صنایع بزرگ

از مصادیق حقوقی حایز اهمیت در عدم توفیق بهره‌برداری از انرژی‌های سبز<sup>۲</sup> در کشور در سال‌های گذشته، اشاره به برنامه پنج ساله ششم توسعه جمهوری اسلامی ایران و ماده ۵۰ بخش ۱۰ ذریع با حوزه انرژی، صنعت و معدن می‌باشد، که مقرر شد، دولت ملکف است، سهم نیروگاه‌های تجدیدپذیر و پاک با اولویت سرمایه‌گذاری بخش غیر دولتی با حداکثر ظرفیت داخلی را تا پایان اجرای قانون برنامه

<sup>1</sup> Green finance

<sup>2</sup> Green energies

به حداقل پنج درصد ظرفیت برق کشور برساند. لذا بر همین اساس، مقرر شده بود، تا پایان برنامه پنج ساله، پنج درصد (۰.۵٪) از ظرفیت برق کشور از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین گردد. این در حالی است، که به علت عدم برخورداری از نظارت قوی و شیوه-نامه‌های تشویقی می‌توان اذعان نمود، که کشور ایران فاصله زیاد و قابل توجهی با هدف‌گذاری‌های انجام شده، دارد. از همین منظر ضروری است، برنامه‌ریزی کلان در حوزه تولید انرژی و بهره‌برداری از ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر را مورد اهتمام قرار داد. این منظر نیازمند ایجاد یک تعادل پایدار در حوزه انرژی با حفظ رشد اقتصادی می‌باشد. از این‌رو، از منظر الگوی تصمیم در این مطالعه، تمرکززایی بر تکوین و تقویت شیوه‌نامه‌های تشویقی وزارت نیرو در تزریق انرژی سبز به شبکه برق کشور از سوی صنایع بزرگ، خواهد توانست با ترغیب صنایع بزرگ، در مقوله اکتساب به پایداری اقلیمی و کاهش پیامدهای تغییرات آب و هوایی، تأثیر قابل توجهی ایجاد نماید.

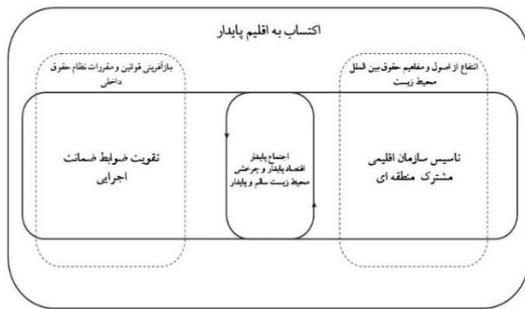
- ضرورت همکاری‌های منطقه‌ای در زمینه سازگاری در حوزه دستیابی به تکنولوژی‌های مدیریت منابع انرژی

گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی و متون علمی نشان می‌دهد، که منطقه خاورمیانه به یکی از آسیب‌پذیرترین مناطق سیاره در مواجهه با پیامدهای برخاسته از بحران تغییرات آب و هوایی تبدیل شده است، که به دلیل وقوع مکرر دماهای بالا، تشدید رویداد خشک‌سالی یا وقوع سیل تحت فشار قرار گرفته است. از همین منظر ضروری است، کشورهای خاورمیانه در سال‌های پیش رو، نسبت به همسوسازی اهداف کلان و متعالی خود در خصوص سازوکارهای مقابله با تغییرات آب و هوایی و کاهش سهم خود در

انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرمایش منطقه‌ای، همبستگی یکپارچه‌ای را داشته باشند. در راستای اهتمام به حوزه حفاظت محیط زیست در کشور ایران، تصویب و ابلاغ سیاست‌های ۱۵ گانه نظام در محیط زیست به قوای کشور، براساس بند «یک» اصل ۱۱۰ قانون اساسی توسط مقام معظم رهبری در سال ۱۳۹۴ صورت پذیرفته است، و بند ۱۵ نظام یکپارچه ملی محیط زیست ایران به تقویت مقوله دیپلماسی در حوزه حفاظت محیط زیست اشاره نموده است. لذا، با اهتمام به گستردگی دامنه آلودگی‌های زیست‌محیطی، ضرورت توسعه مناسبات و جلب مشارکت و همکاری‌های هدفمند و تأثیرگذار دو جانبه، چند جانبه، منطقه‌ای و بین‌المللی در زمینه محیط زیست برای برون‌رفت از پیامدهای تغییرات آب و هوایی ضروری می‌باشد. به هر ترتیب، در الگوی تصمیم این مطالعه، تمرکززایی بر ضرورت همکاری‌های منطقه‌ای در اکتساب توسعه صنایع کم کربن، از اهتمام بنیادین و اجرایی کارآمدتری در نقشه راه سیاست‌گذاری تغییرات آب و هوایی منطقه، برخوردار می‌باشد.

- الگوی حقوقی مقابله با تغییرات آب و هوایی، لازمه پیاده‌سازی سازوکارها و اکتساب به توسعه پایدار

تشدید رخدادهای ناگوار و افزایش آلاینده‌های زیست‌محیطی در کشور ایران تقریر می‌نماید که قوانین و مقررات جاری‌سازی شده برای مقابله با تغییرات اقلیمی که به وسیله نهادهای ذی‌صلاح تصویب شده‌اند، توفیق لازم برای کمینه‌سازی و مدیریت پیامدهای برخاسته از تغییرات اقلیمی را نداشته‌اند. از طرفی، غفلت و نبود اهتمام نسبت به پدیده تغییرات اقلیمی در برنامه‌های پنج ساله توسعه و طرح‌های کلان کشور، موجبات پیامدهای اضمحلال‌کننده‌ای بر



شکل (۹): الگوی جامع مقابله با تغییرات اقلیمی ایران

### نتیجه‌گیری

تشدید پیامدهای ناگوار تغییرات آب و هوایی در ایران، به یکی از نگرانی‌های اصلی اجتماع ایرانیان در باب تضييع حقوق عمومی جامعه تبدیل شده است. لذا، عدم اهتمام ضابطه‌مند و عدم مدیریت آن، موجب وقوع خسارت‌های جبران‌ناپذیری خواهد شد. اگرچه طی سال‌های اخیر، برخی دستگاه‌های اجرایی مجموعه سازوکارهای جزیره‌ای و پراکنده‌ای را جهت مقابله با پدیده تغییرات آب و هوایی در ایران به انجام رسانده‌اند. اما بررسی نتایج شاخص‌های زیست‌محیطی و تجزیه و تحلیل گزارش‌های سازمان‌های حاکمیتی نشان می‌دهد، فاصله معنادار و زیادی با مقوله مقابله با تغییرات آب و هوایی مشاهده می‌شود. از مصادیق قابل‌اهتمام آن در پهنه سرزمینی ایران می‌توان، به مقوله اتلاف منابع طبیعی، عدم تنوع سبد انرژی کشور و تشدید ناترازی در منابع انرژی و روند انتشار صعودی گازهای گلخانه‌ای اشاره نمود.

از این منظر، برای برون‌رفت از پیامدهای بحران تغییرات اقلیمی در منطقه ایران، ضروری است تمرکز بر مقررات حقوقی آب و هوایی با هدف تحقق حق بر پایداری اقلیمی، از طریق الگوهای حقوقی بومی‌سازی‌شده، مورد توجه ویژه قرار گیرد. در این چارچوب، مؤثرترین الگوی حقوقی مقابله با تغییرات اقلیمی در ایران، در کنار دو راهبرد اساسی تأسیس یک

بخش‌های مختلف کشور نظیر بخش‌های تأمین انرژی به همراه داشته است.

با توجه به گستردگی پیامدهای تغییرات اقلیمی، انجام اقدامات مؤثر برای مقابله با این پدیده امری ضروری است. در این راستا، اجرای سازوکارهای مقابله با تغییرات آب و هوایی باید در اولویت قرار گیرد. دستیابی به پایداری اقلیمی، مستلزم تغییر رویکرد از نگاه صرفاً رسانه‌ای به رویکردی واقع‌گرایانه و متناسب با شرایط پهنه سرزمینی ایران است. هدف از این رویکرد، دستیابی به اجتماعی پایدار، تقویت اقتصاد چرخشی و پایدار و صیانت از محیط زیست سالم است. این اهداف باید به‌طور نظام‌مند در برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای کشور نهادینه شوند. در همین راستا تأکید می‌گردد، که پیاده‌سازی سازوکارهای مقابله با این بحران، از طریق: (۱) تکوین بسترهای نظارتی و ضمانت اجرایی ملی قوی و (۲) توسعه سطح بی‌سابقه‌ای از وقوع همکاری‌های منطقه‌ای ما بین ایران و کشورهای همسایه، مرتفع خواهد شد. بنابراین، الگوی حقوقی مقابله با تغییرات آب و هوایی ایران برای تحقق اقلیم پایدار، از طریق اهتمام به دو راهبرد عادلانه مطابق شکل (۹) و به شرح زیر قابل تسهیل می‌باشد:

- تمرکززایی بر راهبرد حقوقی تکوین سازمان مشترک اقلیمی در هم‌افزایی برنامه‌های اقدام منطقه‌ای.
- نهادینه‌سازی راهبرد حقوقی تخصیص ضمانت اجراهای قوی در تمکین و ایجاب برنامه‌های اقلیمی از طریق بازآفرینی قوانین و مقررات.

سازمان اقلیمی مشترک منطقه‌ای و تقویت نظارت‌های زیست‌محیطی از طریق تدقیق و اعمال ضمانت اجراهای قوی و الزام‌آور، قابل تحقق خواهد بود.

لذا، ضرورت تمرکززایی بر تقنین ضمانت اجراهای مؤثر و تکمین‌آور برای جلوگیری از تشدید آلاینده‌های زیست‌محیطی در قوانین و مقررات جاری به منظور تأمین منافع حقوق عمومی جامعه به شرح زیر پیشنهاد می‌گردد:

- بطلان قراردادهای و توقف آلودگی: در تأویل این مقوله، اصل پنجاهم قانون اساسی تقریر می‌نماید که فعالیت‌های اقتصادی و غیر آن که با آلودگی محیط زیست یا تخریب غیرقابل جبران آن ملازمه پیدا کند، ممنوع می‌باشد. از این منظر، می‌توان اذعان نمود، که مطابق قانون اساسی هر گونه عملی که منجر به آلودگی محیط زیست و استکثار ناپایداری اقلیمی گردد، ممنوع تلقی می‌شود.

- اعاده به حالت پیشین: از جمله جایگزین کردن منابع طبیعی مخروب و آلوده با یک منبع معادل که بتواند در اکتساب به پایداری اقلیمی به مانند جبران کردن تلف مال یا مثل آن که بهترین نحو برای جبران مال تلف شده محسوب شود، از تأثیرگذاری مطلوبی برخوردار باشد.

- التزام به پرداخت خسارت با رویکرد تقویت جنبه پیشگیری: پرداخت خسارت به زیان‌دیدگان همواره مؤثرترین و عملی‌ترین راه حل جبران آسیب به آن‌ها می‌باشد. زیرا، این راه حل علاوه بر آنکه می‌تواند به طور تقریبی جبران خسارت نماید، خواهد توانست، جنبه پیشگیری از تکرار اقدامات زیان‌بار و تشدیدکننده

تغییرات آب و هوایی آتی در منطقه را نیز فراهم و تضمین نماید.

- استرداد اموال یا منافع حاصل از آلودگی محیط زیست.

- تأکید بر توسعه و ضرورت آموزش محیط زیست از ضمانت اجراهای تأثیرگذار در بازآفرینی قوانین و مقررات مقابله با تغییرات اقلیمی ایران و اکتساب یک اقلیم پایدار: برای پیشگیری از ورود خسارت به محیط زیست، آموزش و اطلاع‌رسانی، از اهمیت بسزایی برخوردار است. مقوله آموزش در حقوق محیط زیست نقش اساسی در حفظ محیط زیست و جلوگیری از تخریب محیط زیست و یا سایر خسارات زیست‌محیطی دارد.

در نهایت، با توجه به اینکه بحران تغییرات آب و هوایی پدیده‌ای جهانی و منطقه‌ای با گستره جغرافیایی وسیع است، مقابله با آلودگی‌های زیست‌محیطی و پیامدهای تغییرات اقلیمی مستلزم اهتمامی منطقه‌ای است. در این راستا، تعهد و تلاش برای ایجاد یک سازمان اقلیمی مشترک به منظور مقابله با تغییرات آب و هوایی، در زمره نگرانی‌های مشترک بشریت قرار می‌گیرد و از طریق پایبندی به اصولی همچون همکاری، اطلاع‌رسانی، پرداخت آلوده‌ساز<sup>1</sup> و مفهوم توسعه پایدار در حقوق بین‌الملل محیط زیست قابل تسهیل است.

### تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی برای اعلام ندارند.

<sup>1</sup> Polluter Pays Principle

## منابع

- environment” sustainability from the perspective of urban spatial structure: A case study of the Yangtze River delta urban agglomeration. *Sustainable Cities and Society*, 96, 104691.
- [11] Shafizadeh, M., Tavanpour Paveh, M., Amini, F., Soleymanpour, P., Saberfatahi, L., Ghahremani, N.G., 2018, Iran and world energy facts and figures, 2016. Ministry of Energy, Deputy of Electricity and Energy Affairs, Office of Electricity and Energy Macro-Planning. (Available online: <https://lib.ui.ac.ir/dL/search/default.aspx?Term=144133&Field=0&DTC=1>). (in Persian)
- [12] Nzabarinda, V., Bao, A., Tie, L., Uwamahoro, S., Kayiranga, A., Ochege, F.U., Muhirwa, F., Bao, J., 2025, Expanding forest carbon sinks to mitigate climate change in Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207, 114849.
- [13] Huang, W., 2023, Climate policy uncertainty and green innovation. *Economics Letters*, 233, 111423.
- [14] Zekri, E., Abolghasemzadeh, H., Nasseri, M., Nejati, A., Majed, V., 2025, Climate-resilient development: A sustainability analysis of regional programs through the water-energy nexus model and impacts of climate change. *Journal of Cleaner Production*, 530, 146786.
- [15] Goerg, S., Pondorfer, A., Stöhr, V., 2025, Public support for more ambitious climate policies: Empirical evidence from Germany. *Ecological Economics*, 231, 108538.
- [16] Long, H., Feng, G., 2024, Does national ESG performance curb greenhouse gas emissions?. *Innovation and Green Development*, 3, 100138.
- [17] Parsons, M., Asena, Q., Johnson, D., Nalau, J., 2024, A bibliometric and topic analysis of climate justice: Mapping trends, voices, and the way forward. *Climate Risk Management*, 44, 100593.
- [18] van Bommel, N., Höffken, J.I., 2023, The urgency of climate action and the aim for justice in energy transitions – dynamics and complexity. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 48, 100763.
- [19] Ahmed, S.K., 2024, How to choose a sampling technique and determine sample size for research: A simplified guide for researchers. *Oral Oncology Reports*, 12, 100662.
- [1] Juel, R., Bwire, C., Eddine, H.C., Mariyam, D., Umesh, H., Alobeid, R., Bonnet, G., Milner, J., Yeung, S., Hughes, R., 2025, Visualising future, sustainable cities: Insights from participatory workshops at the COP28 climate conference. *Cities*, 165, 106137.
- [2] Du, J. Zhen, Z., Wei, X., Li, R., 2025, Achieving energy justice through corporate carbon disclosure: The effects of voluntary and third-party verification mechanisms. *Journal of Business Research*, 200, 115677.
- [3] Kryston, A., Muller, M.F., Penny, G., Bolster, D., Tank, J.L., Mondal, M.S., 2022, Addressing climate uncertainty and incomplete information in transboundary river treaties: A scenario-neutral dimensionality reduction approach. *Journal of Hydrology*, 612(A), 128004.
- [4] Roberts, H., 2024, Chapter 17 - Climate change and the law of the sea convention. In: *Living with climate change*. Letcher, T.M. (Editor), pp. 343-357.
- [5] NOAA, Mauna Loa Observatory, 2025, Direct measurements: 1958-present (CO<sub>2</sub>). (Available online: <https://science.nasa.gov/earth/explore/earth-indicators/carbon-dioxide>).
- [6] NASA's Goddard Institute for Space Studies (GISS), 2025, Global land-ocean temperature index. (Available online: <https://science.nasa.gov/earth/explore/earth-indicators/global-temperature>).
- [7] Simangan, D., Lee, C.Y., Sharifi, A., Candelaria, J.L., Kaneko, S., 2022, A global analysis of interactions between peace and environmental sustainability. *Earth System Governance*, 14, 100152.
- [8] Athy, A.E., Milojev, P., Gray, N.H., Osborne, D., Sibley, C.G., Milfont, T.L., 2022, Clarifying longitudinal relations between individuals' support for human rights and climate change beliefs. *Journal of Environmental Psychology*, 84, 101875.
- [9] Swart, R., Robinson, J., Cohen, S., 2003, Climate change and sustainable development: Expanding the options. *Climate Policy*, 3(1), S19.
- [10] Yin, H., Xiao, R., Fei, X., Zhang, Z., Gao, Z., Wan, Y., Tan, W., Jiang, X., Cao, W., Guo, Y., 2023, Analyzing “economy-society-

- [20] Biassetton, N., Disegna, M., Barzizza, E., Salmaso, L., 2023, A new adaptive membership function with CUB uncertainty with application to cluster analysis of Likert-type data. *Expert Systems with Applications*, 213A, 118893.
- [21] Hu, W., Ren, B., Lu, D., Li, B., Liu, J., Liang, W., Huang, Y., 2024, A comprehensive evaluation of commercial activated carbon for key gasoline vapor removal based on the improved AHP method. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12, 111829.

“Research article”

## Identification and analysis of infectious medical waste at Imam Khomeini Hospital, Urmia

Leila Rajabzadeh<sup>1</sup>, Arezoo Nejaei<sup>2,\*</sup>, Mohammad Ebrahim Ramazani<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Urmia University of Medical Sciences, Urmia, Iran

<sup>2</sup>Department of Environment, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran

<sup>3</sup>Research Center for Sustainable Development Management of Urmia Lake and Aras River Basin, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran

\*Corresponding author: arezoonejaei@yahoo.com

(Received: 1 November 2025, Accepted: 24 December 2025)

### Abstract

Medical waste management, particularly the handling of infectious waste, is a fundamental component of safeguarding public health and mitigating environmental impacts. Given the increasing volume of healthcare activities and the substantial generation of such waste, effective management practices have become critically important. Accordingly, the present study examined the patterns of infectious waste generation and management across different seasons and hospital departments at Imam Khomeini Hospital in Urmia, selected as a random sample representative at the national level. Data were collected through field observations and structured questionnaires. The results indicated that infectious waste generation peaked in spring and declined in summer, when the lowest levels were observed; however, generation increased again in autumn. These seasonal variations were not uniform across departments, with the highest levels of infectious waste recorded in the emergency and surgery wards. The findings also confirmed significant differences in infectious waste management practices among departments, potentially influenced by the type of medical services provided, the number of admitted patients, and the effectiveness of managerial oversight. Overall, the results underscore the need to develop and implement comprehensive, integrated, and effective strategies for infectious waste management to prevent health hazards and environmental risks associated with improper handling.

**Conflict of interest:** None declared.

**Keywords:** Infectious healthcare waste, Hospital waste, Waste generation pattern, Imam Khomeini Hospital, Urmia



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز  
فصلنامه آلودگی های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره ۲، شماره ۳، پیاپی ۷  
پاییز ۱۴۰۴، صفحات ۸۵-۷۳

## «مقاله پژوهشی»

# شناسایی و تحلیل پسماندهای عفونی بیمارستان امام خمینی (ره) در ارومیه

لیلا رجبزاده مشارکش<sup>۱</sup>، آرزو نجایی<sup>۲\*</sup>، محمد ابراهیم رضانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد آموزش محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی ارومیه، ارومیه، ایران

<sup>۲</sup> استادیار گروه محیط زیست، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار گروه محیط زیست، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

<sup>۴</sup> مرکز تحقیقات مدیریت توسعه پایدار حوضه آبریز دریاچه ارومیه و رودخانه ارس، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

\* نویسنده مسئول: arezoonejaei@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳)

## چکیده

مدیریت پسماندهای پزشکی، به ویژه پسماندهای عفونی، از مؤلفه‌های اساسی در حفظ سلامت عمومی و کاهش پیامدهای زیست محیطی بوده است. با توجه به افزایش فعالیت‌های درمانی و حجم بالای تولید این نوع پسماندها، توجه به شیوه‌های مدیریت آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف بررسی الگوی تولید و نحوه مدیریت پسماندهای عفونی در فصول مختلف سال و در بخش‌های گوناگون بیمارستان امام خمینی شهر ارومیه، به عنوان یک نمونه تصادفی در سطح کشور، انجام شده است. داده‌های مورد نیاز پژوهش از طریق مشاهدات میدانی و تکمیل پرسش‌نامه‌ها جمع‌آوری شده‌اند. نتایج حاصل از بررسی داده‌ها نشان داده‌اند که میزان تولید پسماندهای عفونی در فصل بهار به بیش‌ترین مقدار خود رسیده است و در فصل تابستان کاهش یافته است، به گونه‌ای که کم‌ترین میزان تولید در این فصل مشاهده شده است. با این حال، در فصل پاییز روند تولید پسماندهای عفونی مجدداً افزایش یافته است. همچنین این تغییرات فصلی در بخش‌های مختلف بیمارستان یکسان نبوده است و بیش‌ترین میزان تولید پسماندهای عفونی در بخش‌های اورژانس و جراحی گزارش شده است. نتایج پژوهش وجود اختلاف معنادار در شیوه‌های مدیریت پسماندهای عفونی میان بخش‌های مختلف بیمارستان را تأیید کرده‌اند؛ اختلافی که می‌تواند تحت تأثیر نوع خدمات درمانی، تعداد بیماران پذیرش شده و میزان کارایی نظارت مدیریتی در هر بخش باشد. در مجموع، یافته‌های این پژوهش بر ضرورت تدوین و اجرای راهبردهای جامع، یکپارچه و مؤثر در مدیریت پسماندهای عفونی تأکید کرده‌اند تا از بروز مخاطرات بهداشتی و زیست محیطی ناشی از این پسماندها جلوگیری شود.

**واژه‌های کلیدی:** پسماندهای عفونی، پسماندهای بیمارستانی، الگوی تولید پسماند، بیمارستان امام خمینی (ره)، ارومیه

## مقدمه

با رشد جمعیت و افزایش تراکم انسانی، حجم تولید مواد زائد افزایش یافته و طبیعت دیگر توان استحاله کامل آن‌ها را نداشته است؛ از این رو دفع اصولی پسماندها به یکی از ضرورت‌های اساسی زندگی شهری تبدیل شده است. پس از انقلاب صنعتی، ورود مواد پایدار و غیرقابل تجزیه زیستی به ترکیب زباله‌های شهری، اهمیت مدیریت پسماندهای جامد را دوچندان کرده است (۱ و ۲). در این میان، پسماندهای پزشکی به‌ویژه پسماندهای بیمارستانی به دلیل ماهیت خطرناک خود، از مهم‌ترین چالش‌های سلامت عمومی و محیط‌زیست محسوب می‌شوند. بر اساس برآوردها، هزینه رفع آلودگی هر مترمربع خاک بین ۵ تا ۵۰ هزار دلار برآورد شده است، در حالی که در ایران روزانه حدود ۸۰ تن پسماند بیمارستانی بدون رعایت ملاحظات زیست‌محیطی دفع می‌شود که پیامدهای قابل توجهی برای خاک و محیط زیست به همراه دارد (۳ و ۴). با وجود پیشرفت‌های صورت‌گرفته در حوزه مدیریت پسماند، مدیریت پسماندهای بیمارستانی همچنان یکی از پیچیده‌ترین بخش‌های سیستم مدیریت زباله به‌شمار می‌رود و شاخصی از کارآمدی کلی نظام مدیریت پسماند در کشورها محسوب می‌شود. مشکلاتی نظیر ترکیب پیچیده پسماندها، دشواری تفکیک، ضعف نظارت، کمبود زیرساخت‌های مناسب و نگرش نامطلوب عمومی، اجرای صحیح فرایندهای جمع‌آوری، بی‌خطرسازی و دفع نهایی پسماندهای پزشکی را با چالش مواجه کرده است. در ایران نیز اگرچه چارچوب‌های قانونی برای مدیریت پسماندهای بیمارستانی وجود دارد، اما

نارسایی در اجرا، آموزش ناکافی و ضعف فناوری‌ها موجب تداوم پیامدهای زیست‌محیطی شده است (۵). مطالعات متعددی به بررسی مدیریت پسماندهای پزشکی پرداخته‌اند. اسدی در سال ۱۳۹۸ نشان داد که در بیمارستان‌های خصوصی شمال شهر تهران، تفکیک، بسته‌بندی و جمع‌آوری پسماندها وضعیت مطلوب‌تری نسبت به سایر مراحل داشته، اما در مجموع ضعف‌هایی در سیستم مدیریت مشاهده شده است (۶). حسن‌جانی نیز در سال ۱۳۹۸ در بررسی بیمارستان‌ها و کلینیک‌های دندانپزشکی گرگان، وضعیت بی‌خطرسازی و جمع‌آوری را مناسب گزارش کرد، هرچند برخی نارسایی‌ها در نگهداری موقت مشاهده شد (۷). اسکندرپور در سال ۱۴۰۰ با استفاده از روش TOPSIS در بیمارستان‌های شیراز، روش اتوکلاو را به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه مدیریت پسماند معرفی نمود (۸). نظری نیز در سال ۱۴۰۰ با بهره‌گیری از روش FMEA، ریسک‌های مدیریت پسماند بیمارستانی را شناسایی و ارزیابی کرد (۹). همچنین محسنی در سال ۱۴۰۱ نقش مدیریت را عاملی کلیدی در بهبود وضعیت جمع‌آوری، حمل و دفع پسماندهای بیمارستانی دانست (۱۰). در سطح بین‌المللی، پژوهش‌هایی مانند یونگ<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۸ بر نقش عوامل اجتماعی - اقتصادی در تولید پسماندهای شهری تأکید کرده‌اند (۱۱). همچنین محققان در سال ۲۰۱۲ گزارش دادند ترکیب سوزاندن با دفن نسبت به دفن کامل، اثر زیست‌محیطی کم‌تر و انتشار گازهای گلخانه‌ای کم‌تری دارد (۱۲). اصلانی و همکاران در سال ۱۴۰۱ در پژوهشی به ارزیابی وضعیت مدیریت پسماندهای بیمارستانی همزمان با

<sup>1</sup> Yong

شیوع پاندمی پرداختند. این مطالعه در بیمارستان معتمدی شهر گرمسار انجام شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که مدیریت صحیح پسماندهای بیمارستانی می‌تواند با کاهش انتشار ویروس COVID-19 در محیط‌های بهداشتی-درمانی همراه باشد و همچنین از طریق افزایش قابلیت بازیافت مواد، به جای انتقال مستقیم آن‌ها به محل‌های دفع، موجب ایجاد ارزش افزوده شود (۱۳). مالاسیوس<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۰ تمایل به پرداخت ساکنان روستای Tengah Sembulan مالزی برای مشارکت در مدیریت پسماند را تحلیل کردند و نشان دادند عواملی مانند سن، جنسیت، سطح تحصیلات، مدت اقامت، مالکیت مسکن و قومیت، بر میزان مشارکت تأثیر معنادار دارد (۱۴). ترینج<sup>۲</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۱ چالش‌های اجرای سیاست‌های مدیریت پسماند شهری در ویتنام را بررسی کرد و نشان داد که جداسازی پسماند، سیاست‌های غیرواقعی و کمبود منابع، از مهم‌ترین موانع بوده و راهکارهای محلی متفاوتی برای بهبود سیستم جمع‌آوری ارائه شده است (۱۵). با وجود مطالعات انجام شده، اغلب پژوهش‌ها بر یک بُعد از مدیریت پسماندهای بیمارستانی متمرکز بوده و بررسی هم‌زمان الگوی تولید پسماندها بر اساس بخش‌های مختلف بیمارستان و تغییرات فصلی، به‌ویژه در بیمارستان‌های مناطق شمال غرب کشور، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین اطلاعات جامعی درباره تفاوت‌های تولید و مدیریت پسماند در بخش‌های درمانی مختلف در طول سال وجود ندارد. هدف از این پژوهش، بررسی الگوی تولید و نحوه

مدیریت پسماندهای بیمارستانی در بخش‌های مختلف بیمارستان امام خمینی شهر ارومیه در فصول مختلف سال با استفاده از داده‌های میدانی و پرسش‌نامه است.

### روش تحقیق

این پژوهش به صورت مقطعی - پیمایشی و با رویکرد آزمون فرض، انجام شد و از ترکیب روش‌های کتابخانه‌ای و میدانی برای گردآوری داده‌ها استفاده شد. برای تدوین پیشینه تحقیق، منابع علمی فارسی و لاتین شامل پایگاه‌های اطلاعاتی، کتب و مقالات مرور شدند (۱۶ و ۱۷). بخش میدانی مطالعه از طریق پرسش‌نامه، مصاحبه و بررسی اسناد موجود بیمارستانی اجرا شد. از نظر هدف، این مطالعه در زمره تحقیقات کاربردی قرار گرفت. جامعه آماری شامل تمامی پرسنل بخش مدیریت پسماندهای بیمارستانی بیمارستان امام خمینی (ره) ارومیه بود که جمعاً ۳۸ نفر بودند و به روش سرشماری وارد مطالعه شدند. پژوهش در سه‌ماهه پایانی سال ۱۴۰۲ و در یکی از هفت بیمارستان شهرستان ارومیه اجرا گردید. بیمارستان مورد مطالعه دارای ۲۵۰ تخت مصوب (همگی فعال) و ۸۵۴ نفر پرسنل بود که از میان آنان ۳۸ نفر در واحد مدیریت پسماند و بهداشت محیط فعالیت داشتند. برای گردآوری داده‌ها از پرسش‌نامه جامع وزارت بهداشت با عنوان «پرسش‌نامه بررسی وضعیت موجود پسماندهای پزشکی» استفاده شد (۱۸). این پرسش‌نامه بر اساس ابزارهای مورد استفاده دانشگاه‌های علوم پزشکی، سازمان حفاظت محیط زیست، سازمان تأمین اجتماعی و چند پایان‌نامه پیشین تدوین شده بود. تکمیل پرسش‌نامه از طریق مصاحبه

<sup>1</sup> Malasius

<sup>2</sup> Trinh

تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) جهت بررسی تفاوت فصلی و بخشی در تولید پسماند استفاده شد (۲۳ و ۲۴) و در مواردی که اختلاف معنادار مشاهده شد، آزمون تعقیبی LSD به‌کار گرفته شد. در مرحله پایانی، رگرسیون خطی برای ارائه مدل پیش‌بینی میزان تولید پسماند در ماه‌های مختلف سال اجرا شد تا امکان برنامه‌ریزی مدیریتی دقیق‌تر فراهم شود.

#### یافته‌ها

با توجه به نتایج آزمون ANOVA که در جدول (۱) ارائه شد، می‌توان گفت که بین مدیریت انواع پسماندهای بیمارستانی در بخش‌های مختلف بیمارستان امام خمینی شهر ارومیه، اختلاف معناداری وجود داشته است.

با مدیر بیمارستان، کارشناسان بهداشت محیط، مسئول خدمات عمومی، مسئول امور اداری و کارشناس آمار انجام شد. همچنین پژوهشگر با بازدید میدانی مستقیم، وضعیت تفکیک، جمع‌آوری، نگهداری موقت، بی‌خطرسازی و دفع پسماند را ثبت کرد. برای تعیین ترکیب انواع پسماند (عادی، عفونی، شیمیایی-دارویی، اجسام نوک‌تیز و برنده و پسماندهای ویژه)، از اسناد ثبت پسماند بیمارستان استفاده شد (۱۹). میزان تولید پسماند بر اساس نوع پسماند و فصل سال (به تفکیک فصول چهارگانه) بررسی شد (۲۰ و ۲۱) و سپس بر اساس بخش‌های بیمارستانی شامل اورژانس، داخلی، جراحی، اطفال، CCU، اعصاب و روان، اتاق عمل، آزمایشگاه، رادیولوژی، درمانگاه، آشپزخانه و اداری محاسبه گردید (۲۲). برای تحلیل داده‌ها از آزمون

جدول (۱): نتایج آزمون تحلیل واریانس پسماندها در بخش‌های مختلف

معناداری	F	میانگین مجذور	درجه آزادی	مجموع مجذور	
۰/۰۰۱	۳۷۵۰/۷۶۱	۱۳۸۴۰/۹۲۹	۱۱	۱۵۲۲۵۰/۲۱۹	بین گروه
		۳/۶۹	۱۸۱۲	۶۶۸۶/۵۸	درون گروه
			۱۸۲۳	۱۵۸۹۳۶/۷۹۹	مجموع
۰/۰۰۱	۵۵۱/۲۴۱	۹۹۲۶/۱۸	۱۱	۱۰۹۱۸۷/۹۷۵	بین گروه
		۱۸/۰۰۷	۱۸۱۲	۳۲۶۲۸/۶۱۱	درون گروه
			۱۸۲۳	۱۴۱۸۱۶/۵۸۵	مجموع
۰/۰۰۱	۹۰/۰۴۵	۳۷/۲۸۹	۱۱	۴۱۰/۱۷۶	بین گروه
		۰/۴۱۴	۱۸۱۲	۷۵۰/۳۷۳	درون گروه
			۱۸۲۳	۱۱۶۰/۵۵	مجموع
۰/۰۰۱	۸۵/۱۹۷	۳۸/۲۱۹	۱۱	۴۲۰/۴۰۵	بین گروه
		۰/۴۴۹	۱۸۱۲	۸۱۲/۸۵۱	درون گروه
			۱۸۲۳	۱۲۳۳/۲۵۶	مجموع

معناداری داشته است. در خصوص پسماندهای عفونی، مقدار F برابر ۵۵۱/۲۴۱ و سطح معناداری کم تر از ۰/۰۵ است که نشان دهنده وجود اختلاف معنادار بین میزان پسماند عفونی در بخش‌های مختلف

در مورد پسماند غیرعفونی، مقدار F برابر ۳۷۵۰/۷۶۱ و سطح معناداری کم تر از ۰/۰۵ بود. این بدان معنی است که میزان پسماند غیرعفونی در بخش‌های مختلف بیمارستان با یکدیگر تفاوت

بیمارستان است. در رابطه با پسماندهای شیمیایی و دارویی، مقدار F برابر ۹۰/۰۴۵ و سطح معناداری کم تر از ۰/۰۵ است و این بدان معنی است که میزان پسماند شیمیایی و دارویی در بخش‌های مختلف بیمارستان به طور معناداری با هم تفاوت دارد و آخرین مورد پسماند نوک تیز و بُرنده می‌باشد که مقدار F در آن برابر ۸۵/۱۹۷ و سطح معناداری کم تر از ۰/۰۵ است که نشان می‌دهد میزان پسماند نوک تیز و بُرنده در

بخش‌های مختلف بیمارستان به طور معناداری با یکدیگر متفاوت است. در رابطه با مدیریت این پسماندها با توجه به پاسخ پرسش‌شوندگان یک معیار ۱۰ نمره‌ای برای میزان نزدیکی مدیریت پسماندها با استانداردهای موجود ارزیابی شده است که نتایج آن در جداول (۲) تا (۵) نمایش داده شده است و معناداری آن در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول (۲): بررسی معناداری اختلاف مدیریت پسماند غیر عفونی با استانداردهای بیمارستان

بخش	میانگین	انحراف معیار	آماره t	سطح معناداری
اورژانس	۶/۰۵	۰/۷۳۱	۱۷/۳۱۵	۰/۰۰۱
داخلی	۹/۰۶	۰/۷۱۲	۱/۲۳	۰/۲۱۹
جراحی	۸/۹۷	۰/۷۲۳	۱/۱۳۹	۰/۳۲۲
اطفال	۵/۹۷	۰/۷۱۸	۱۲/۱۴۱	۰/۰۰۱
CCU	۸/۹۲	۰/۶۷۶	۱/۷۱۷	۰/۴۱۱
اعصاب و روان	۵/۹۷	۰/۶۹۵	۱۶/۶۳۸	۰/۰۰۱
اتاق عمل	۹	۰/۶۹۱	۱/۱۳۲	۰/۲
آزمایشگاه	۵/۹۳	۰/۶۹۱	۱۶/۵۲۴	۰/۰۰۱
رادیولوژی	۶/۰۱	۰/۶۹	۱/۳۱۱	۰/۰۰۱
درمانگاه	۶/۰۵	۰/۷۵۳	۱/۳۱۷	۰/۰۰۱
آشپزخانه	۶/۱۵	۰/۷۰۷	۱/۴۱۶	۰/۰۰۱
اداری	۵/۹۹	۰/۷۴۶	۱/۱۹۷	۰/۰۰۱

در رابطه با پسماندهای غیر عفونی بخش اورژانس با میانگین نمره ۶/۰۵ و سطح معناداری ۰/۰۰۱ ( $>0/05$ ) به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش داخلی با میانگین ۹/۰۶ و سطح معناداری ۰/۲۱۹ ( $<0/05$ ) دارای مدیریت پسماندها در حد استاندارد است. بخش جراحی نیز با میانگین ۸/۹۷ و سطح معناداری ۰/۳۲۲ ( $<0/05$ ) دارای مدیریت پسماندها در حد استاندارد است. بخش اطفال با میانگین ۵/۹۷ و سطح معناداری ۰/۰۰۱ ( $>0/05$ ) به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است.

است. بخش CCU با میانگین ۸/۹۲ و سطح معناداری ۰/۴۱۱ ( $>0/05$ ) دارای مدیریت پسماندها در حد استاندارد است. بخش اعصاب و روان با میانگین ۵/۹۷ و سطح معناداری ۰/۰۰۱ ( $>0/05$ ) به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش اتاق عمل با میانگین ۹ و سطح معناداری ۰/۲ ( $<0/05$ ) دارای مدیریت پسماندها در حد استاندارد است. بخش آزمایشگاه با میانگین ۵/۹۳ و سطح معناداری ۰/۰۰۱ ( $>0/05$ ) به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش رادیولوژی با میانگین ۶/۰۱ و

استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش اداری با میانگین ۵/۹۹ و سطح معناداری  $0/001 > (0/05)$  به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. نتایج مربوط به پسماندهای عفونی در جدول (۳) نمایش داده شده است.

سطح معناداری  $0/001 > (0/05)$  به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش درمانگاه با میانگین ۶/۰۵ و سطح معناداری  $0/001 > (0/05)$  به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش آشپزخانه با میانگین ۶/۱۵ و سطح معناداری  $0/001 > (0/05)$  به طور معناداری از

جدول (۳): بررسی معناداری اختلاف مدیریت پسماند عفونی با استانداردهای بیمارستان

بخش	میانگین	انحراف معیار	آماره t	سطح معناداری
اورژانس	۸/۹	۰/۶۷۹	۱۳/۸۲	۰/۰۰۱
داخلی	۸/۹۴	۰/۷۳۹	۱۱/۴۷	۰/۰۰۱
جراحی	۸/۹۷	۰/۷۱۸	۱۵/۶	۰/۰۰۱
اطفال	۹/۱۱	۰/۷۱۵	۱۶/۷۴	۰/۰۰۱
CCU	۸/۹۷	۰/۶۰۸	۱۷/۰۶	۰/۰۰۱
اعصاب و روان	۹/۰۲	۰/۶۷۶	۱۴/۴۱	۰/۰۰۱
اتاق عمل	۸/۸۸	۰/۷۳۶	۱۱/۴۳	۰/۰۰۱
آزمایشگاه	۸/۹۸	۰/۶۷۶	۱۲/۴۲	۰/۰۰۱
درمانگاه	۸/۹۱	۰/۷۰۳	۱۴/۶۶	۰/۰۰۱

$0/001 > (0/05)$  به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش اتاق عمل با میانگین ۸/۸۸ و سطح معناداری  $0/001 > (0/05)$  به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش آزمایشگاه با میانگین ۸/۹۸ و سطح معناداری  $0/001 > (0/05)$  به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش درمانگاه با میانگین ۸/۹۱ و سطح معناداری  $0/001 > (0/05)$  به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. نتایج مربوط به پسماندهای شیمیایی و دارویی در جدول (۴) نمایش داده شده است.

در رابطه با پسماندهای عفونی بخش اورژانس با میانگین نمره ۸/۹ و سطح معناداری  $0/001 > (0/05)$  به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش داخلی با میانگین ۸/۹۴ و سطح معناداری  $0/001 > (0/05)$  به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش جراحی با میانگین ۸/۹۷ و سطح معناداری  $0/001 > (0/05)$  به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش اطفال با میانگین ۹/۱۱ و سطح معناداری  $0/001 > (0/05)$  به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش CCU با میانگین ۸/۹۷ و سطح معناداری  $0/001 > (0/05)$  به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش اعصاب و روان با میانگین ۹/۰۲ و سطح معناداری

جدول (۴): بررسی معناداری اختلاف مدیریت پسماند شیمیایی و دارویی با استانداردهای بیمارستان

بخش	میانگین	انحراف معیار	آماره t	سطح معناداری
اورژانس	۶/۰۹	۰/۶۹	۱۲/۸۲	۰/۰۰۱
داخلی	۶/۰۲	۰/۷۰۴	۱۳/۷۱	۰/۰۰۱
جراحی	۶/۰۷	۰/۷۱	۱۵/۵۲	۰/۰۰۱
اطفال	۶/۰۵	۰/۷۶۲	۱۷/۸۴	۰/۰۰۱
CCU	۶/۰۵	۰/۶۵۹	۱۱/۴۹	۰/۰۰۱
اعصاب و روان	۶/۱	۰/۷۰۷	۱۱/۷۱	۰/۰۰۱
اتاق عمل	۵/۹۹	۰/۷۰۹	۱۳/۰۲	۰/۰۰۱
آزمایشگاه	۵/۹۴	۰/۷۳	۱۵/۵۱	۰/۰۰۱
درمانگاه	۵/۹۸	۰/۷۵	۱۱/۳۴	۰/۰۰۱

است. بخش اعصاب و روان با میانگین ۶/۱ و سطح معناداری ۰/۰۰۱ ( $>0/05$ ) به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش اتاق عمل با میانگین ۵/۹۹ و سطح معناداری ۰/۰۰۱ ( $>0/05$ ) به‌طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش آزمایشگاه با میانگین ۵/۹۴ و سطح معناداری ۰/۰۰۱ ( $>0/05$ ) از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش درمانگاه با میانگین ۵/۹۸ و سطح معناداری ۰/۰۰۱ ( $>0/05$ ) به‌طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. نتایج مربوط به پسماندهای نوک تیز و برنده در جدول (۵) نمایش داده شده است.

در رابطه با پسماندهای شیمیایی و دارویی بخش اورژانس با میانگین نمره ۶/۰۹ و سطح معناداری ۰/۰۰۱ ( $>0/05$ ) به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش داخلی با میانگین ۶/۰۲ و سطح معناداری ۰/۰۰۱ ( $>0/05$ ) به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش جراحی با میانگین ۶/۰۷ و سطح معناداری ۰/۰۰۱ ( $>0/05$ ) به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش اطفال با میانگین ۶/۰۵ و سطح معناداری ۰/۰۰۱ ( $>0/05$ ) به‌طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش CCU با میانگین ۶/۰۵ و سطح معناداری ۰/۰۰۱ ( $>0/05$ ) به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر

جدول (۵): بررسی معناداری اختلاف مدیریت پسماند نوک تیز و بُرنده با استانداردهای بیمارستان

بخش	میانگین	انحراف معیار	آماره t	سطح معناداری
اورژانس	۷/۹۸	۰/۶۸۵	۱/۵۳	۰/۳
داخلی	۸/۰۶	۰/۷۱۲	۱/۲۵	۰/۹۴
جراحی	۷/۹۷	۰/۷۲۳	۱/۶۶	۰/۵۱
اطفال	۷/۹۷	۰/۶۳	۱/۸۲	۰/۱۹
CCU	۷/۹۲	۰/۶۷۶	۱/۱۱	۰/۲۴
اعصاب و روان	۸/۰۷	۰/۶۹۱	۱/۵۸	۰/۱۳
اتاق عمل	۸	۰/۶۹۱	۱/۹۳	۰/۵
آزمایشگاه	۷/۹۳	۰/۷۴۳	۸/۲۲	۰/۰۰۱
درمانگاه	۷/۹۵	۰/۶۷۹	۱/۹۶	۰/۶۸

است. بخش اتاق عمل با میانگین ۸ و سطح معناداری ۰/۵ (< ۰/۰۵) دارای مدیریت پسماندهای نوک تیز و برنده در حد استاندارد است. بخش آزمایشگاه با میانگین ۷/۹۳ و سطح معناداری ۰/۰۰۱ (> ۰/۰۵) به طور معناداری از استانداردهای مربوطه ضعیف‌تر است. بخش درمانگاه با میانگین ۷/۹۵ و سطح معناداری ۰/۶۸ (< ۰/۰۵) دارای مدیریت پسماندهای نوک تیز و برنده در حد استاندارد است.

از آنجایی که درک الگوهای زمانی تولید انواع پسماندها می‌تواند به برنامه‌ریزی مؤثرتر و مدیریت بهینه‌تر آنها کمک کند در جدول (۶) نتایج آزمون تحلیل واریانس پسماندها در فصول مختلف سال نشان داده شده است. این آزمون بررسی می‌کند که آیا بین میزان تولید انواع پسماندها در طول فصول مختلف سال، تفاوت معناداری وجود دارد یا خیر.

در رابطه با پسماندهای نوک تیز و برنده، بخش اورژانس با میانگین نمره ۷/۹۸ و سطح معناداری ۰/۳ (< ۰/۰۵) دارای مدیریت پسماندهای نوک تیز و برنده در حد استاندارد است. بخش داخلی با میانگین ۸/۰۶ و سطح معناداری ۰/۹۴ (< ۰/۰۵) دارای مدیریت پسماندهای نوک تیز و برنده در حد استاندارد است. بخش جراحی با میانگین ۷/۹۷ و سطح معناداری ۰/۵۱ (< ۰/۰۵) دارای مدیریت پسماندهای نوک تیز و برنده در حد استاندارد است. بخش اطفال با میانگین ۷/۹۷ و سطح معناداری ۰/۱۹ (< ۰/۰۵) دارای مدیریت پسماندهای نوک تیز و برنده در حد استاندارد است. بخش CCU با میانگین ۷/۹۲ و سطح معناداری ۰/۲۴ (< ۰/۰۵) دارای مدیریت پسماندهای نوک تیز و برنده در حد استاندارد است. بخش اعصاب و روان با میانگین ۸/۰۷ و سطح معناداری ۰/۱۳ (< ۰/۰۵) دارای مدیریت پسماندهای نوک تیز و برنده در حد استاندارد

جدول (۶): نتایج آزمون تحلیل واریانس پسماندها در فصول مختلف

معناداری	F	میانگین مجذور	درجه آزادی	مجموع مجذور		
۰/۰۰۱	۱۳/۰۵۲	۱۱۱۵/۸۱۳	۳	۳۳۴۷/۴۳۸	بین گروه	
		۸۵/۴۸۹	۱۸۲۰	۱۵۵۵۸۹/۳۶۲	درون گروه	پسماند غیر عفونی
			۱۸۲۳	۱۵۸۹۳۶/۷۹۹	مجموع	
۰/۰۰۱	۸۱/۰۳۳	۵۵۷۰/۱۸۶	۳	۱۶۷۱۰/۵۵۸	بین گروه	
		۶۸/۷۴	۱۸۲۰	۱۲۵۱۰۶/۰۲۷	درون گروه	پسماند عفونی
			۱۸۲۳	۱۴۱۸۱۶/۵۸۵	مجموع	
۰/۰۰۱	۴/۹۲۳	۳/۱۱۴	۳	۹/۳۴۲	بین گروه	
		۰/۶۳۳	۱۸۲۰	۱۱۵۱/۲۰۸	درون گروه	شیمیایی و دارویی
			۱۸۲۳	۱۱۶۰/۵۵۰	مجموع	
۰/۰۰۱	۱/۰۹۷	۰/۷۴۲	۳	۲/۲۲۶	بین گروه	
		۰/۶۷۶	۱۸۲۰	۱۲۳۱/۰۳	درون گروه	نوک تیز و برنده
			۱۸۲۳	۱۲۳۳/۲۵۶	مجموع	

بین میزان تولید پسماند غیر عفونی در فصول مختلف تفاوت معناداری وجود دارد. در مورد پسماند عفونی،

در مورد پسماند غیر عفونی، مقدار F برابر ۱۳/۰۵۲ با سطح معناداری ۰/۰۰۱ است. این نشان می‌دهد که

میزان تولید پسماند نوک تیز و برنده در فصول مختلف تفاوت معناداری وجود دارد. در مجموع، نتایج آزمون تحلیل واریانس نشان می‌دهد که بین میزان تولید انواع پسماندهای بیمارستانی در فصول مختلف سال، تفاوت معناداری وجود دارد.

به منظور بررسی خط سیر تولید پسماندها در بیمارستان مورد مطالعه از رگرسیون خطی استفاده شده است که نتایج مربوط به تحلیل واریانس آن در جدول (۷) نمایش داده شده است.

جدول (۷): تحلیل واریانس رگرسیون خطی پسماندهای بیمارستان

معناداری	F	میانگین مجذور	درجه آزادی	مجموع مجذور	
۰/۰۰۱	۸/۱۲۱	۵۰۰۷/۱۹۱	۴	۲۰۰۲۸/۷۶۳	رگرسیون
		۶/۱۱۲	۱۸۱۹	۱/۱۱۲	باقیمانده‌ها
			۱۸۲۳	۲۰۰۲۹/۸۷۵	مجموع

خط رگرسیون را دارا می‌باشند و لذا ضرایب مربوطه در جدول (۸) نمایش داده شده است.

جدول (۸): ضرایب رگرسیون خطی پسماندهای بیمارستان

معناداری	t	ضریب بتا	خطای معیار	ضریب	متغیر
۰/۲۱۵	۱/۱۵۸			-۱/۹۳۲	
۰/۰۰۱	۱۲/۱۶۲	۱/۲۶۲	۰/۷۱۸	۲/۸۷	پسماند غیر عفونی
۰/۰۰۱	۱۷/۱۸۴	۲/۲۹۶	۰/۲۶۹	۱/۲۵	پسماند عفونی
۰/۳	۱/۲۳۷	۰/۲۰۳	۰/۱۱۸	۰/۸۳	شیمیایی و دارویی
۰/۲	۱/۰۲۸	۰/۲۶۵	۰/۱۶۷	۰/۴۵	نوک تیز و برنده

پسماند بیمارستان در آینده تأثیرگذار است. در مقابل، پسماند شیمیایی و دارویی با ضریب بتا ۰/۲۰۳ و آماره  $t$ ، ۱/۲۳۷ در سطح معناداری ۰/۳ (بیش‌تر از ۰/۰۵) و پسماند نوک تیز و برنده با ضریب بتا ۰/۲۶۵ و آماره  $t$  برابر با ۱/۰۲۸ دارای سطح معناداری ۰/۲ تأثیر معناداری بر پسماند بیمارستان ندارند.

مقدار  $F$  برابر ۸۸/۰۳۳ با سطح معناداری ۰/۰۰۱ است. این بدان معنی است که بین میزان تولید پسماند عفونی در فصول مختلف تفاوت معناداری وجود دارد. در مورد پسماند شیمیایی و دارویی، مقدار  $F$  برابر ۴/۹۲۳ با سطح معناداری ۰/۰۰۱ است. این نشان می‌دهد که بین میزان تولید پسماند شیمیایی و دارویی در فصول مختلف تفاوت معناداری وجود دارد. در مورد پسماند نوک تیز و برنده، مقدار  $F$  برابر ۱/۰۹۷ با سطح معناداری ۰/۰۰۱ است. این بدان معنی است که بین

با توجه به سطح معناداری کم‌تر از ۰/۰۵ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که داده‌های موجود قابلیت استفاده در

بر اساس جدول (۸) ضرایب رگرسیون خطی پسماندهای بیمارستان، متغیر مستقل پسماند غیر عفونی با ضریب بتا ۱/۲۶۲ و آماره  $t$  برابر با ۱۲/۱۶۲ به طور معناداری (سطح معناداری  $0/001 > 0/05$ ) بر میزان پسماند بیمارستان در آینده تأثیر دارد. همچنین، پسماند عفونی با ضریب بتا ۲/۲۹۶ و آماره  $t$  برابر ۱۷/۱۸۴ نیز به طور معناداری (سطح معناداری  $0/001 > 0/05$ ) بر

## نتایج و بحث

تحلیل داده‌های این پژوهش نشان داد که میزان تولید انواع پسماندهای بیمارستانی در بیمارستان امام خمینی (ره) شهر ارومیه طی فصول مختلف سال دچار نوسان قابل توجهی است. بیش‌ترین حجم پسماندهای غیرعفونی، عفونی، شیمیایی-دارویی و نوک‌تیز و برنده در فصل بهار تولید شد؛ حال آنکه تابستان کم‌ترین مقادیر را به خود اختصاص داد و در پاییز مجدداً روند افزایشی مشاهده گردید. فصل زمستان نیز در بیش‌تر گروه‌های پسماند، الگوی میانی و نسبتاً ثابت‌تری داشت. چنین نوساناتی غالباً با تغییرات تعداد مراجعان، تنوع خدمات بالینی، و شیوع بیماری‌های فصلی مرتبط است؛ روندی که در مطالعات مشابه ملی و بین‌المللی نیز گزارش شده و به‌ویژه در ماه‌های بهار و پاییز با افزایش بار بیماری‌ها هم‌زمان است. بررسی توزیع پسماند در بخش‌های مختلف بیمارستان نشان داد که الگوی تولید پسماند میان بخش‌ها یکسان نبوده و شدت فعالیت‌های درمانی عامل مهمی در این تفاوت‌هاست. بخش‌هایی نظیر اورژانس، جراحی، CCU، اتاق عمل و آزمایشگاه بیش‌ترین سهم را در تولید پسماندهای عفونی و نوک‌تیز داشتند که این امر با ماهیت تهاجمی فعالیت‌ها، حجم بالای اعمال جراحی و استفاده گسترده از تجهیزات یک‌بارمصرف کاملاً قابل انتظار است. در مقابل، بخش‌هایی مانند درمانگاه، رادیولوژی، واحدهای اداری و آشپزخانه عمدتاً پسماندهای غیرعفونی تولید کردند که بیانگر کم‌خطر بودن فرآیندهای رایج این واحدها است. نتایج آزمون تحلیل واریانس اختلاف معناداری را میان بخش‌ها در تولید پسماندهای غیرعفونی، شیمیایی-دارویی و نوک‌تیز نشان داد و این موضوع ضرورت

مدیریت هدفمند و بخش‌محور پسماند را برجسته می‌کند. به‌عبارت دیگر، یک برنامه مدیریت یکسان برای همه بخش‌ها نمی‌تواند کارآمد باشد و لازم است مداخلات مدیریتی متناسب با سطح ریسک، نوع فعالیت و میزان تولید پسماند هر بخش طراحی شود. همچنین تحلیل رگرسیون خطی نشان داد که پسماندهای غیرعفونی و عفونی بیش‌ترین نقش را در تعیین حجم کل پسماند بیمارستان دارند، در حالی که سهم پسماندهای شیمیایی-دارویی و نوک‌تیز در پیش‌بینی مقدار کل پسماند معنادار نبود. این یافته تأکید می‌کند که تمرکز مدیریتی بر کنترل و کاهش تولید پسماندهای غیرعفونی و عفونی نه تنها بار اصلی سیستم مدیریت پسماند را کاهش می‌دهد، بلکه می‌تواند موجب صرفه‌جویی اقتصادی و کاهش بار زیست‌محیطی شود. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که طراحی یک سیستم مدیریت پسماند کارآمد در بیمارستان مستلزم رویکردی جامع، یک‌پارچه و مبتنی بر ویژگی‌های هر بخش است. تقویت آموزش کارکنان، بهبود فرآیند تفکیک در مبدأ، توسعه شاخص‌های پایش، کنترل مصرف اقلام یک‌بارمصرف، و افزایش هماهنگی بین واحدهای مختلف از جمله اقداماتی است که می‌تواند اثربخشی سیستم مدیریت پسماند بیمارستان را بهبود بخشد. اتخاذ این راهبردها علاوه بر کاهش حجم پسماندهای پرخطر، می‌تواند در ارتقای ایمنی کارکنان، حفظ محیط زیست و بهبود کارایی عملیات مدیریت پسماند نقش اساسی ایفا کند.

## تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تعارض منافی برای اعلام ندارند.

## منابع

- Tehran. M.Sc. Thesis, Yazd University. (in Persian)
- [11] Yong, Z., Gang, X., Guanxing, W., Tao, Z., Dawei, J., 2008, Medical waste management in China: A case study of Nanjing. *Waste Management*, 29(4), 1376.
- [12] Assamoi, B., Lawryshyn, Y., 2012, The environmental comparison of landfilling vs. incineration of MSW accounting for waste diversion. *Waste Management*, 32(5), 1019.
- [13] Aslani, F., Amin Salehi, F., Ghorbaninia, Z., 2022, Presenting solutions for hospital waste engineering management in the context of the COVID-19 pandemic (Motamedi Hospital, Garmsar). 5th International Conference on Interdisciplinary Studies in Management and Engineering, University of Tehran, 4 July, Tehran, Iran. (in Persian)
- [14] Malasius, M.E.G.G., Alin, J., Dollery, B., 2020, Willingness to participate in solid waste management amongst residents of Sembulan Tengah Water Village in Sabah, Malaysia. *Journal of Asian Scientific Research*, 10(1), 17.
- [15] Trinh, L.T.K., Hu, A.H., Pham-Phu, S.-T., 2021, Situation, challenges, and solutions of policy implementation on municipal waste management in Vietnam toward sustainability. *Sustainability*, 13(6), 3517.
- [16] Taghipour, H., Mosaferi, M., 2009, Characterization of medical waste from hospitals in Tabriz, Iran. *Science of The Total Environment*, 407(5), 1527.
- [17] Al-Khatib, I.A., Sato, C., 2009, Solid health care waste management status at health care centers in the West Bank–Palestinian Territory. *Waste Management*, 29(8), 2398.
- [18] Pan American Health Organization, 2022, Safe management of healthcare waste: Training manual (Available online: <https://www.paho.org/en/documents/safe-management-healthcare-waste-training-manual>)
- [19] World Health Organization, 2014, Safe management of wastes from health-care activities (2<sup>nd</sup> Edition). (Available online: [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/85349/9789241548564\\_eng.pdf](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/85349/9789241548564_eng.pdf).)
- [20] Kalantary, R.R., Jamshidi, A., Mofrad, M. M.G., Heidari N., Fallahizadeh S., Arani M.H., Torkashvand, J., 2021, Effect of COVID-19 pandemic on medical waste management: A
- [1] Ebrahimi, S.A., 2016, Evaluation of hospital waste management methods using VIKOR fuzzy and training needs assessment best method waste management in Loghman Hakim Hospital. M.Sc. Thesis, Tehran Payame Noor University. (in Persian)
- [2] Kumar, R., Shaikh, B.T., Somrongthong, R., Chapman, R.S., 2015, Practices and challenges of infectious waste management: A qualitative descriptive study from tertiary care hospitals in Pakistan. *Pakistan Journal of Medical Sciences*, 31(4), 795.
- [3] Saeidi Fard, M., 2015, Operational waste management program (Case study: Dr. Masih Daneshvari Hospital, Tehran). M.Sc. Thesis, North Tehran Branch, Islamic Azad University. (in Persian)
- [4] Giusti, L., 2009, A review of waste management practices and their impact on human health. *Waste Management*, 29(8), 2227.
- [5] Anvari, N., Asgari, H.R., Latifi, A., 2020, Investigation of hospital waste status in Tehran: Case study of Baqiatollah Hospital (AJ). International Conference on Civil, Architecture, Development and Reconstruction of Urban Infrastructure in Iran, 17 July, Tehran, Iran. (in Persian)
- [6] Asadi, S., 2019, Environmental assessment of microbial waste in private hospitals of North Tehran Health Center. M.Sc. Thesis, Shahid Rajaei Teacher Training University. (in Persian)
- [7] Hassan Jani, S., 2020, Study of hospital and dental clinic waste management in Gorgan County in 2019. M.Sc. Thesis, Baharan Higher Education Institute. (in Persian)
- [8] Skandarpour, A., 2021, Study of waste management status and ranking of waste disposal methods in public and private hospitals of Shiraz. M.Sc. Thesis, Zand Higher Education Institute, Shiraz. (in Persian)
- [9] Nazari, Y., 2021, Identification and risk assessment of waste management hazards and control measures in Shahid Modarres Hospital, Saveh County. M.Sc. Thesis, Energy Higher Education Institute. (in Persian)
- [10] Mohseni, S.M., 2022, Study of hospital waste; Case study: Shahid Tajrish Hospital,

case study. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19, 831.

[21] Eker, H.H., Bilgili, M.S., 2011, Statistical analysis of waste generation in healthcare services: A case study. *Waste Management & Research*, 29(8), 791.

[22] Kaposi, A., Nagy, A., Gomori, G., Kocsis, D., 2024, Analysis of healthcare waste and factors affecting the amount of hazardous healthcare waste in a university hospital. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26, 1169.

[23] Ali, M., Wang, W., Chaudhry, N., Geng, Y., 2017, Hospital waste management in developing countries: A mini review. *Waste Management & Research*, 35(6), 581.

[24] Montgomery, D.C., 2017, *Design and analysis of experiments*. 9<sup>th</sup> Edition, Wiley.