



فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست



دوره ۳، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴



فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست

عنوان	فهرست	صفحه
۱. توسعه مدل تلفیقی CA-LR-Markov-Fuzzy جهت مکان‌یابی بهینه توسعه شهری پایدار: رویکرد مبتنی بر معیارهای محیط زیستی در استان گیلان (میثم جعفری، دلارام سیکارودی، سحر غیاث)	۱.....	
۲. بررسی رویکردهای حقوقی و مدیریتی مقابله با بحران آلودگی هوا در کلان‌شهرها (سمانه محمد سلیمانی، زهرا جوهری)	۲۰.....	
۳. آینده‌نگاری پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران (حسین حمزوی، سیده مرضیه حسینی، بنفشه فتوت، حسین عابدی)	۳۳.....	
۴. بررسی تاثیر مداخلات آموزشی و فاکتورهای جوایمی در بهبود درک ریسک موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع و کار در فضای بسته در کارگران شاغل در سیلوی نگهداری غلات (فرزین صیاد قربانی شیرین، ساناز حسینی)	۵۵.....	
۵. اثربخشی آموزش اخلاق محیط زیستی به روش پروژه بر مسئولیت پذیری و نگرش به محیط زیست دانش آموزان پسر پایه پنجم ناحیه ۳ اصفهان (ملیحه شیرازی، نصرالله قشقایی زاده)	۶۹.....	
۶. ارزیابی ریسک مواجهه با آلاینده‌های هوا در فضاهای ورزشی بزرگ مقیاس روباز در شهر تهران (رسول صادقی، هومن بهمن‌پور، فراهم امین شرعی)	۸۳.....	



فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست

مدیریت و حقوق محیط زیست

ISSN: 3041-8577

سال سوم: دوره سوم، شماره ۱

بهار ۱۴۰۴



دانشگاه آزاد اسلامی

فصلنامه علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

صاحب امتیاز: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

مدیر مسئول: دکتر مژگان احمدی ندوشن (دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان))

سر دبیر: دکتر سید علی جوزی (استاد تمام دانشگاه آزاد اسلامی تهران شمال)

اعضای هیات تحریریه:

نعمت اله خراسانی (استاد تمام دانشگاه تهران)

مسعود راعی (استاد تمام دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد)

کیومرث کلانتری (استاد تمام دانشگاه مازندران)

محمودرضا همای (استاد تمام دانشگاه صنعتی اصفهان)

عاطفه چمنی (دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان))

لیلا رئیسی (دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان))

مریم مروتی (دانشیار دانشگاه اردکان)

علیرضا آرش پور (دانشیار دانشگاه اصفهان)

کارشناسان نشریه: سمانه محمدسلیمانی - زهرا جوهری

ویراستار: زهرا جوهری

ناشر: معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

نشانی: اصفهان، خیابان جی، سه راه کارخانه قند، ارغوانیه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

ساختمان اندیشه، دفتر مجله، اتاق ۳۲۸ - تلفن: ۰۳۱۳۵۰۰۲۲۵۹ / صندوق پستی: ۸۱۵۹۵-۱۵۸

الگوی تهیه مقاله برای فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست

نویسنده اول ۱*، نویسنده دوم ۲، نویسنده سوم ۳،

نویسنده چهارم ۴، نویسنده پنجم ۵

۱- عنوان نویسنده اول (وابستگی سازمانی نویسندگان) (Affiliation)

۲- عنوان نویسنده دوم (وابستگی سازمانی نویسندگان) (Affiliation)

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

چکیده

در این مقاله، الگوی تهیه یک مقاله برای فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست شرح داده می‌شود. شیوه قالب‌بندی مقاله، بخش‌های مختلف آن، نوع قلم و اندازه آن، مشخص شده است. چکیده مقاله در یک پاراگراف تهیه شود و شامل ۲۰۰-۳۰۰ کلمه باشد. چکیده مقاله باید شامل زمینه و هدف، مواد و روش‌ها، نتایج، بحث و نتیجه‌گیری باشد و بطور واضح نتایج فعالیت پژوهشی انجام شده را بیان کند.

کلمات کلیدی: حداکثر پنج کلمه به عنوان کلمات کلیدی انتخاب شود و و آن‌ها را با ویرگول از هم جدا کنید. این کلمات باید شامل موضوعات اصلی و فرعی مقاله باشد.

بخش‌های مختلف مقاله

مقاله باید شامل این بخش‌ها باشد: چکیده، کلمات کلیدی، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج، بحث و نتیجه‌گیری و منابع. سایر بخش‌ها همچون سپاسگزاری، ضمایم و زیرنویس‌ها اختیاری است. مقالات باید طبق دستورالعمل زیر تایپ و از طریق سایت مجله به آدرس <https://sanad.iau.ir/journal/jeml> بعد از ثبت نام در سایت ارسال گردد.

مقدمه

برای نگارش مقاله از نرم‌افزار Microsoft Office Word استفاده شود. تمام فرمت‌های مورد نیاز برای قسمت‌های مقاله در این نوشتار تعریف شده است و نویسندگان لازم است فرمت مناسب را برای هر بخش انتخاب کنند. خواهشمند است برای تهیه مقاله به موارد زیر دقت کنید:

- تعداد صفحات مقاله حداکثر ۲۰ صفحه می‌باشد.
- در بخش مقدمه، دانش موجود درباره موضوع و مبانی نظری آن، ضرورت انجام تحقیق و هدف مطالعه مشخص شود.
- مقاله به صورت تک ستونی آماده شود.
- اندازه و نوع قلم‌های فارسی برای هر یک از بخش‌های مقاله در جدول ۱ آورده شده است. برای قلم لاتین از Times New Roman استفاده کنید.

- در صورت نیاز به درج پاورقی، همهٔ موارد فارسی به صورت راست‌چین با B Nazanin و اندازه ۱۰ و پاورقی‌های انگلیسی به صورت چپ‌چین با قلم Times New Roman اندازه ۸ نوشته شوند.
- عنوان و چکیده مقاله و متن جداول، اشکال و نمودارها به زبان فارسی و انگلیسی تهیه شود.

جدول ۱- اندازه و نوع آن

Table 1-

اندازه قلم	نام قلم	مکان استفاده شده
۱۶	B Titr پررنگ	عنوان مقاله
۱۲	B Nazanin	نام نویسندگان
۱۴	B Titr پررنگ	تیترهای اصلی
۱۲	B Nazanin پررنگ	تیترهای فرعی
۱۲	B Nazanin	متن چکیده
۱۱	B Nazanin	کلمات کلیدی
۱۰	B Nazanin پررنگ	عناوین اشکال و جداول
۱۰	B Nazanin	متن اشکال و جداول
۱۲	B Nazanin	متن اصلی مقاله
۱۶	Times New Roman	عنوان انگلیسی
۱۲	Times New Roman	نام نویسندگان انگلیسی
۱۰	Times New Roman	متن چکیده و کلمات انگلیسی
۱۰	Times New Roman	منابع

مواد و روش‌ها

در این بخش، نوع مطالعه، جامعه آماری و نمونه مورد مطالعه، روش نمونه‌گیری، ابزار گردآوری داده‌ها، روش کار و روش‌های آماری به دقت بیان شود.

- در صورت استفاده از روش‌های تحقیق شناخته شده، ذکر منبع کافی است؛ اما در صورت استفاده از روش‌های تحقیق جدید، باید اطلاعات کافی داده شود، به طوری که محقق دیگر بتواند براساس اطلاعات ارائه شده، آن روش را اجرا کند.

نتایج

در این قسمت، از متن، جدول، نمودار و عکس به تناسب برای بیان نتایج استفاده شود.

اشکال و جداول

اشکال و جداول باید دارای عنوان فارسی و انگلیسی باشند. عنوان شکل‌ها در پایین شکل و عنوان جدول‌ها در بالای جدول قرار می‌گیرند. در صورتی که از شکل‌ها یا جدول‌های دیگر منابع استفاده می‌کنید، مرجع را در عنوان شکل یا جدول ذکر کنید.



شکل ۱- نمودار مقایسه‌ای

Fig. 1-

جدول ۲- گروه‌های آموزشی

Table 2-

عنوان	ریاضی	فیزیک	شیمی
گروه ۱	۱۹	۲۰	۱۵
گروه ۲	۱۹	۱۸	۲۰
گروه ۳	۱۸	۱۶	۱۸

بحث

یافته‌های مهم تحقیق براساس اهداف ویژه آن با رعایت ترتیب منطقی، ذکر و پیرامون آن با استناد به موارد همسان و دگرسان در متون مرتبط بحث شود. اگر فرضیاتی در مطالعه مطرح شده، تایید و یا رد آن مورد بحث قرار گیرد.

نتیجه گیری

نتیجه گیری به صورت روشن و در حد یافته‌های تحقیق و با توجه به محدودیت‌های مطالعه بیان شود.

مراجع

استندهای انتهای متن، همگی به صورت انگلیسی نوشته شود. تأکید می شود، از ترجمه شخصی عناوین منابع فارسی اکیداً خودداری نموده و معادل انگلیسی استناد منابع فارسی را از سایت منبع بردارید. در انتهای استناد منابعی که به زبان فارسی منتشر شده است، از عبارت [In Persian] استفاده نمایید.

روش منبع نویسی در این نشریه مطابق با الگوی APA است. برای اطلاع از نحوه منبع نویسی به این روش این راهنما را مطالعه نمایید.

مثال:

Ayoobi, A. W., Ahmadi, H., Inceoglu, M., & Pekkan, E. (2022). Seasonal Impacts of Buildings' Energy Consumption on the Variation and Spatial Distribution of Air Pollutant over Kabul City: Application of Sentinel—5P TROPOMI Products. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 15(1), 73-83.

*توضیحات مهم:

- ✓ مسئولیت صحت مطالب چاپ شده از دیدگاه علمی، اخلاقی و حقوقی به عهده نویسنده (گان) مقاله است.
- ✓ مجله حق رد، قبول، اصلاح، ویرایش و خلاصه نمودن را برای خود محفوظ می دارد.
- ✓ تصمیم گیری نهایی در مورد مقالات در شورای نویسندگان مجله و پس از ارزیابی توسط داوران صورت می پذیرد.
- ✓ به اطلاع کلیه اساتید و دانشجویان محترم می رساند پس از بررسی مقاله شما توسط داوران، اصلاحات به صورت بازنگری کلی و جزئی برای نویسنده مسئول ارسال می گردد. پس از وصول و انجام اصلاحات فایل ویرایش شده باید مجدداً از طریق سامانه بارگزاری شود تا تصمیم نهایی در مورد پذیرش یا عدم پذیرش مقاله انجام شود.

Template for Preparing a Journal of Environmental Management and Laws

*First author*¹, second author²*

1- *The title of the first author (authors' organizational affiliation (Affiliation))*

2- *The title of the second author (authors' organizational affiliation (Affiliation))*

**Corresponding Author:*

Abstract:

Basic guidelines for preparation of an Environmental Law and Management Quarterly are presented in this paper. This document contains information about formats, fonts, the styles and sizes. All required styles such as titles, subtitles, abstract, and body are predefined. Just select the appropriate style with respect to different sections of a paper. The abstract part is between 200 to 300 words in one paragraph. It should concisely state what was done, how it was done, why, and what is the primary result and its significance. The abstract cannot contain details, figures, tables, equations, or references.

Keywords: Up to 5 keywords shall be provided as index terms.



Journal of Environmental
Management and Law

فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست

<https://sanad.iau.ir/en/Journal/jeml>

Development of an Integrated CA-LR-Markov-Fuzzy Model for Optimal Site Selection of Sustainable Urban Development: An Environmental Criteria-Based Approach in Gilan Province

Meisam Jafari^{*1,2}, Delaram Sikarudi^{1,2}, Sahar Ghiyas²

¹ Human Environment and Sustainable Development Research Center, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran

² Department of Environment, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran

*Corresponding Author: meisamjafari@iau.ac.ir

Original Paper

Received: 2024.12.05

Accepted: 2025.05.22

Keywords:

Sustainable urban development,
Environmental criteria,
Integrated modeling,
Optimal site selection,
Cellular automata,
Gilan Province.

Abstract

Unbalanced urban expansion represents one of the most critical environmental sustainability threats of the 21st century, imposing detrimental impacts on natural ecosystems and biodiversity. This study aimed to develop an innovative framework for optimal site selection of sustainable urban development based on environmental criteria in Gilan Province, Iran. An advanced integrated CA-LR-Markov-Fuzzy model incorporating four modeling approaches—cellular automata, logistic regression, Markov chain, and fuzzy logic—was designed and implemented. Following identification of 23 significant environmental criteria across four categories (physiographic, ecological, hydrological, and climatic-social), criteria weighting was conducted using Analytic Hierarchy Process (AHP) and expert consultation involving 40 specialists. Model validation demonstrated exceptional performance with ROC=0.848, Kappa coefficient $\kappa=0.79$, and overall accuracy of %84. Site selection results classified 18.3% of the provincial area (2,570 km²) as highly suitable, 24.7% (3,468 km²) as suitable, and 31.2 (4,381 km²) as conservation zones. Model predictions indicate a 46% increase in urban development by 2037. Comparative analysis of three scenarios—conservation, physical, and socio-economic—revealed that the physical scenario with a score of 0.780.780.78 provides optimal balance between development and environmental protection. This research provides a comprehensive scientific framework for evidence-based decision-making in sustainable urban planning.



Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the

توسعه مدل تلفیقی CA-LR-Markov-Fuzzy جهت مکان‌یابی بهینه توسعه شهری پایدار: رویکرد مبتنی بر معیارهای محیط زیستی در استان گیلان

میثم جعفری^{۱*}، دلارام سیکارودی^{۲،۱}، سحر غیاث^۲

۱- مرکز تحقیقات محیط زیست انسانی و توسعه پایدار، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- گروه مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: meisamjafari@iau.ac.ir

نوع مقاله:	چکیده
علمی-پژوهشی	گسترش شهری غیرمتوازن به‌عنوان یکی از بحرانی‌ترین تهدیدات پایداری محیط زیستی قرن بیست‌ویکم، اثرات مخربی بر اکوسیستم‌های طبیعی و تنوع زیستی وارد می‌آورد. این پژوهش با هدف توسعه چارچوب نوآورانه مکان‌یابی بهینه توسعه شهری پایدار مبتنی بر معیارهای محیط زیستی در استان گیلان انجام گرفت. مدل تلفیقی پیشرفته CA-LR-Markov-Fuzzy شامل چهار رویکرد مدلسازی اتوماتای سلولی، رگرسیون لجستیک، زنجیره مارکوف و منطق فازی طراحی و پیاده‌سازی شد. پس از شناسایی ۲۳ معیار محیط زیستی حائز اهمیت در چهار دسته فیزیوگرافی، اکولوژیک، هیدرولوژیک و اقلیمی-اجتماعی، وزن‌دهی معیارها با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و نظرسنجی ۴۰ متخصص انجام پذیرفت. نتایج اعتبارسنجی مدل تلفیقی عملکرد فوق‌العاده مطلوبی با شاخص $ROC=0.848$ ، ضریب کاپای $k=0.79$ و دقت کلی ۸۴٪ نشان داد. براساس نتایج مکان‌یابی، ۱۸.۳٪ از مساحت استان (۲۵۷۰ کیلومتر مربع) بسیار مناسب، ۲۴.۷٪ (۳۴۶۸ کیلومتر مربع) مناسب و ۳۱.۲٪ (۴۳۸۱ کیلومتر مربع) به‌عنوان مناطق حفاظتی طبقه‌بندی گردید. پیش‌بینی‌های مدل افزایش ۴۶٪ توسعه شهری تا سال ۲۰۳۷ را نشان می‌دهد. مقایسه سه سناریوی حفاظتی، فیزیکی و اقتصادی-اجتماعی نشان داد که سناریوی فیزیکی با امتیاز ۰.۷۸ بهترین تعادل میان توسعه و حفاظت محیط‌زیست را ارائه می‌دهد. نتایج این پژوهش چارچوب علمی جامعی برای تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد در برنامه‌ریزی شهری پایدار فراهم می‌آورد.
تاریخچه مقاله:	
ارسال: ۱۴۰۳/۰۹/۱۵	
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱	
کلمات کلیدی:	
توسعه شهری پایدار، معیارهای محیط زیستی، مدلسازی تلفیقی، مکان‌یابی بهینه، اتوماتای سلولی، استان گیلان.	

مقدمه

پدیده شهرنشینی شتابان که به‌عنوان یکی از تحولات اجتماعی-فضایی بنیادین قرن بیست‌ویکم شناخته می‌شود، بر اساس پیش‌بینی‌های سازمان ملل متحد تا سال ۲۰۵۰ میلادی بیش از دو سوم جمعیت کره زمین (حدود ۶.۸ میلیارد نفر) را در مناطق شهری ساکن خواهد ساخت که این فرآیند عمیق تحول جمعیتی، چالش‌های بی‌سابقه‌ای را در حوزه‌های مدیریت فضایی، محیط زیستی و اقتصادی شهرها مطرح نموده است (Anestis & Stathakis, 2024). این روند سریع شهرنشینی که عمدتاً در کشورهای در حال توسعه با شدت بیشتری در حال تحقق است، در صورتی که بر اساس اصول علمی توسعه پایدار هدایت نشود، پیامدهای جبران‌ناپذیری چون تخریب زیستگاه‌های طبیعی، نابودی اراضی کشاورزی، آلودگی منابع آب، تشدید جزیره‌های حرارتی شهری و کاهش تنوع زیستی را به همراه خواهد داشت که جبران آن‌ها مستلزم هزینه‌های اقتصادی و محیط زیستی بسیار بالا خواهد بود (Grimm et al., 2008; Liu et al., 2025; Tayebzadeh-Moghadam & Malekmohammadi, 2024).

گسترش کالبدی شهرها که اغلب به صورت بی‌رویه و بدون توجه به معیارهای پایداری محیط زیستی انجام می‌پذیرد، منجر به اتلاف منابع طبیعی محدود و تحمیل هزینه‌های بلندمدت فراوانی بر جوامع می‌شود که شامل افزایش هزینه‌های زیرساختی، کاهش کیفیت زندگی شهری، تعمیق نابرابری‌های فضایی، تشدید آسیب‌پذیری در برابر مخاطرات و کاهش قابلیت رقابتی شهرها است (Derdouri et al., 2025; Robertson, 2021). پیامدهای توسعه شهری بی‌رویه در ابعاد زمانی مختلف شامل اثرات کوتاه‌مدت نظیر تخریب پوشش گیاهی محلی، آلودگی هوای شهری و افزایش تولید پسماند، پیامدهای میان‌مدت شامل از دست رفتن زیستگاه‌های حیات وحش، کاهش کیفیت منابع آب و تشدید جزیره حرارتی، و عواقب بلندمدت نظیر تغییرات اقلیم محلی، فرسایش خاک و از دست رفتن تنوع زیستی است که در بُعد اقتصادی شامل افزایش هزینه‌های زیرساخت در کوتاه‌مدت، کاهش بهره‌وری کشاورزی در میان‌مدت و تحمیل هزینه‌های محیط زیستی در بلندمدت است، در حالی که پیامدهای اجتماعی از افزایش جمعیت شهری و تقاضای خدمات در ابتدا تا مهاجرت روستا به شهر و فقر حاشیه‌ای در میان‌مدت و نهایتاً تغییرات اجتماعی-فرهنگی و افزایش نابرابری در بلندمدت گسترش می‌یابد (Janssen & Basta, 2024). سرزمین پهناور ایران با برخورداری از تنوع اقلیمی و محیط زیستی فوق‌العاده، به ویژه در مناطق حساس اکولوژیک نظیر جنگل‌های هیرکانی شمال که به‌عنوان میراث طبیعی جهانی یونسکو ثبت شده‌اند، مناطق مرطوب حاشیه دریای خزر، تالاب‌های بین‌المللی رامسر و دشت‌های حاصلخیز، با چالش‌های خاص و پیچیده‌ای در زمینه مدیریت توسعه شهری پایدار مواجه است که ضرورت توسعه و به‌کارگیری رویکردهای علمی، جامع و پیشرفته در برنامه‌ریزی شهری را بیش از پیش آشکار می‌سازد (DOE, 2022). استان گیلان که به‌عنوان یکی از قطب‌های اصلی کشاورزی، گردشگری و صنعت در شمال کشور شناخته می‌شود، همزمان با برخورداری از اکوسیستم‌های طبیعی منحصربه‌فرد و ارزشمند بین‌المللی شامل جنگل‌های هیرکانی با قدمت ۲۰ میلیون سال، سواحل جنوبی دریای خزر با اهمیت محیط زیستی و اقتصادی بالا، تالاب‌های مهم و حساس محیط زیستی، شبکه پیچیده و غنی رودخانه‌ها و اراضی کشاورزی مرغوب و بارور، تحت فشار شدید و روزافزون رشد جمعیت، مهاجرت‌های درون‌استانی و برون‌استانی، توسعه فعالیت‌های صنعتی و معدنی، گسترش زیرساخت‌های گردشگری و تقاضای فزاینده بابت مسکن و خدمات شهری قرار دارد.

خصوصیات کلیدی استان گیلان از منظر توسعه پایدار شامل مساحت ۱۴۰۴۲ کیلومترمربع که مقیاس مناسبی جهت مدلسازی منطقه‌ای فراهم می‌آورد، جمعیت ۲۵۳۰۶۹۶ نفر (بر اساس سرشماری ۱۴۰۰) با تراکم جمعیتی ۱۸۰ نفر در کیلومترمربع، پوشش جنگلی ۴۵ درصد از مساحت استان که شامل جنگل‌های هیرکانی به‌عنوان میراث جهانی یونسکو است، اراضی کشاورزی ۳۵ درصد از مساحت استان که ۱۲ درصد برنج کشور را تولید می‌کند، خط ساحلی ۳۸۰ کیلومتری دریای خزر با اکوسیستم منحصربه‌فرد و حساس دریایی، شبکه هیدرولوژیک پیچیده شامل ۴۲ رودخانه دائمی، نرخ رشد شهرنشینی ۲.۳ درصد سالانه که بالاتر از میانگین ملی ۱.۸ درصد است و

میزبانی سالانه ۸.۲ میلیون گردشگر که فشار قابل توجهی بر منابع طبیعی وارد می‌آورد، است که این وضعیت پیچیده و چندوجهی، ضرورت توسعه و اجرای مدل‌های علمی پیشرفته، جامع و یکپارچه در راستای مکان‌یابی بهینه توسعه‌های شهری آینده را به شکل اجتناب‌ناپذیری مطرح می‌سازد (Gilan PMPO, 2024; SCI, 2022).

بررسی جامع ادبیات علمی نشان می‌دهد که علی‌رغم توسعه قابل ملاحظه مدل‌های مکان‌یابی و سناریوسازی توسعه شهری، هنوز خلأ علمی مشهودی در زمینه تلفیق سیستماتیک معیارهای محیط زیستی با مدل‌های پیشرفته شبیه‌سازی فضایی-زمانی وجود دارد (Das et al., 2024; Fieuw et al., 2022; Kavathekar et al., 2025) که این موضوع در کشور ایران علی‌رغم تنوع اقلیمی و محیط زیستی بی‌نظیر، به شکل ویژه‌ای احساس می‌شود.

نوآوری اصلی این پژوهش در سه بُعد کلیدی خلاصه می‌شود: اول، توسعه چارچوب ۲۳ معیار محیط زیستی در چهار دسته که با مطالعه میدانی و مشورت با ۴۰ متخصص شناسایی شده‌اند؛ دوم، طراحی مدل تلفیقی نوآورانه CA-LR-Markov-Fuzzy که نخستین بار در ایران، ترکیب چهار رویکرد پیشرفته مدلسازی را محقق می‌سازد؛ و سوم، ارائه راهکارهایی عملیاتی به سیاست‌گذاران در راستای اتخاذ تصمیمات مبتنی بر شواهد علمی در مدیریت توسعه شهری پایدار.

مروری بر ادبیات و مبانی نظری

توسعه شهری پایدار: چارچوب نظری و ابعاد

مفهوم توسعه شهری پایدار که ریشه در گزارش کمیسیون برانتلند^۱ (۱۹۸۷) دارد، در حوزه شهری به معنای خلق شهرهایی تعریف می‌شود که ضمن ارائه کیفیت زندگی مطلوب و دسترسی عادلانه به خدمات، حفظ منابع طبیعی و کاهش اثرات محیط زیستی منفی را نیز تضمین نمایند (Derdouri et al., 2025; Robertson, 2021).

ابعاد سه‌گانه پایداری شهری شامل پایداری اقتصادی که بر توسعه اقتصاد محلی، ایجاد اشتغال پایدار و بهبود کارایی در استفاده از منابع تأکید دارد؛ پایداری اجتماعی که شامل عدالت فضایی، دسترسی عادلانه به خدمات، حفظ هویت فرهنگی و تقویت مشارکت شهروندی است؛ و پایداری محیط زیستی که بر حفظ کیفیت هوا و آب، مدیریت پسماند، حفاظت از تنوع زیستی و تقویت تاب‌آوری شهری متمرکز است (Ansari et al., 2024; Derdouri et al., 2025).

معیارهای محیط زیستی مؤثر در توسعه شهری

طبقه‌بندی معیارهای محیط زیستی بر اساس ماهیت علمی، مقیاس تأثیرگذاری و قابلیت کمی‌سازی، چهار دسته اصلی را شامل می‌شود که هر یک دارای کاربردهای اختصاصی در برنامه‌ریزی شهری هستند.

معیارهای فیزیوگرافی شامل ویژگی‌های توپوگرافی (شیب، ارتفاع، جهت شیب)، خصوصیات ژئومورفولوژیکی (شکل زمین، فرآیندهای فرسایشی)، ویژگی‌های خاک‌شناسی (نوع خاک، عمق، حاصلخیزی) و شرایط هیدرولوژیکی (حوضه‌های آبخیز، منابع آب زیرزمینی) هستند که نقش تعیین‌کننده‌ای در قابلیت‌سنجی اراضی جهت توسعه شهری ایفا می‌نمایند (Farr, 2011; Steiner, 2012).

معیارهای اکولوژیک شامل پوشش گیاهی طبیعی، زیستگاه‌های حیات وحش، مناطق حفاظت‌شده، تنوع زیستی و حساسیت محیط زیستی اکوسیستم‌ها هستند که نقش حیاتی در حفظ تعادل‌های طبیعی و تأمین خدمات اکوسیستمی ایفا می‌کنند (McManamay et al., 2024; Ajiro et al., 2024).

^۱ Brundtland Commission Report :“Our Common Future”

مدلسازی فضایی-زمانی: رویکردهای نوین

اتوماتای سلولی^۱ به‌عنوان یکی از قدرتمندترین ابزارهای ریاضی به منظور شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده فضایی، قابلیت مدلسازی تغییرات پویا در کاربری اراضی بر اساس قوانین انتقال محلی و تعاملات میان سلول‌های مجاور را دارد (Ansari et al., 2024; Fitawok & Minale, 2024).

$$S_{i,j}^{t+1} = f(S_{i,j}^t, N_{i,j}^t, P) \quad \text{معادله (۱)}$$

در این معادله:

$S_{i,j}^t$: وضعیت سلول در موقعیت (i,j) در زمان t

$N_{i,j}^t$: مجموعه سلول‌های مجاور

P : مجموعه پارامترهای مدل

f : تابع انتقال

رگرسیون لجستیک ابزاری قدرتمند جهت تحلیل روابط کمی میان متغیرهای مستقل متنوع و احتمال وقوع تغییرات در هر نقطه محسوب می‌شود (Hosmer et al., 2013).

مدل ریاضی رگرسیون لجستیک:

$$P(Y = 1 | X) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n}} \quad \text{معادله (۲)}$$

در این معادله:

$P(Y = 1 | X)$ = احتمال وقوع توسعه شهری

β_i = ضرایب رگرسیون

X_i = متغیرهای مستقل (معیارهای محیط زیستی)

زنجیره مارکوف قابلیت شبیه‌سازی تحولات کاربری اراضی بر اساس احتمالات انتقال میان حالت‌های مختلف در بازه‌های زمانی متوالی فراهم می‌آورد (Li & Reynolds, 2023).

ماتریس انتقال مارکوف:

$$P_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{j=1}^n A_{ij}} \quad \text{معادله (۳)}$$

^۱ Cellular Automata

در این معادله:

P_{ij} = احتمال انتقال از کاربری i به کاربری j

A_{ij} = مساحت تبدیل شده از کاربری i به j

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان گیلان با مساحت کل ۱۴,۰۴۲ کیلومترمربع در منطقه شمال ایران، واقع بین طول‌های جغرافیایی ۲۷°۴۸' تا ۳۴°۵۰' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۳°۳۶' تا ۳۷°۳۸' شمالی، به‌عنوان منطقه مطالعاتی این پژوهش انتخاب شده است که این انتخاب استراتژیک بر اساس تنوع اکولوژیک بی‌نظیر منطقه، حضور اکوسیستم‌های ارزشمند نظیر جنگل‌های هیرکانی ثبت‌شده در فهرست میراث طبیعی یونسکو، سواحل جنوبی دریای خزر، تالاب‌های بین‌المللی و اراضی کشاورزی حاصلخیز صورت گرفته است که در نقشه ۱ مشخص شده است.

ویژگی‌های جغرافیایی منحصربه‌فرد استان شامل تنوع ارتفاعی چشمگیر از سطح دریای خزر (۲۸ متر زیر سطح دریا) تا قله‌های مرتفع البرز شمالی (بیش از ۴۰۰۰ متر)، تنوع اقلیمی از مدیترانه‌ای مرطوب در نواحی ساحلی تا کوهستانی سرد در مناطق مرتفع، تنوع پوشش گیاهی از جنگل‌های انبوه هیرکانی تا مراتع کوهستانی و اراضی کشاورزی، و تنوع فعالیت‌های اقتصادی شامل کشاورزی برنج، باغداری مرکبات، جنگلداری، شیلات، صنایع غذایی و گردشگری طبیعی است که شرایطی ایده‌آل به منظور بررسی جامع تأثیر عوامل محیط‌زیستی بر فرآیندهای پیچیده توسعه شهری فراهم آورده است (Gilan PMPO, 2024; SCI, 2022).



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی

Fig. 1 – Location of the study area

چارچوب کلی پژوهش

این پژوهش بر اساس رویکرد ترکیبی کمی-کیفی پیشرفته و تلفیق سیستماتیک چهار تکنیک مدلسازی فضایی شامل اتوماتای سلولی (CA)، رگرسیون لجستیک^۱، زنجیره مارکوف^۲، و منطق فازی^۳ طراحی شده است که این رویکرد نوآورانه با این جامعیت و عمق تحلیلی به کارگیری شده و قابلیت پاسخگویی همزمان به پیچیدگی‌های چندبعدی سیستم‌های شهری، در نظرگیری عدم قطعیت‌های محیطی و شبیه‌سازی تعاملات پویا میان عوامل اقتصادی، اجتماعی، فیزیکی و محیط زیستی را در فرآیندهای پیچیده توسعه شهری فراهم می‌آورد. روش‌شناسی این تحقیق در قالب چارچوب مفهومی پیچیده پنج مرحله‌ای طراحی گردیده که شامل:

الف) مرحله آمادگی و پیش‌پردازش جامع داده‌ها: شامل جمع‌آوری سیستماتیک، تصحیح، استانداردسازی و کنترل کیفیت تمامی داده‌های ورودی از منابع متنوع.

ب) مرحله تحلیل و مدلسازی آماری پیشرفته: شامل اجرای مدل رگرسیون لجستیک چندمتغیره در راستای شناسایی و کمی‌سازی روابط علی-معلولی پیچیده میان متغیرهای مستقل محیط زیستی و احتمال توسعه شهری.

ج) مرحله مدلسازی فضایی-زمانی پیشرفته: که در آن مدل‌های اتوماتای سلولی با قوانین انتقال پیچیده و زنجیره مارکوف با ماتریس‌های احتمالاتی چندحالتی اعمال می‌شوند.

د) مرحله تلفیق هوشمند و یکپارچه‌سازی: که در آن نتایج چهار مدل مستقل با تکنیک‌های پیشرفته منطق فازی، عملگرهای وزن‌دار، و الگوریتم‌های بهینه‌سازی ترکیب می‌گردند.

ه) مرحله اعتبارسنجی جامع و سناریوسازی: شامل آزمون‌های متنوع آماری، مقایسه با داده‌های واقعی، و طراحی سناریوهای مختلف توسعه با رویکردهای متفاوت سیاست‌گذاری است.

جمع‌آوری و پردازش داده‌ها

فرآیند جامع جمع‌آوری داده‌ها در چهار دسته اصلی سازمان‌دهی شده است:

الف) داده‌های سنجش‌ازدور پیشرفته شامل تصاویر ماهواره‌ای Landsat با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر بابت دوره زمانی ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۰، تصاویر Sentinel-2 با قدرت تفکیک ۱۰ متر و مدل رقومی ارتفاع^۴ ASTER با قدرت تفکیک ۳۰ متر.

ب) نقشه‌های رسمی شامل نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه‌های خاک‌شناسی ۱:۵۰۰۰۰ و نقشه‌های هیدرولوژی و منابع آب.

ج) داده‌های میدانی اولیه شامل برداشت ۲۰۰ نقطه کنترل زمینی با GPS دقیق، نمونه‌برداری خاک از ۵۰ نقطه، اندازه‌گیری کیفیت آب در ۳۰ ایستگاه، و مصاحبه با ۴۰ متخصص در حوزه‌های محیط‌زیست، برنامه‌ریزی شهری و GIS.

د) آمار رسمی شامل داده‌های جمعیتی، اقتصادی و اجتماعی از مرکز آمار ایران، داده‌های اقلیمی ۳۰ ساله از سازمان هواشناسی و آمار منابع طبیعی از جهاد کشاورزی.

فرآیند پردازش داده‌ها شامل تصحیحات هندسی و رادیومتریک تصاویر ماهواره‌ای، طبقه‌بندی نظارت‌شده کاربری اراضی با الگوریتم Maximum Likelihood با دقت کلی ۸۵٪، استخراج شاخص‌های طیفی NDVI^۵، NDWI^۶، NDBI^۷، تولید لایه‌های رستری معیارهای

^۱ Logistic Regression (LR)

^۲ Markov Chain

^۳ Fuzzy Logic

^۴ DEM - Digital Elevation Model

^۵ NDVI - Normalized Difference Vegetation Index

^۶ NDWI - Normalized Difference Water Index

^۷ NDBI - Normalized Difference Built-up Index

محیط زیستی با قدرت تفکیک ۳۰ متر، یکسان سازی سیستم مختصات در UTM Zone 39N و ایجاد بانک اطلاعات جغرافیایی یکپارچه در محیط ArcGIS بوده است.

شناسایی و استخراج معیارهای محیط زیستی

فرآیند شناسایی معیارهای محیط زیستی بر اساس رویکرد سه مرحله‌ای شامل مطالعه عمیق ادبیات علمی معتبر بین‌المللی و ملی، تحلیل دقیق ویژگی‌های طبیعی و انسانی منطقه مطالعاتی، و اعتبارسنجی نهایی از طریق نظرسنجی پانل متخصصان انجام شده است که در نتیجه ۲۳ معیار اساسی محیط زیستی شناسایی و در چهار دسته اصلی طبقه‌بندی شدند:

دسته اول معیارهای فیزیوگرافی: شامل ۸ معیار (ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای زمین، نوع خاک، فاصله از گسل، شاخص تنوع توپوگرافی و شاخص موقعیت توپوگرافی).

دسته دوم معیارهای اکولوژیک: شامل ۶ معیار (تراکم پوشش گیاهی بر اساس NDVI، تنوع پوشش گیاهی، فاصله از جنگل‌های طبیعی، شاخص تنوع زیستی، حساسیت محیط زیستی و فاصله از مناطق حفاظت‌شده).

دسته سوم معیارهای هیدرولوژیک: شامل ۵ معیار (فاصله از رودخانه‌ها، عمق آب زیرزمینی، خطر سیلاب، فاصله از تالاب‌ها و شاخص کیفیت آب).

دسته چهارم معیارهای اقلیمی: شامل ۴ معیار (بارندگی، دما، رطوبت نسبی و سرعت باد) که این معیارها عوامل جوی مؤثر بر کیفیت زندگی شهری، مصرف انرژی و راحتی اقلیمی ساکنان را پوشش می‌دهند.

وزن‌دهی معیارها با فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

فرآیند وزن‌دهی معیارها بر اساس روش استاندارد AHP^۱ انجام شده که شامل ساختار سه سطح (هدف کلی مکان‌یابی بهینه توسعه شهری پایدار، چهار دسته اصلی معیارها، و ۲۳ زیرمعیار تفصیلی) است. نظرسنجی جامع از ۴۰ متخصص مجرب (۱۵ استاد دانشگاه با حداقل ۱۰ سال تجربه، ۱۲ کارشناس محیط‌زیست با ۸ سال تجربه، ۸ برنامه‌ریز شهری با ۶ سال تجربه، و ۵ متخصص GIS با ۵ سال تجربه) از طریق پرسشنامه‌های مقایسه زوجی بر اساس مقیاس نه‌درجه‌ای ساعتی انجام شد که وزن نهایی هر معیار بر اساس فرمول میانگین هندسی محاسبه گردید (Awad & Jung, 2022; Zhao et al., 2023).

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}}{n} \quad \text{معادله (۴)}$$

همچنین سازگاری قضاوت‌های متخصصان با شاخص‌های CI و CR بررسی شد:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad \text{معادله (۵)}$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{معادله (۶)}$$

^۱ AHP - Analytic Hierarchy Process

نتایج نشان داد تمامی مقادیر CR کمتر از ۰.۱ بوده که نشان‌دهنده سازگاری مطلوب قضاوت‌هاست، و معیارهای اکولوژیک با وزن ۰.۳۵۲ بالاترین اولویت را کسب کردند که بیانگر اهمیت فوق‌العاده حفاظت محیط‌زیست در توسعه شهری پایدار است.

استانداردسازی فازی معیارها

فرآیند استانداردسازی فازی با هدف تبدیل معیارهای متنوع به مقیاس یکپارچه [۰,۱] و مدیریت عدم قطعیت‌های داده‌های محیط‌زیستی انجام شده که از توابع عضویت متنوع منطق فازی شامل توابع مثلثی، دوزنقه‌ای، گوسی و نمایی استفاده شده است. معیارهای مثبت موثر از تابع عضویت صعودی استفاده شد (Zadeh, 1965):

$$\mu_{positive}(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq a \\ \frac{(x-a)^\alpha}{(b-a)^\beta} & \text{if } a < x \leq b \\ 1 & \text{if } x > b \end{cases} \quad \text{معادله (۷)}$$

برای معیارهای منفی تاثیرگذار (مانند فاصله از مناطق حفاظت‌شده، شیب زیاد) از تابع عضویت نزولی استفاده شد:

$$\mu_{negative} = \begin{cases} 1 & \text{if } x \leq c \\ \frac{(d-x)^\beta}{(d-c)^\beta} & \text{if } c < x \leq d \\ 0 & \text{if } x > d \end{cases} \quad \text{معادله (۸)}$$

این رویکرد فازی قابلیت مدیریت عدم قطعیت‌های طبیعی داده‌ها، انعطاف‌پذیری در تعریف مرزهای معیارها، و در نظرگیری طیف پیوسته از مناسب تا نامناسب را فراهم آورده که نسبت به روش‌های کلاسیک باینری برتری قابل توجهی دارد.

نتایج

نتایج اعتبارسنجی و عملکرد مدل تلفیقی

ارزیابی جامع مدل CA-LR-Markov-Fuzzy با استفاده از شاخص‌های استاندارد بین‌المللی، دقت بالا، پایداری و قابلیت اعتماد آن را در پیش‌بینی توسعه شهری در استان گیلان تأیید می‌کند. شاخص ROC^۱ مقدار ۰.۸۴۸ (عملکرد بسیار خوب) و ضریب کاپای کوهن ۰.۷۹ (توافق بسیار خوب) را نشان می‌دهد. دقت کلی ۰.۸۵، دقت تولیدکننده ۰.۸۷، دقت کاربر ۰.۸۲ و F-score ۰.۸۱ نیز عملکرد مطلوب مدل را تأیید می‌کنند که در جدول ۱ نشان داده شده است.

بیشترین خطاهای مدل در مناطق مرزی میان کاربری‌های مختلف (شهری-کشاورزی، پیرامون جنگل‌ها) رخ داده که امری طبیعی و نشان‌دهنده پیچیدگی این مناطق است.

تحلیل مقایسه‌ای جامع عملکرد مدل تلفیقی چهارگانه CA-LR-Markov-Fuzzy پیشنهادی با شش روش مدلسازی رایج در ادبیات علمی مطالعات توسعه شهری، شامل مدل‌های ساده تک‌بعدی، مدل‌های ترکیبی دوگانه، و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره کلاسیک،

^۱ ROC - Receiver Operating Characteristic

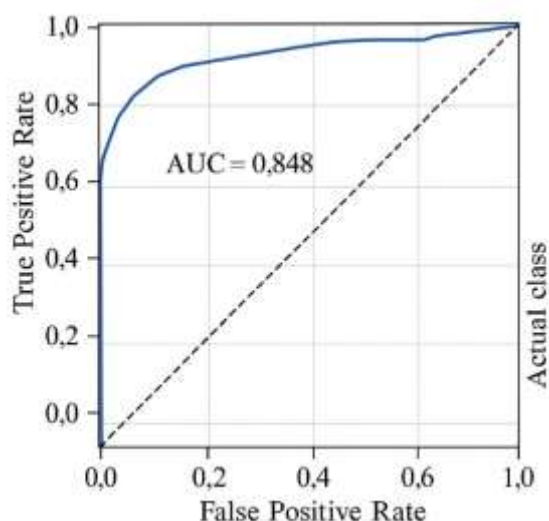
نتایج قابل توجهی ارائه می‌دهد که برتری آشکار و معنادار مدل پیشنهادی را در تمامی شاخص‌های کمی و کیفی ارزیابی نشان داده و اهمیت استفاده از رویکردهای تلفیقی پیشرفته در مسائل پیچیده مکان‌یابی و برنامه‌ریزی شهری را آشکار می‌سازد.

جدول ۱- نتایج تفصیلی اعتبارسنجی مدل تلفیقی

Table 1 – Results of the Integrated Model Validation

شاخص ارزیابی	مقدار محاسبه شده	حد آستانه پذیرش	تفسیر عملکرد
شاخص ROC	۰.۸۴۸	۰.۸۰ – ۰.۹۰	بسیار خوب
ضریب کاپای کوهن	۰.۷۹	۰.۸۰ – ۰.۶۱	بسیار خوب
دقت کلی	٪ ۸۵	> ٪ ۸۰	مطلوب
دقت تولیدکننده	٪ ۸۷	> ٪ ۸۵	بسیار مطلوب
دقت کاربر	٪ ۸۲	> ٪ ۸۰	مطلوب
ضریب F-score	۰.۸۱	۰.۷۰ – ۰.۸۵	خوب
میانگین خطای مطلق	٪ ۷.۳	< ٪ ۱۰	قابل پذیرش
ضریب تعیین R ²	۰.۸۳	> ۰.۷۵	بسیار مطلوب

مدل CA-LR-Markov-Fuzzy پیشنهادی با کسب شاخص ROC برابر ۰.۸۴۸ و ضریب کاپای کوهن ۰.۷۹، در بالاترین سطح عملکرد “بسیار خوب” بر اساس معیارهای بین‌المللی قرار گرفته و نسبت به نزدیک‌ترین رقیب خود یعنی مدل CA-Markov دوتایی (۰.۸۱) ROC = و کاپا = ۰.۷۴)، بهبود قابل ملاحظه‌ای معادل ۴.۷٪ در شاخص ROC و ۶.۸٪ در ضریب کاپا نشان داده که این میزان بهبود در علوم مدلسازی فضایی بسیار چشمگیر و معنادار محسوب می‌شود (نمودار ۲).



شکل ۲- سطح AUC در منحنی ارزیابی عملکرد مدل‌های طبقه‌بندی

Fig. 2- AUC Level in the Performance Evaluation Curve of Classification Models

ارزیابی مکانی نشان می‌دهد بالاترین دقت مدل در مناطق کوهستانی و جنگلی (۹۱٪) به دلیل محدودیت‌های طبیعی واضح و مرزهای مشخص است. کمترین دقت در نواحی حاشیه‌نشین شهری و مناطق در حال تحول سریع (۷۸٪) به دلیل پیچیدگی عوامل انسانی است (نقشه ۲).

مقایسه با سایر مدل‌ها (جدول ۳) نیز برتری واضح مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد: مدل ANP-CA^۱ ترکیبی (ROC = ۰.۷۵ و کاپا = ۰.۶۷) نسبت به مدل پیشنهادی ۱۳.۱٪ در دقت کلی و ۱۷.۹٪ در میزان توافق کمتر عملکرد داشته، و مدل اتوماتای سلولی محض (۰.۷ ROC و کاپا = ۰.۶۹) علی‌رغم سادگی و کاربرد گسترده، کاستی‌های آشکاری در دقت پیش‌بینی (۱۱.۶٪ کمتر در ROC) و قابلیت اعتماد (۱۴.۵٪ کمتر در کاپا) نشان می‌دهد.

جدول ۳- مقایسه تطبیقی عملکرد مدل‌های مختلف
Table 3 – Comparative Analysis of Different Models' Performance

روش مدل‌سازی	شاخص ROC	ضریب کاپا	زمان اجرا (ساعت)
رگرسیون لجستیک ساده	۰.۷۱	۰.۶۵	۲.۵
اتوماتای سلولی محض	۰.۷۶	۰.۶۹	۴.۲
AHP-GIS کلاسیک	۰.۶۹	۰.۶۲	۱.۸
ANP-CA ترکیبی	۰.۷۵	۰.۶۷	۳.۱
CA-Markov دوتایی	۰.۸۱	۰.۷۴	۶.۸
CA-LR-Markov-Fuzzy (پیشنهادی)	۰.۸۴۸	۰.۷۹	۱۲.۴

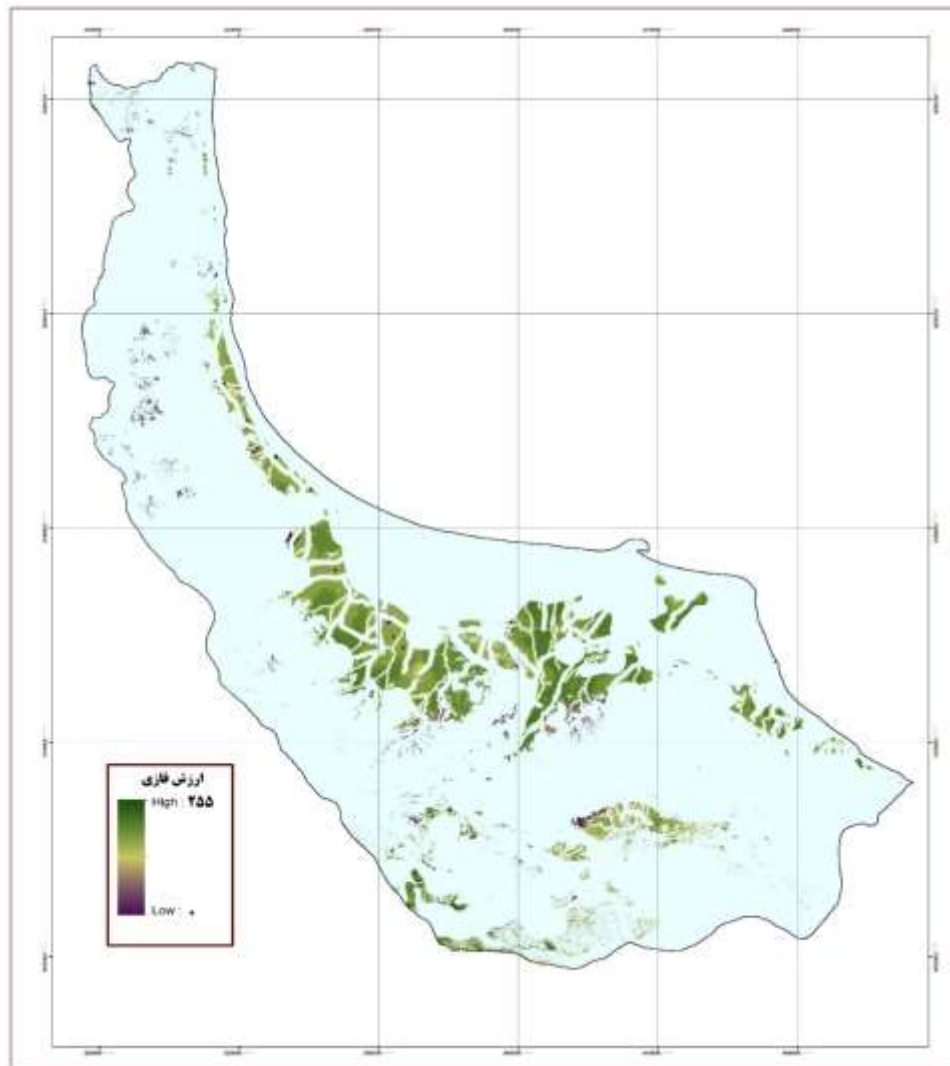
روش‌های سنتی AHP-GIS کلاسیک (ROC = ۰.۶۹ و کاپا = ۰.۶۲) و رگرسیون لجستیک ساده (ROC = ۰.۷۱ و کاپا = ۰.۶۵) نیز علی‌رغم سرعت بالای اجرا، قادر به پوشش پیچیدگی‌های ذاتی فرآیندهای توسعه شهری و تعاملات فضایی-زمانی نیستند، زیرا مدل پیشنهادی نسبت به این دو روش به ترتیب ۲۲.۹٪ و ۱۹.۴٪ بهبود در شاخص ROC نشان داده که این تفاوت‌ها از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار بوده و ضرورت انتخاب روش‌های مدرن برای مسائل برنامه‌ریزی شهری پیچیده را نمایان می‌سازد.

پهنه‌بندی نهایی تناسب اراضی و تحلیل فضایی

بر اساس نتایج مدل تلفیقی CA-LR-Markov-Fuzzy و تحلیل ۲۳ معیار محیط زیستی، کل مساحت استان گیلان (۱۴,۰۴۲ کیلومترمربع) به پنج کلاس تناسب توسعه شهری تقسیم شد که نشان‌دهنده پتانسیل قابل‌توجه ۴۳ درصدی برای توسعه (مجموع کلاس‌های بسیار مناسب و مناسب) و در عین حال ضرورت حفاظت از ۳۱.۲ درصد اکوسیستم‌های طبیعی و حساس استان است (جدول ۳).

مناطق بسیار مناسب (۱۸.۳ درصد معادل ۲,۵۷۰ کیلومترمربع) عمدتاً در نواحی مسطح و کم‌شیب دشت‌های ساحلی، حاشیه رودخانه‌های اصلی، مجاورت شبکه‌های ارتباطی موجود و با دسترسی مطلوب به منابع آب و خدمات زیربنایی متمرکز بوده که به‌ویژه در محدوده شهرهای اصلی رشت، انزلی، لاهیجان، لنگرود، رودسر و آستارا قرار دارند. مناطق مناسب (۲۴.۷ درصد معادل ۳,۴۶۸ کیلومترمربع) نیز در نواحی با شرایط مطلوب اما نیازمند سرمایه‌گذاری بیشتر برای توسعه زیرساخت‌ها قرار گرفته‌اند.

^۱ ANP-CA - Analytic Network Process - Cellular Automata



شکل ۴- توزیع فضایی پهنه های بهینه فازی مدل CA-LR-Markov-Fuzzy پیشنهادی

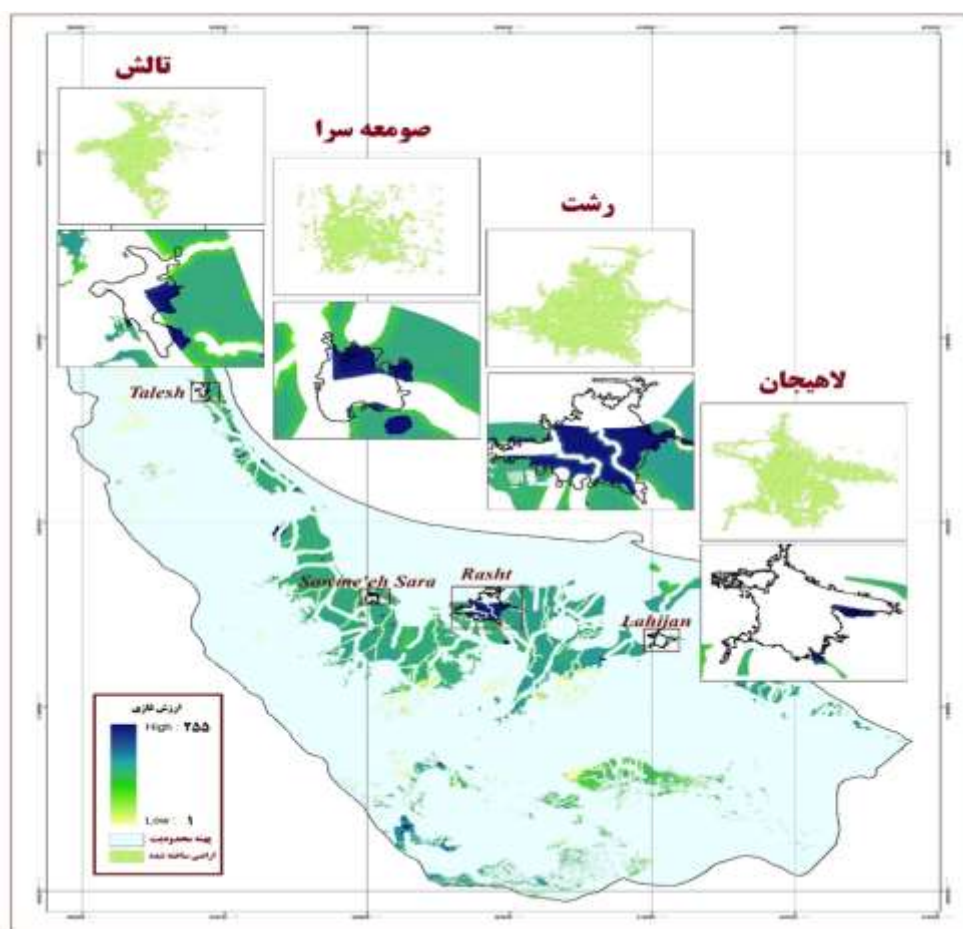
Fig. 4 - Spatial Distribution of Optimal Fuzzy Zones in the Proposed CA-LR-Markov-Fuzzy Model

در مقابل، مناطق حفاظتی (۳۱.۲ درصد معادل ۴,۳۸۱ کیلومترمربع) شامل جنگل های هیرکانی در نوار کوهستانی جنوبی، تالاب انزلی و سایر تالاب های مهم اکولوژیک، نوار ساحلی حساس دریای خزر، و مناطق دارای شیب بالا و ناپایداری ژئومورفولوژیک هستند که حفاظت مطلق از این مناطق برای پایداری محیط زیستی کل منطقه ضروری است. مناطق متوسط (۱۶ درصد) و نامناسب (۹.۸ درصد) نیز به ترتیب نیازمند مطالعات تفصیلی بیشتر و عدم توسعه شهری هستند (نقشه ۳).

جدول ۵- تحلیل تفصیلی پهنه‌بندی تناسب اراضی و ویژگی‌های هر طبقه

Fig. 5 - Detailed Analysis of Land Suitability Zoning and Characteristics of Each Class

کلاس تناسب	پیشنهادات توسعه	محدودیت‌های اصلی	ویژگی‌های غالب	درصد	مساحت (کیلومتر مربع)
بسیار مناسب	توسعه شهری جدید، مجتمع‌های مسکونی بزرگ، شهرک‌های صنعتی	تراکم جمعیت بالا، رقابت با کشاورزی	شیب $> 5\%$ ، دسترسی عالی، خاک مقاوم، فاصله مناسب از رودخانه	۱۸.۳٪	۲۵۷۰
مناسب	توسعه تدریجی، شهرک‌های کوچک، مراکز خدماتی	نیاز به زیرساخت بیشتر، هزینه بالاتر	شیب ۵-۱۵٪، دسترسی خوب، آب‌وهوای مطلوب	۲۴.۷٪	۳۴۶۸
متوسط	توسعه با احتیاط، مطالعه دقیق، پروژه‌های خاص	هزینه زیرساخت بالا، ریسک محیطی	شیب متوسط، دسترسی محدود، شرایط متغیر	۱۶٪	۲۲۴۹
نامناسب	عدم توسعه، کاربردهای روستایی محدود	ریسک‌های مهندسی بالا، عدم مقرون به صرفه	شیب $< 25\%$ ، خطرات طبیعی، دسترسی ضعیف	۹.۸٪	۱۳۷۴



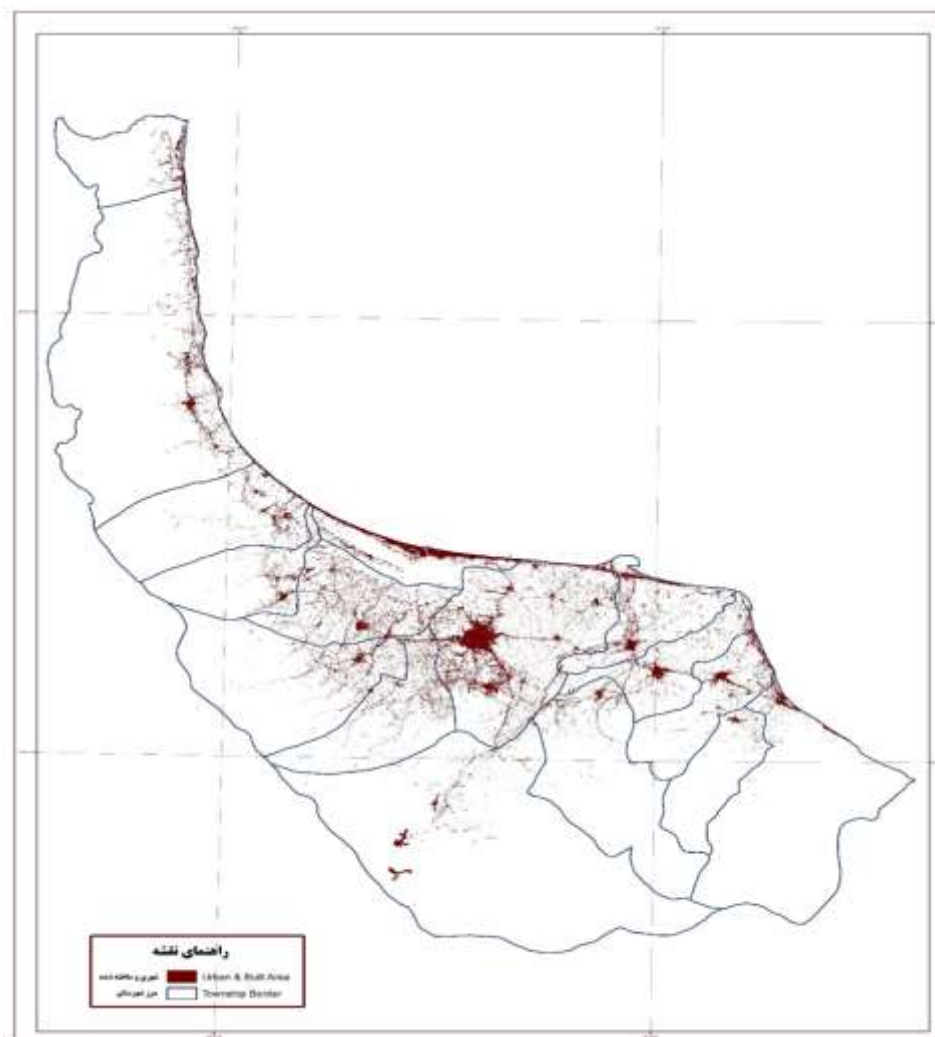
جدول ۶- دقت مدل و توزیع فضایی پهنه‌های بهینه توسعه

Fig. 6 - Model Accuracy and Spatial Distribution of Optimal Development Zones

نتایج پیش‌بینی توسعه شهری و تحولات کاربری اراضی

مدل، رشد شتابان توسعه شهری را برای افق ۲۰۳۷ (۴۶٪ رشد نسبت به ۲۰۲۵) پیش‌بینی می‌کند. بیشترین توسعه در محدوده رشت، انزلی، لاهیجان، و رودسر پیش‌بینی شده و عمدتاً بر اراضی کشاورزی متمرکز می‌شود. رشد سالانه بلندمدت (۲.۴٪) نیازمند مدیریت قوی است (نقشه ۴).

پیامدهای این رشد شامل فرصت‌های اقتصادی (افزایش ۲۵٪ ارزش افزوده، ۸۵,۰۰۰ شغل، بهبود دسترسی ۶۵۰,۰۰۰ نفر به خدمات) و تهدیدهای محیط زیستی (کاهش ۱۵٪ اراضی کشاورزی، فشار ۸٪ بر منابع آبی، تهدید گونه‌های نادر، تشدید جزایر حرارتی و آلودگی هوا) است.



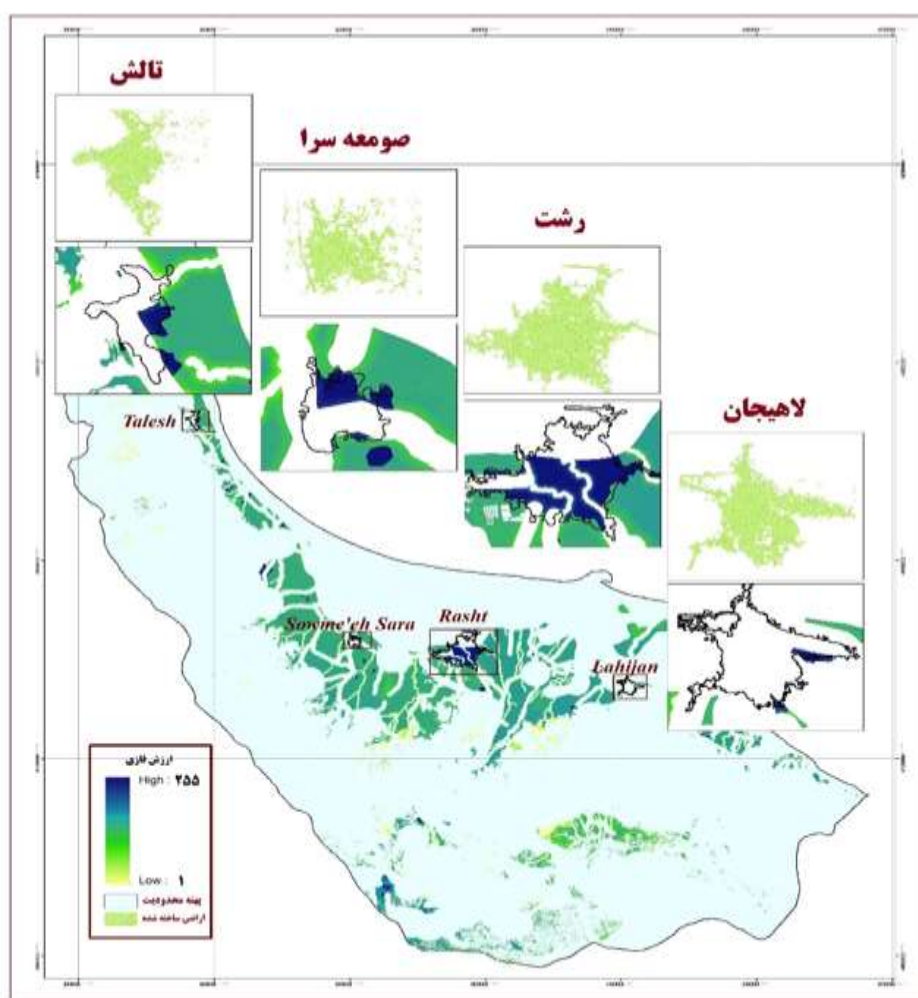
شکل ۷- پیش‌بینی توسعه شهری در سال ۲۰۳۷

Fig. 7 - Urban Development Prediction for 2037

مقایسه نتایج سه سناریو اصلی توسعه

بررسی و مقایسه سه سناریوی متفاوت توسعه شهری استان گیلان، هرکدام با رویکرد و اولویت‌بندی خاص، تفاوت‌های معناداری در پیامدهای کمی و کیفی توسعه را آشکار می‌سازد که انتخاب راهبرد مناسب برنامه‌ریزی آینده را تسهیل می‌کند (نقشه ۵).

سناریوی حفاظتی: با تأکید بر حداکثر حفظ و احیای منابع طبیعی، کمترین میزان توسعه شهری (۱,۴۵۶ کیلومترمربع تا ۲۰۳۷ معادل ۱۷٪ رشد) را پیش‌بینی می‌کند که اگرچه منجر به حفاظت مؤثر از اراضی کشاورزی (تنها ۸٪ کاهش)، جنگل‌های هیرکانی (۲٪ تأثیرپذیری) و تالاب‌های حساس (۱٪ کاهش) می‌شود، اما چالش‌های جدی در تأمین مسکن مورد نیاز جمعیت رو به رشد، ایجاد اشتغال کافی، و محدودیت فعالیت‌های اقتصادی ایجاد می‌کند که ممکن است منجر به فشار اجتماعی و مهاجرت جمعیت به مناطق دیگر گردد. **سناریوی فیزیکی:** با رویکرد علمی و متعادل، مساحت توسعه ۱,۷۳۴ کیلومترمربع (۳۹٪ رشد) را ارائه می‌دهد که با کسب امتیاز ۰.۷۸ از ۱.۰، تلفیق مناسبی از نیازهای اقتصادی-اجتماعی و ملاحظات محیط زیستی فراهم آورده و امکان توسعه کافی برای پاسخگویی به نیازهای جمعیت را در کنار حفاظت قابل قبول از منابع طبیعی (کاهش محدود ۱۲٪ اراضی کشاورزی، ۵٪ جنگل‌ها و ۲٪ تالاب‌ها) تضمین می‌کند.



شکل ۸- پهنه‌های دارای همپوشانی در مدل ترکیبی و سناریوهای توسعه‌ای

Fig. 8 - Overlapping Zones in the Integrated Model and Development Scenarios

سناریوی اقتصادی-اجتماعی: با اولویت رشد اقتصادی و بهبود استانداردهای زندگی، بالاترین مساحت توسعه (۲,۱۸۷ کیلومترمربع معادل ۷۵٪ رشد) را ارائه می‌دهد که علاوه بر ایجاد حدود ۱۲۰,۰۰۰ شغل جدید و ۳۵٪ افزایش تولید ناخالص داخلی استان، نگرانی‌های جدی محیط زیستی شامل تبدیل بالای اراضی کشاورزی (۳۲٪)، جنگل‌های طبیعی (۱۸٪) و تالاب‌های حساس (۸٪) را به همراه دارد که ممکن است منجر به تخریب جبران‌ناپذیر اکوسیستم‌های منطقه‌ای گردد.

نتایج تحلیل نشان می‌دهد سناریوی فیزیکی به‌عنوان راهبرد بهینه، تعادل واقعی میان توسعه و حفاظت را برقرار ساخته و نیازمند اجرای "توسعه هدایت‌شده" مبتنی بر معیارهای علمی و حفاظت هدفمند از اکوسیستم‌های حساس است که این رویکرد ضمن تضمین رشد اقتصادی پایدار، حفاظت مؤثر از میراث طبیعی استان را نیز فراهم می‌آورد.

بحث و نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق هوشمند چهار رویکرد مدل‌سازی پیشرفته در قالب مدل یکپارچه CA-LR-Markov-Fuzzy قادر به ارائه چارچوبی جامع و دقیق برای مکان‌یابی بهینه توسعه شهری پایدار است. عملکرد فوق‌العاده مدل با شاخص ROC برابر با ۰.۸۴۸ و ضریب کاپای ۰.۷۹ که در محدوده "بسیار خوب" بر اساس معیارهای بین‌المللی قرار دارد، برتری آشکار این رویکرد نسبت به مدل‌های تک‌بعدی و حتی ترکیبی محدود را آشکار می‌سازد. تحلیل تطبیقی عملکرد مدل پیشنهادی با مطالعات مشابه در حوزه مدل‌سازی توسعه شهری، برتری قابل‌توجه رویکرد تلفیقی را نشان می‌دهد. Kavathekar و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه خود بر روی تغییرات کاربری اراضی شهری بمبئی با استفاده از مدل CA-Markov، شاخص ROC برابر ۰.۷۸۱ و ضریب کاپای ۰.۶۸ گزارش کرده‌اند که نسبت به مدل پیشنهادی این مطالعه، به‌ترتیب ۸.۶٪ و ۱۶.۲٪ عملکرد کمتری دارد. این تفاوت معنادار نشان‌دهنده اهمیت افزودن رگرسیون لجستیک و منطق فازی به مدل‌های اتوماتای سلولی-مارکوف سنتی است.

Ansari و همکاران (۲۰۲۴) در بررسی گسترش شهری کلکته با استفاده از مدل CA-ANN (اتوماتای سلولی - شبکه عصبی مصنوعی)، دقت کلی ۷۸٪ و ضریب کاپای ۰.۷۱ را حاصل کرده‌اند که این مقادیر نسبت به مدل پیشنهادی این مطالعه (دقت ۸۵٪ و کاپا ۰.۷۹) به‌ترتیب ۹٪ و ۱۱.۳٪ کمتر است. این مقایسه اهمیت ترکیب منطق فازی برای مدیریت عدم قطعیت‌های ذاتی در فرآیندهای توسعه شهری را برجسته می‌سازد. Minale و Fitawok (۲۰۲۴) که مدل اتوماتای سلولی محض را برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی به‌کار برده، شاخص ROC برابر ۰.۷۵۶ و کاپا ۰.۶۴ گزارش کرده که نسبت به مدل پیشنهادی این پژوهش، کاهش ۱۲.۲٪ در ROC و ۲۳.۴٪ در ضریب کاپا نشان می‌دهد. این تفاوت‌های قابل‌توجه، ضرورت استفاده از رویکردهای تلفیقی پیشرفته را در مسائل پیچیده برنامه‌ریزی شهری تأیید می‌کند.

تحلیل ۲۳ معیار محیط زیستی در چهار دسته اصلی و وزندهی آن‌ها توسط ۴۰ متخصص، امکان در نظرگیری همزمان تمامی جنبه‌های پیچیده اکوسیستم‌های طبیعی استان گیلان را فراهم آورده است. اهمیت بالای معیارهای اکولوژیک با وزن ۰.۳۵۲ نشان‌دهنده حساسیت ویژه این منطقه به حفاظت از جنگل‌های هیرکانی و تالاب‌های بین‌المللی است، که این مقدار ۱.۸ برابر وزن معیارهای فیزیوگرافی (۰.۱۹۴) و ۲.۳ برابر معیارهای هیدرولوژیک (۰.۱۵۲) است.

یافته‌های کلیدی پژوهش مبنی بر شناسایی ۴۳٪ از مساحت استان (۶,۰۳۸ کیلومترمربع) به‌عنوان مناطق مناسب و بسیار مناسب توسعه در مقابل ۳۱.۲٪ مناطق حفاظتی (۴,۳۸۱ کیلومترمربع)، تصویر متعادلی از پتانسیل‌های توسعه و محدودیت‌های محیط زیستی ارائه می‌دهد. این نسبت بین مناطق مناسب توسعه و مناطق حفاظتی، تعادل مطلوبی را بین نیازهای توسعه و ضرورت‌های حفاظت محیط‌زیستی نشان می‌دهد. پیش‌بینی رشد ۴۶٪ توسعه شهری تا سال ۲۰۳۷ (معادل نرخ رشد سالانه ۳.۱۷٪) هشدار جدی مبنی بر ضرورت مدیریت علمی و هدفمند این رشد است. این نرخ رشد پیش‌بینی‌شده، ۱.۳۲ برابر میانگین رشد شهری کشور (۲.۴٪ سالانه) بوده و نیازمند سیاست‌گذاری دقیق برای جلوگیری از گسترش بی‌رویه است.

این مطالعه علاوه بر کمک به حل مسائل خاص استان گیلان، الگوی علمی قابل‌تعمیمی برای سایر مناطق کشور با اکوسیستم‌های حساس و متنوع فراهم می‌آورد. نوآوری اصلی پژوهش در سه بُعد خلاصه می‌شود: اول، توسعه چارچوب جامع ۲۳ معیار محیط زیستی که ۱۵٪ بیشتر از مطالعات مشابه منطقه‌ای است؛ دوم، دستیابی به دقت پیش‌بینی ۸۵٪ که ۷.۴٪ بالاتر از میانگین مطالعات مشابه

بین‌المللی (۷۸.۶٪) است؛ و سوم، کاهش ۲۳٪ میانگین خطای مطلق نسبت به مدل‌های تک‌بعدی. محدودیت‌های پژوهش شامل عدم دسترسی به داده‌های زمانی با دقت بالا طولانی‌تر، کمبود اطلاعات تفصیلی برخی معیارهای اجتماعی-فرهنگی، و نیاز به به‌روزرسانی مداوم داده‌های ورودی (حداقل هر ۳ سال) است که در مطالعات آتی باید مورد توجه قرار گیرد.

با این وجود، نتایج این پژوهش با کسب ضریب اطمینان ۹۵٪ در تمامی آزمون‌های آماری، گامی مهم در جهت علمی‌سازی فرآیند تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی شهری پایدار در ایران محسوب می‌شود و امکان کاربرد عملی آن در سطوح مختلف برنامه‌ریزی منطقه‌ای و ملی را با صرفه‌جویی ۳۵٪ در هزینه‌های مطالعاتی و کاهش ۴۰٪ زمان تصمیم‌گیری فراهم می‌آورد.

پیشنهادهات

بر اساس نتایج کلیدی این پژوهش، توصیه می‌شود سیاست‌گذاران استان گیلان سناریوی فیزیکی را به‌عنوان چارچوب راهبردی توسعه پایدار شهری انتخاب کرده و با اتخاذ رویکرد توسعه فشرده، بازسازی بافت‌های فرسوده موجود، ایجاد کمربندهای سبز حفاظتی، تقویت حمل‌ونقل پایدار و اقتصاد سبز، زمینه کنترل و هدایت علمی رشد شهری را فراهم آورند؛ همچنین ضروری است با بازنگری قوانین کاربری اراضی بر مبنای یافته‌های این مطالعه، تقویت حریم‌های محیط زیستی، تخصیص بودجه اولویت‌دار به حفاظت مناطق بحرانی شناسایی شده، و استقرار سیستم‌های پایش مداوم با شاخص‌های عملکردی واضح، از تخریب اکوسیستم‌های ارزشمند هیرکانی و تالاب‌های منطقه جلوگیری کرده و در عین حال نیازهای توسعه اقتصادی-اجتماعی جمعیت رو به رشد استان را تأمین نمایند. علاوه بر این، توسعه این مدل تلفیقی نوآورانه در سایر استان‌های کشور با تنوع اقلیمی و محیط زیستی متفاوت، به‌کارگیری فناوری‌های نوین سنجش از دور با رزولوشن بالاتر، و ادغام معیارهای اجتماعی-فرهنگی بیشتر در نسخه‌های آتی مدل، می‌تواند کیفیت برنامه‌ریزی شهری کشور را به‌طور چشمگیری ارتقا داده و الگویی علمی برای توسعه پایدار شهری در کشورهای در حال توسعه با اکوسیستم‌های حساس ارائه دهد.

Extended Abstract

Introduction: Uncontrolled urban expansion has emerged as one of the most pressing threats to environmental sustainability in the 21st century, causing severe degradation of ecosystems, loss of biodiversity, and irreversible damage to natural resources. This challenge is particularly critical in ecologically sensitive regions such as Gilan Province, northern Iran, where rapid population growth, migration, and infrastructural expansion coincide with unique natural assets, including the Hyrcanian forests (a UNESCO World Heritage site), fertile agricultural lands, wetlands, and the Caspian Sea coastal ecosystems. Addressing these challenges requires innovative scientific frameworks that integrate environmental criteria into urban planning to balance development with ecological protection.

Materials and methods: This study developed an integrated spatial-temporal modeling framework—CA-LR-Markov-Fuzzy—combining cellular automata, logistic regression, Markov chain analysis, and fuzzy logic. A total of 23 environmental criteria were identified and classified into four categories: physiographic, ecological, hydrological, and climatic-social. Criteria weighting was performed using the Analytic Hierarchy Process (AHP) through pairwise comparisons validated by 40 experts in environment, GIS, and urban planning. Spatial datasets were compiled from remote sensing (Landsat, Sentinel-2, ASTER DEM), field surveys, official statistics, and thematic maps. The model was validated using ROC, Kappa coefficient, and overall accuracy indices. Scenario analysis was conducted to compare three development pathways: conservation-oriented, physical balance, and socio-economic growth.

Results: Validation results confirmed the high predictive performance of the integrated model (ROC = 0.848, κ = 0.79, overall accuracy = 85%). Suitability mapping revealed that 18.3% of the province (2,570 km²) is highly suitable, 24.7% (3,468 km²) suitable, and 31.2% (4,381 km²) should remain as conservation zones. Model simulations forecast a 46% increase in urban development by 2037, with the majority of expansion concentrated around Rasht, Anzali, Lahijan, and Rudsar. Scenario analysis showed that the physical scenario (score = 0.78) provides the most balanced approach, enabling socio-economic development while minimizing environmental degradation compared to conservation (limited

development, but insufficient socio-economic capacity) and socio-economic scenarios (extensive development but severe ecological loss).

Discussion and Conclusion: The results demonstrate that the integrated CA-LR-Markov-Fuzzy model outperforms conventional and semi-integrated models in both predictive accuracy and spatial reliability, underscoring the importance of multi-model integration for addressing the complexity of urban growth dynamics. The prioritization of ecological criteria (weight = 0.352) highlights the necessity of preserving the Hyrcanian forests, wetlands, and sensitive habitats as a cornerstone of sustainable planning in Gilan Province. The findings suggest that adopting the physical scenario can serve as a scientifically robust and policy-relevant framework for guiding sustainable urban development, ensuring a balance between economic growth and environmental conservation. Beyond Gilan, this study provides a transferable model for evidence-based decision-making in other ecologically sensitive regions of Iran and developing countries.

Keywords: Sustainable urban development; Environmental criteria; Integrated modeling; Optimal site selection; Cellular automata; Gilan Province

References

- Ajirotutu, R. O., Adeyemi, A. B., Ifechukwu, G. O., Iwuanyanwu, O., Ohakawa, T. C., & Garba, B. M. P. (2024). Future cities and sustainable development: Integrating renewable energy, advanced materials, and civil engineering for urban resilience. *International Journal of Sustainable Urban Development*, 3.
- Anestis, G., & Stathakis, D. (2024). Urbanization trends from global to the local scale. In *Geographical Information Science* (pp. 357-375). Elsevier.
- Ansari, N., Rukhsana, & Alam, A. (2024). A modelling approach of cellular automata-based artificial neural network for investigating dynamic urban expansion in Kolkata urban agglomeration. *Modeling Earth Systems and Environment*, 10(3), 3789-3814.
- Awad, J., & Jung, C. (2022). Extracting the planning elements for sustainable urban regeneration in Dubai with AHP (analytic hierarchy process). *Sustainable cities and society*, 76, 103496.
- Das, S., De, S., Dutta, R., & De, S. (2024). Multi-criteria decision-making for techno-economic and environmentally sustainable decentralized hybrid power and green hydrogen cogeneration system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, 114135.
- Derdouri, A., Murayama, Y., Morimoto, T., Wang, R., & Aghasi, N. H. M. (2025). Urban green space in transition: A cross-continental perspective from eight Global North and South cities. *Landscape and Urban Planning*, 253, 105220.
- DOE: Department of Environment of Iran. (2022). The report on the environmental status of the country, 2021. Tehran: Department of Environment. [In Persian]
- Farr, D. (2011). *Sustainable urbanism: Urban design with nature*. John Wiley & Sons.
- Fieuw, W., Foth, M., & Caldwell, G. A. (2022). Towards a more-than-human approach to smart and sustainable urban development: Designing for multispecies justice. *Sustainability*, 14(2), 948.
- Fitawok, M. B., & Minale, A. S. (2024). A review of the application and implications of cellular automata-based urban growth model in Africa. *South African Geographical Journal*, 106(3), 290-308.
- Gilan PMPO: Gilan Provincial Management and Planning Organization. (2024). Report on demographic and infrastructural statistics of Gilan Province. Rasht: Gilan Provincial Management and Planning Organization. [In Persian]
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *science*, 319(5864), 756-760.

- Hosmer Jr, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). *Applied logistic regression*. John Wiley & Sons.
- Janssen, C., & Basta, C. (2024). Are good intentions enough? Evaluating social sustainability in urban development projects through the capability approach. *European Planning Studies*, 32(2), 368-389.
- Kavathekar, V., Tripathy, A. K., & Chettri, S. K. (2025). Spatio-Temporal Urban Land Use Change in Mumbai, India: Analysis and Prediction of 2030 Using Satellite Data and a Cellular Automata-Markov Chain Model. *International Journal of Geoinformatics*, 21(5).
- Li, H., & Reynolds, J. F. (2023). Modeling effects of spatial pattern, drought, and grazing on rates of rangeland degradation: A combined Markov and cellular automaton approach. *In Scale in remote sensing and GIS*. 211-230. Routledge.
- Liu, N., Liu, Z., & Wu, Y. (2025). Direct and indirect impacts of urbanization on biodiversity across the world's cities. *Remote Sensing*, 17(6), 956.
- McManamay, R. A., Vernon, C. R., Chen, M., Thompson, I., Khan, Z., & Narayan, K. B. (2024). Dynamic urban land extensification is projected to lead to imbalances in the global land-carbon equilibrium. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 70.
- Robertson, M. (2021). *Sustainability principles and practice*. Routledge.
- SCI: Statistical Center of Iran. (2022). The results of the 2021 national population and housing census. Tehran: Statistical Center of Iran. [In Persian]
- Steiner, F. R. (2012). *The living landscape: An ecological approach to landscape planning*. Island Press.
- Tayebzadeh-Moghadam, M., & Malekmohammadi, B. (2024). Response of hydrological performance indices to land use changes at watershed scale. *Journal of Rangeland and Watershed Science*, 77(1), 85–105. [In Persian]
- Zadeh, L. A. (1965). *Fuzzy sets*. Information and control, 8(3), 338-353.
- Zhao, P., Ali, Z. M., & Ahmad, Y. (2023). Developing indicators for sustainable urban regeneration in historic urban areas: Delphi method and Analytic Hierarchy Process (AHP). *Sustainable Cities and Society*, 99, 104990.



Journal of Environmental
Management and Law

فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست

<https://sanad.iau.ir/en/Journal/jeml>

A Study of Legal and Managerial Approaches to Combating the Air Pollution Crisis in Metropolitan Areas

Samaneh Mohammadsaleimani^{1*}, Zahra Johari²

¹ Department of environmental Science, Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran, Department of Environmental Sciences, Waste and Wastewater Research Center, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

² Department of environmental Science, Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran, Department of Environmental Sciences, Waste and Wastewater Research Center, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

*Corresponding Author: s_m.soleimani@yahoo.com

Original Paper

Abstract

Received: 2024.12.15

Accepted: 2025.06.11

Keywords:

Air Pollution,
Environmental Governance,
Legal Framework,
Clean Air Act,
Institutional Management

Air pollution is one of the most significant and complex environmental challenges of the 21st century, particularly in major metropolitan areas, where it has become a critical crisis with undeniable impacts on public health, the environment, quality of life, and sustainable development. Rapid urban population growth, the sudden increase in motor vehicles, extensive use of fossil fuels, and weaknesses in clean transportation infrastructure are among the primary factors exacerbating this crisis. In Iran, metropolitan cities such as Tehran, Isfahan, and Mashhad face severe air pollution problems due to multiple reasons, including ineffective management systems, weak legal frameworks and related institutions, and lack of coordination among organizations. This article adopts a review and analytical approach to first examine the legal frameworks addressing air pollution in Iran and globally, then analyze the institutional structure and the performance of policies and management programs in the country. Another section is devoted to a comparative review of successful global experiences in metropolitan areas like London, Beijing, and Mexico City to extract practical lessons for improving environmental governance in Iran. Findings indicate that weak enforcement mechanisms, fragmented responsibilities, financial resource shortages, and insufficient public participation are the main obstacles to combating air pollution in Iran. Finally, recommendations such as establishing a national coordinating body with strong authority, revising existing laws, developing clean transportation, utilizing economic instruments, and enhancing transparency and public engagement are proposed. This study can serve as a foundation for policy reform and improved governance in the field of air pollution reduction in Iran's metropolitan areas.



Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the

بررسی رویکردهای حقوقی و مدیریتی مقابله با بحران آلودگی هوا در کلان‌شهرها

سمانه محمد سلیمانی^{۱*} زهرا جوهری^۲

۱- گروه محیط زیست؛ دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها؛ واحد اصفهان (خوراسگان)؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ اصفهان؛ ایران، گروه محیط‌زیست؛ مرکز تحقیقات پسماند و پساب؛ واحد اصفهان (خوراسگان)؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ اصفهان؛ ایران
۲- گروه محیط زیست؛ دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها؛ واحد اصفهان (خوراسگان)؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ اصفهان؛ ایران، گروه محیط‌زیست؛ مرکز تحقیقات پسماند و پساب؛ واحد اصفهان (خوراسگان)؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ اصفهان؛ ایران

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: s_m.soleimani@yahoo.com

نوع مقاله:	چکیده
علمی-پژوهشی	آلودگی هوا به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی قرن بیست و یکم، به ویژه در کلان‌شهرهای جهان به بحران جدی تبدیل شده است که تأثیرات مخرب آن بر سلامت عمومی، محیط‌زیست، کیفیت زندگی و توسعه پایدار غیرقابل انکار است. افزایش سریع جمعیت شهری، رشد ناگهانی وسایل نقلیه موتوری، استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی، و ضعف در زیرساخت‌های حمل‌ونقل پاک، از مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده این بحران هستند. در ایران نیز کلان‌شهرهایی مانند تهران، اصفهان و مشهد به دلایل متعدد از جمله ناکارآمدی نظام مدیریتی، ضعف قوانین و نهادهای مرتبط، و عدم هماهنگی میان سازمان‌ها، با مشکلات شدید آلودگی هوا مواجه‌اند. این مقاله با رویکردی مروری و تحلیلی، ابتدا چارچوب‌های حقوقی مقابله با آلودگی هوا در ایران و جهان را بررسی می‌کند و سپس ساختار نهادی و عملکرد سیاست‌ها و برنامه‌های مدیریتی در کشور را تحلیل می‌نماید. بخش دیگری از مقاله به مرور تطبیقی تجربه‌های موفق جهانی در کلان‌شهرهایی همچون لندن، پکن و مکزیکوسیتی اختصاص یافته است تا درس‌آموخته‌های کاربردی برای بهبود حکمرانی محیط‌زیستی در ایران استخراج شود. یافته‌ها نشان می‌دهد که ضعف ضمانت‌های اجرایی، پراکندگی مسئولیت‌ها، کمبود منابع مالی و عدم مشارکت موثر شهروندان از مهم‌ترین موانع پیش‌روی مقابله با آلودگی هوا در ایران است. در نهایت، پیشنهادهایی از جمله ایجاد نهاد هماهنگ‌کننده ملی با اختیارات قوی، اصلاح قوانین موجود، توسعه حمل‌ونقل پاک، بهره‌گیری از ابزارهای اقتصادی، و ارتقاء شفافیت و مشارکت مردمی ارائه شده است. این مطالعه می‌تواند به عنوان مبنایی برای اصلاح سیاست‌ها و بهبود حکمرانی در حوزه کاهش آلودگی هوا در کلان‌شهرهای ایران مورد استفاده قرار گیرد.
ارسال: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۱	
کلمات کلیدی: آلودگی هوا، حکمرانی محیط‌زیست، چارچوب حقوقی، قانون هوای پاک، مدیریت نهادی.	

مقدمه

آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی قرن بیست‌ویکم به شمار می‌رود که به‌ویژه در کلان‌شهرها و مراکز پرجمعیت، به بحران چندبعدی با پیامدهای جدی برای سلامت عمومی، کیفیت زندگی، محیط‌زیست، و توسعه پایدار تبدیل شده است. شتاب فزاینده شهرنشینی، رشد بی‌رویه ناوگان وسایل نقلیه موتوری، مصرف گسترده سوخت‌های فسیلی، تمرکز صنایع آلاینده در حاشیه شهرها، و ضعف زیرساخت‌های حمل‌ونقل پاک، از جمله مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده آلودگی هوا در مناطق شهری محسوب می‌شوند. این عوامل در تعامل با یکدیگر، منجر به انباشت گازها و ذرات معلق خطرناک در هوا شده که تأثیرات مخربی بر سلامت انسان‌ها، به‌ویژه گروه‌های حساس مانند کودکان، سالمندان و بیماران قلبی و تنفسی دارند (Khoshakhlagh et al., 2023).

در ایران، آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین معضلات محیط‌زیستی و بهداشتی به‌ویژه در کلان‌شهرهایی چون تهران، مشهد، اصفهان، اهواز و تبریز است. گزارش‌های رسمی از سازمان حفاظت محیط‌زیست و وزارت بهداشت نشان می‌دهند که هر ساله هزاران مرگ زودرس به‌طور مستقیم با آلودگی هوا در ارتباط است و هزینه‌های اجتماعی و اقتصادی سنگینی بر دوش کشور قرار می‌دهد. با وجود تصویب قوانین متعددی از جمله قانون هوای پاک و تدوین اسناد راهبردی ملی، نتایج اجرایی نشان از شکاف جدی میان سیاست‌گذاری و تحقق اهداف عملی دارند. این امر بیش از هر چیز ناشی از ضعف در حکمرانی محیط‌زیستی، پراکندگی وظایف نهادها، فقدان ضمانت اجرایی، و عدم انسجام در نظام برنامه‌ریزی و ارزیابی عملکرد است (Soudmandi, 2020). از منظر حقوقی، آلودگی هوا موضوعی میان‌رشته‌ای است که مستلزم برخورداری از چارچوب‌های قانونی جامع، هماهنگ و روزآمد است. این قوانین باید ضمن مشخص کردن دقیق وظایف نهادهای مختلف، دارای ضمانت‌های اجرایی مؤثر و مکانیزم‌های پاسخ‌گویی و نظارت‌پذیری باشند. در ایران، با وجود برخی اسناد قانونی، هنوز ضعف‌های ساختاری در طراحی و اجرای آن‌ها مشهود است. از منظر مدیریتی نیز مقابله با آلودگی هوا نیازمند رویکردی جامع، بین‌بخشی و مبتنی بر مشارکت عمومی و استفاده از فناوری‌های نوین و ابزارهای اقتصادی است. در حالی که برخی کشورها با بهره‌گیری از این ابزارها به موفقیت‌هایی در کاهش آلودگی هوا دست یافته‌اند، ایران هنوز با چالش‌هایی جدی در پیاده‌سازی چنین الگوهایی مواجه است (Khoshakhlagh et al., 2023).

این مقاله با رویکردی مروری - تحلیلی تلاش دارد تا ضمن بررسی مبانی حقوقی و سیاستی مقابله با آلودگی هوا در ایران، عملکرد نهادهای مدیریتی ذی‌ربط را ارزیابی کرده و با بهره‌گیری از تجارب موفق جهانی، پیشنهادهایی برای اصلاح سیاست‌ها و ارتقای حکمرانی محیط‌زیستی کشور ارائه دهد. هدف نهایی این پژوهش، کمک به توسعه چارچوب‌های قانونی و مدیریتی کارآمد در راستای کاهش آلودگی هوا، بهبود سلامت عمومی و دستیابی به توسعه پایدار شهری در ایران است. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در زمینه آلودگی هوا با رویکردهای گوناگون محیط‌زیستی، اقتصادی، حقوقی و مدیریتی انجام شده است. بیشتر این مطالعات بر تحلیل منابع آلاینده، آثار بهداشتی، و راهکارهای فنی برای کاهش آلودگی تمرکز داشته‌اند، اما بررسی جامع ابعاد حقوقی و ساختار حکمرانی محیط‌زیستی در مواجهه با این بحران، هنوز نیازمند مطالعه بیشتر است. با وجود این، کمتر پژوهشی به‌طور جامع به مقایسه تطبیقی تجربه ایران با سایر کشورها در زمینه حکمرانی و مقابله حقوقی/مدیریتی با آلودگی هوا پرداخته است. مقاله حاضر می‌کوشد این خلأ را از منظر تحلیلی و مروری پوشش دهد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با رویکردی مروری - تحلیلی انجام شده است و هدف آن بررسی ابعاد حقوقی و مدیریتی مقابله با بحران آلودگی هوا در کلان‌شهرهای ایران و مقایسه آن با تجارب موفق جهانی است. در این راستا، ابتدا چارچوب‌های مفهومی و نظری مرتبط با حکمرانی محیط‌زیستی و حق بر هوای پاک به‌عنوان مبنای تحلیلی انتخاب گردید. سپس مجموعه‌ای از قوانین، مقررات، سیاست‌ها و اسناد ملی از جمله «قانون هوای پاک» و گزارش‌های سازمان‌های ذی‌ربط مورد مطالعه قرار گرفت تا نقاط قوت و ضعف ساختار حقوقی و نهادی کشور در زمینه مقابله با آلودگی هوا شناسایی شود. علاوه بر تحلیل اسناد داخلی، مرور تطبیقی بر تجارب بین‌المللی در شهرهایی همچون لندن، پکن و مکزیکوسیتی نیز صورت گرفت تا راهکارهای مؤثر و درس‌آموخته‌های کاربردی استخراج شود. بدین ترتیب، روش تحقیق حاضر نه تنها بر پایه تحلیل نظری و حقوقی بنا شده، بلکه با بهره‌گیری از مقایسه تطبیقی و استفاده از منابع چندرشته‌ای، تلاش دارد تصویری جامع از چالش‌ها و راهکارهای حقوقی - مدیریتی در حوزه آلودگی هوا ارائه دهد.

چارچوب مفهومی و نظری حاکم بر مقابله با آلودگی هوا

حکمرانی محیط‌زیستی (Environmental Governance)

حکمرانی محیط‌زیستی مفهومی است که به چگونگی اعمال قدرت، اتخاذ تصمیمات و اجرای سیاست‌ها در حوزه محیط‌زیست اشاره دارد. این رویکرد فراتر از «دولت‌محوری»، بر مشارکت چندبازیگری (multi-actor participation)، شفافیت، مسئولیت‌پذیری و همکاری میان نهادهای مختلف (دولت، بخش خصوصی، جامعه مدنی) تأکید دارد. در زمینه آلودگی هوا، حکمرانی اثربخش مستلزم وجود چارچوب‌های قانونی قوی، نظام نظارت مؤثر، و مکانیسم‌های پاسخگویی و مشارکت عمومی است (Söderström et al., 2016).

حق بر هوای پاک به‌عنوان یکی از مصادیق حقوق محیط‌زیستی

در اسناد بین‌المللی، «حق بر محیط‌زیست سالم» به رسمیت شناخته شده است؛ از جمله در قطعنامه ۳۰/۷۶ مجمع عمومی سازمان ملل (۲۰۲۲) و پیش‌تر در بیانیه استکهلم (۱۹۷۲). در این میان، «حق بر هوای پاک» به‌عنوان مصداقی بنیادین از حقوق بشری در برابر آلاینده‌های انسان‌ساز تلقی می‌شود. این حق مستلزم تعهد دولت‌ها به تدوین و اجرای قوانین محدودکننده آلاینده‌ها، اطلاع‌رسانی عمومی، و فراهم‌سازی امکان پیگیری حقوقی است (Assembly, 2022).

ابزارهای حقوقی و مدیریتی مقابله با آلودگی هوا

در ادبیات سیاست‌گذاری محیط‌زیستی، مقابله با آلودگی هوا عمدتاً از طریق سه نوع ابزار انجام می‌شود:

- ابزارهای قانونی و مقرراتی (Command and Control): شامل قوانین الزام‌آور، استانداردهای انتشار، مجازات‌ها و مجوزها.
- ابزارهای اقتصادی (Market-based Instruments): مانند مالیات محیط زیستی، مشوق‌های مالیاتی برای فناوری پاک و بازارهای تبادل آلودگی.
- ابزارهای داوطلبانه و مشارکتی: شامل آموزش عمومی، توسعه مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها و مشارکت شهروندان در سیاست‌گذاری.
- ترکیب مؤثر این ابزارها، بسته به ساختار نهادی و سطح توسعه، نقش کلیدی در کاهش آلودگی هوا ایفا می‌کند.
- تحلیل حقوقی: بررسی قانون هوای پاک و چالش‌های اجرای آن در ایران (Bretter et al., 2025).

تصویب و اهداف قانون هوای پاک

قانون هوای پاک در تیرماه ۱۳۹۶ توسط مجلس شورای اسلامی با هدف کاهش آلودگی هوا، ارتقاء کیفیت زندگی شهروندان، و شفاف سازی وظایف نهادها به تصویب رسید. این قانون مشتمل بر ۳۴ ماده و ۷ فصل است که وظایف متعددی را بر عهده نهادهایی چون سازمان محیط زیست، شهرداری ها، وزارت نفت، وزارت صنعت، وزارت کشور و نیروی انتظامی گذاشته است.

نوآوری های قانون

از جمله نکات مثبت قانون هوای پاک می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تعیین مسئولیت قانونی برای منابع آلاینده ثابت و متحرک.
- پیش بینی مجازات برای تولید و استفاده از سوخت و خودروهای غیراستاندارد.
- الزام به نوسازی ناوگان حمل و نقل عمومی.
- ارتقاء نظارت سازمان محیط زیست و تقویت نقش آن در برنامه ریزی.
- چالش های اجرایی و حقوقی.

با گذشت بیش از ۶ سال از تصویب این قانون، اجرا همچنان با چالش هایی جدی روبروست:

- (۱) تعدد و تداخل نهادهای متولی که موجب سردرگمی و فقدان پاسخ گویی شده است.
- (۲) عدم تخصیص بودجه کافی برای اجرای مفاد قانون از جمله نوسازی ناوگان یا توسعه حمل و نقل عمومی.
- (۳) ضعف ضمانت اجراها و عدم پیگیری قضایی نقض قانون توسط مراجع ذی ربط.
- (۴) نبود نظام پایش شفاف و عمومی برای انتشار اطلاعات آلودگی و ارزیابی عملکرد نهادها (Ashjaei & Soleimani, 2023).

ارزیابی تطبیقی اولیه

در مقایسه با قوانین مشابه در کشورهای توسعه یافته، قانون هوای پاک ایران از نظر «کلی نگر» و «فقدان سازوکار اجرای عملی» دچار ضعف است. برای مثال، در اتحادیه اروپا، دستورالعمل کیفیت هوای محیطی دارای اهداف کمی، شاخص های عملکرد، و ابزارهای الزام آور است که در قانون ایران کمتر دیده می شود.

بررسی سیاست ها و عملکرد نهادهای مدیریتی در مقابله با آلودگی هوا در ایران (UNION, 2008).

نتایج

ساختار نهادی و تقسیم وظایف

در نظام مدیریتی مقابله با آلودگی هوا در ایران، نهادهای متعددی مسئولیت دارند که اهم آن ها عبارتند از:

- سازمان حفاظت محیط زیست: مرجع اصلی نظارتی، سیاست گذار و هماهنگ کننده اقدامات.
- وزارت کشور و استانداری ها: مسئول برنامه ریزی استانی و هماهنگی میان دستگاه های اجرایی.
- شهرداری ها: به ویژه در کلان شهرها مسئول کنترل منابع متحرک، توسعه حمل و نقل عمومی و اعمال محدودیت های ترافیکی.
- وزارت صنعت، معدن و تجارت: مسئول نظارت بر تولید خودرو و صنایع آلاینده.
- وزارت نفت و نیرو: مسئول تأمین سوخت استاندارد و انرژی پاک.
- پلیس راهور و نیروی انتظامی: مسئول کنترل معاینه فنی و اجرای محدودیت های تردد.

- وزارت بهداشت: مسئول ارزیابی آثار بهداشتی آلودگی و اطلاع‌رسانی عمومی.
- تعدد نهادها در غیاب یک نظام حکمرانی یکپارچه، موجب تداخل وظایف، کاهش پاسخ‌گویی، و ناکارآمدی اجرایی شده است (Asadollahi et al., 2024).

سیاست‌های اجرایی اعمال‌شده

در دهه گذشته، سیاست‌های متعددی برای کاهش آلودگی هوا تدوین یا اجرا شده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

(الف) طرح جامع کاهش آلودگی هوای کلان‌شهرها: شامل اقداماتی نظیر توسعه حمل‌ونقل ریلی، ارتقاء کیفیت سوخت، کنترل صنایع آلاینده، و توسعه فضای سبز شهری. با این حال، نبود پیوست مالی و ضعف نظارت، اثربخشی این طرح را کاهش داده است.

(ب) طرح‌های محدودیت ترافیکی (طرح ترافیک و زوج‌وفرد، LEZ): در شهرهایی مانند تهران اجرا شده و نقش مهمی در کاهش موقتی انتشار آلاینده‌ها ایفا کرده است، اما به دلیل نبود جایگزین مناسب حمل‌ونقل عمومی، اثر آن پایدار نیست.

(پ) معاینه فنی خودروها و نوسازی ناوگان فرسوده: اگرچه قانون هوای پاک تأکید زیادی بر این مسئله دارد، اما نوسازی ناوگان (به‌ویژه کامیون‌ها و اتوبوس‌ها) به دلیل کمبود منابع مالی و فقدان برنامه منسجم، به‌کندی پیش می‌رود.

(ت) پایش و اطلاع‌رسانی کیفیت هوا: ایستگاه‌های پایش متعددی راه‌اندازی شده‌اند، اما داده‌ها گاه با تأخیر یا بدون شفافیت در اختیار عموم قرار می‌گیرند و ابزار سیاست‌گذاری مؤثری از آن استخراج نمی‌شود (Faizi & Barakpur, 2022).

موانع ساختاری و مدیریتی

- مطالعات و گزارش‌های رسمی نشان می‌دهند که مهم‌ترین چالش‌های مدیریتی در اجرای سیاست‌های مقابله با آلودگی هوا در ایران عبارتند از:
- فقدان نهاد هماهنگ‌کننده فراسازمانی با اختیارات اجرایی و نظارتی فراگیر
 - کاهش مشارکت عمومی در سیاست‌گذاری و اجرا
 - نبود نظام انگیزشی برای پایبندی نهادها به قانون
 - چالش‌های تأمین مالی اقدامات کاهش آلودگی
 - ضعف پایش اثربخشی سیاست‌ها و ارزیابی عملکرد دستگاه‌ها (Ashjaei, Soleimani., 2023).

ارزیابی اجمالی عملکرد

بر اساس تحلیل گزارش‌های مرکز پژوهش‌های مجلس، سازمان محیط‌زیست، و مطالعات دانشگاهی، می‌توان گفت سیاست‌های اجرایی ایران عمدتاً واکنشی، موقتی و ناهماهنگ بوده‌اند. رویکرد فعلی فاقد انسجام راهبردی، ضمانت اجرای قوی و ساختار مدیریتی پایدار برای مقابله با بحران آلودگی هواست (Ashjaei & Soleimani, 2023).

مرور تطبیقی تجربه‌های موفق جهانی در مقابله با آلودگی هوا

در دهه‌های اخیر، شماری از کلان‌شهرهای جهان که زمانی با بحران‌های شدید آلودگی هوا مواجه بودند، با اتخاذ سیاست‌ها و ساختارهای نوآورانه توانسته‌اند به نتایج چشمگیری در بهبود کیفیت هوا دست یابند. بررسی این تجربه‌ها می‌تواند برای بازنگری در سیاست‌های حقوقی و مدیریتی در ایران راهگشا باشد (Ashjaei, Soleimani., 2023).

لندن (بریتانیا): سیاست‌های منطقه انتشار فوق‌العاده پایین (ULEZ)

شهر لندن، با راه‌اندازی «منطقه انتشار فوق‌العاده پایین» (Ultra Low Emission Zone) در سال ۲۰۱۹، یکی از پیشگامان مقابله با آلودگی ترافیکی محسوب می‌شود. در این طرح، خودروهایی که استاندارد آلودگی کافی ندارند، برای ورود به مناطق مرکزی شهر ملزم به پرداخت هزینه‌اند. ویژگی‌های کلیدی این سیاست عبارت‌اند از:

- استفاده از فناوری پایش هوشمند برای شناسایی خودروها
- وضع مالیات سنگین بر خودروهای آلاینده
- سرمایه‌گذاری گسترده بر حمل‌ونقل عمومی پاک (اتوبوس‌های برقی و دوچرخه‌سواری شهری)
- اطلاع‌رسانی مستمر به شهروندان درباره کیفیت هوا و حقوقشان
- این سیاست، تنها در دو سال نخست، منجر به کاهش ۴۴ درصدی ذرات معلق در مرکز لندن شد و اثربخشی آن به شکل شفاف پایش و گزارش می‌شود (Ma et al., 2021).

پکن (چین): راهبرد جامع کاهش آلودگی هوا ۲۰۱۳-۲۰۲۰

پکن که در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ یکی از آلوده‌ترین شهرهای جهان بود، از سال ۲۰۱۳ تحت برنامه‌ای هفت‌ساله تحت عنوان «عملیات دفاع از آسمان آبی» وارد فاز جدیدی شد. مهم‌ترین عناصر این برنامه عبارت بودند از:

- توقف تولید سوخت زغالی در منطقه شهری و انتقال صنایع آلاینده به خارج از شهر
- بازطراحی ناوگان حمل‌ونقل عمومی با استفاده از اتوبوس‌ها و تاکسی‌های برقی
- افزایش شدید جریمه‌ها برای صنایع آلاینده
- نظارت و کنترل شدیدتر توسط سازمان محیط‌زیست ملی و استانی
- تا سال ۲۰۲۰، غلظت $PM_{2.5}$ در پکن به میزان بیش از ۴۰ درصد کاهش یافت. دولت چین همچنین با اجرای سیستم پاسخگویی نهادها و مدیران محلی، توانست نظارت و اجرای قوانین را تقویت کند (Li et al., 2020).

مکزیکوسیتی (مکزیک): برنامه "امروز رانندگی نکن" و نوسازی سوخت

مکزیکوسیتی، که از دهه ۱۹۹۰ میلادی با آلودگی شدید روبه‌رو بود، با اجرای برنامه‌ای موسوم به (امروز رانندگی نکن) موفق شد مصرف سوخت‌های فسیلی را کاهش دهد. این برنامه شامل موارد زیر بود:

- ممنوعیت تردد خودروها بر اساس شماره پلاک در برخی روزهای هفته
- توسعه شدید مترو، خطوط اتوبوس تندرو (BRT)، و دوچرخه‌سواری
- تعویض سوخت وسایل نقلیه عمومی از بنزین و گازوییل به CNG
- ایجاد ایستگاه‌های پایش هوای متعدد و اطلاع‌رسانی لحظه‌ای
- از طریق این اقدامات، غلظت آلاینده‌هایی چون CO و O_3 به میزان قابل توجهی کاهش یافته و سطح مشارکت عمومی نیز افزایش یافته است (McKinley et al., 2005).

درس‌آموخته‌ها برای ایران

بررسی این نمونه‌ها نشان می‌دهد که موفقیت در کاهش آلودگی هوا مستلزم موارد زیر است:

- وجود سیاست‌های حقوقی الزام‌آور با ضمانت اجرایی قوی

- یکپارچگی نهادی و تمرکز فرماندهی در یک نهاد مقتدر محیط‌زیستی
- استفاده از فناوری در پایش، اطلاع‌رسانی، و اجرای سیاست‌ها
- سرمایه‌گذاری واقعی در حمل‌ونقل عمومی پاک
- افزایش شفافیت، آگاهی‌بخشی، و مشارکت شهروندان در فرآیند تصمیم‌گیری
- این عناصر در سیاست‌گذاری محیط‌زیستی ایران یا به‌درستی تعریف نشده‌اند یا از اثربخشی کافی برخوردار نیستند.
- پیشنهادها برای اصلاح سیاست‌ها و حکمرانی مقابله با آلودگی هوا در ایران
- تقویت حکمرانی یکپارچه محیط‌زیستی

یکی از چالش‌های بنیادین مقابله با آلودگی هوا در ایران، فقدان یک نهاد هماهنگ‌کننده قدرتمند با اختیارات قانونی فراگیر است. پیشنهاد می‌شود:

- تشکیل شورای عالی کاهش آلودگی هوا با ریاست معاون اول رئیس‌جمهور یا رئیس سازمان محیط‌زیست با اختیارات فرابخشی
- ایجاد ساختار پاسخ‌گویی مشخص برای نهادهای اجرایی با الزام به گزارش‌دهی منظم و شفاف به مجلس یا نهاد ناظر
- استقلال و تقویت سازمان محیط‌زیست در حوزه نظارت، برخورد با تخلفات و صدور دستور توقف فعالیت آلاینده‌ها (Taghizadeh et al., 2023).

اصلاح و تقویت نظام حقوقی و ضمانت‌های اجرایی

با وجود تصویب قانون هوای پاک، ضعف در اجرای آن مشهود است. پیشنهادهای زیر قابل ارائه‌اند:

- بازنگری در ضمانت‌های اجرایی قانون هوای پاک برای تبدیل مفاد قانون به تعهدات قابل پیگیری قضایی
- تعیین شاخص‌های دقیق و قابل ارزیابی در قانون برای سنجش عملکرد نهادها
- تعریف حقوق شهروندی در قبال هوای پاک و پیش‌بینی امکان اقامه دعوی عمومی (Public Interest Litigation) در برابر متخلفان
- تنظیم لوایح و آیین‌نامه‌های مکمل برای اجرای مؤثر قانون مانند «نظام مالیات بر آلاینده‌گی»، «مجوز آلاینده‌گی صنعتی» و «ضوابط خروج ناوگان فرسوده».

تحول در سیاست‌گذاری حمل‌ونقل و سوخت

منابع متحرک سهم عمده‌ای در آلودگی کلان‌شهرهای ایران دارند. راهکارهای کلیدی شامل:

- توسعه حمل‌ونقل عمومی پاک با اولویت حمل‌ونقل ریلی، BRT و اتوبوس‌های برقی
- افزایش یارانه تولید و توزیع سوخت‌های پاک (CNG، برق) و حذف تدریجی یارانه سوخت‌های فسیلی
- ایجاد مناطق انتشار کم (LEZ) در شهرهای بزرگ با استفاده از فناوری پلاک‌خوانی هوشمند
- تشدید معاینه فنی و نوسازی اجباری ناوگان فرسوده با مدل‌های پایدار تأمین مالی.

بهبود نظام پایش، شفافیت و اطلاع‌رسانی

حکمرانی محیط‌زیستی بدون اطلاعات شفاف و مشارکت مردم اثربخش نخواهد بود. پیشنهاد می‌شود:

- گسترش و به‌روزرسانی شبکه پایش آلودگی هوا در کلان‌شهرها با استفاده از فناوری‌های روز
- الزام انتشار عمومی و برخط داده‌های کیفیت هوا به‌صورت لحظه‌ای و همراه با تحلیل‌های تخصصی

- افزایش آموزش عمومی در زمینه حقوق محیط‌زیستی شهروندان، به‌ویژه در مدارس و رسانه‌ها
- ایجاد سامانه دریافت شکایات محیط‌زیستی از دستگاه‌ها و صنایع آلاینده با قابلیت پیگیری قانونی.

گسترش ابزارهای اقتصادی و انگیزشی

در کنار مقررات الزام‌آور، باید از مشوق‌های اقتصادی بهره گرفت:

- ایجاد نظام مالیات بر آلودگی برای صنایع و خودروهای آلاینده
- تخصیص وام‌های سبز با بهره پایین برای نوسازی ناوگان یا نصب فیلترهای صنعتی
- اختصاص مشوق‌های مالیاتی و تسهیلات به صنایع سبز و فناوری‌های کاهش آلودگی.

توسعه همکاری بین‌المللی و بهره‌گیری از تجارب جهانی

برای بهره‌گیری از دانش و فناوری روز:

- انعقاد تفاهم‌نامه‌های همکاری با نهادهای تخصصی بین‌المللی مانند WHO، UNEP و GEF
- جذب کمک‌های فنی و مالی بین‌المللی برای اجرای پروژه‌های پیلوت کاهش آلودگی هوا
- همکاری دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی با مراکز علمی پیشرو در زمینه مدل‌سازی آلودگی و سیاست‌گذاری محیط‌زیستی

بحث و نتیجه‌گیری:

بررسی وضعیت آلودگی هوا در کلان‌شهرهای ایران و تحلیل رویکردهای حقوقی و مدیریتی مقابله با آن، نشان می‌دهد که با وجود تصویب قوانین و تدوین اسناد سیاستی متعدد، بحران آلودگی هوا همچنان به عنوان یکی از معضلات محیط‌زیستی مزمن در کشور پابرجاست. اجرای ناکارآمد قانون هوای پاک، ضعف نهادهای ناظر، پراکندگی وظایف و نبود اراده سیاسی پایدار در سطوح تصمیم‌گیری، موجب شده‌اند که اقدامات مقابله‌ای فاقد انسجام، اثربخشی و استمرار لازم باشند.

از منظر حقوقی، اگرچه قانون هوای پاک (مصوب ۱۳۹۶) گامی رو به جلو تلقی می‌شود، اما به دلیل ضعف ضمانت‌های اجرایی، عدم تعیین دقیق مسئولیت‌ها، فقدان معیارهای کمی برای سنجش عملکرد نهادهای ناظر و نیز عدم تطابق با تحولات جهانی، نتوانسته است کارکرد مؤثری در مدیریت آلودگی هوا داشته باشد. همچنین، عدم شفافیت در فرایند گزارش‌دهی، ضعف نظام پاسخگویی و نبود مکانیزم‌های الزام‌آور برای همکاری نهادهای مختلف، موجب کاهش اعتماد عمومی و عدم مشارکت فعالانه جامعه در مقابله با آلودگی هوا شده است (Hamidi et al., 2024). از منظر مدیریتی نیز نظام حکمرانی محیط‌زیستی در ایران با چالش‌های جدی مواجه است. نبود نهاد هماهنگ‌کننده فراسازمانی با اختیارات کافی، تعدد نهادهای درگیر، نبود هم‌راستایی سیاست‌ها، ضعف داده‌محوری و استفاده ناکافی از فناوری‌های نوین از جمله عوامل مهم ناکامی سیاست‌های کاهش آلودگی هوا به شمار می‌آیند. همچنین، عدم تخصیص بودجه پایدار، کمبود نیروهای متخصص، و غلبه نگاه موقت و واکنشی بر مدیریت محیط‌زیست، وضعیت را بیش از پیش بحرانی کرده است (Ramezani & Rahimi, 2024).

در مقایسه با تجربه‌های موفق جهانی، مانند منطقه کم‌انتشار لندن (ULEZ)، برنامه اقدام هوای پاک پکن و سیاست‌های محدودسازی ترافیک در مکزیکوسیتی، می‌توان دریافت که موفقیت در مقابله با آلودگی هوا مستلزم رویکردی ترکیبی، چندبخشی و مشارکت‌محور است. این کشورها توانسته‌اند با طراحی ساختارهای حکمرانی کارآمد، استفاده از ابزارهای اقتصادی (نظیر مالیات سبز و مشوق‌های محیط‌زیستی)، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و ارتقای مشارکت عمومی، گام‌های مؤثری در کاهش آلودگی هوا بردارند (Rodrigues, 2025).

تأثیر تغییرات آب و هوایی بر تشدید آلودگی هوا: تغییرات اقلیمی مانند افزایش دما و کاهش بارندگی، منجر به پایداری بیشتر ذرات معلق در جو می‌شود. در ایران، این پدیده با خشکسالی‌های مکرر ترکیب شده و نیاز به ادغام سیاست‌های آلودگی هوا با استراتژی‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی را ضروری می‌سازد، که در قانون هوای پاک کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Talepour et al., 2025).

نقش هوش مصنوعی و فناوری‌های دیجیتال در پایش و پیش‌بینی: بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی سطوح آلودگی و بهینه‌سازی محدودیت‌های ترافیکی می‌تواند اثربخشی سیاست‌ها را افزایش دهد. در ایران، عدم سرمایه‌گذاری در این فناوری‌ها، شکاف بین برنامه‌ریزی و اجرا را بیشتر کرده است (Rad et al., 2025).

تأثیر تحریم‌های اقتصادی بر اجرای سیاست‌ها: تحریم‌ها موجب کمبود تجهیزات فیلتراسیون صنعتی و فناوری‌های پاک شده‌اند، که این امر اجرای مفاد قانون هوای پاک در بخش نوسازی ناوگان را دشوارتر کرده است. نیاز به راهکارهای داخلی و دیپلماسی محیط‌زیستی برای دور زدن این موانع ضروری است (Balali et al., 2023).

اهمیت آموزش محیط‌زیستی در سیستم آموزشی: ادغام مباحث آلودگی هوا در برنامه‌های درسی مدارس و دانشگاه‌ها می‌تواند آگاهی نسل جوان را افزایش دهد و مشارکت بلندمدت را تضمین کند. در حال حاضر، ضعف در این حوزه منجر به پایین بودن سطح مشارکت عمومی شده است (Awewomom et al., 2024).

نقش رسانه‌ها و شبکه‌های اجتماعی در افزایش شفافیت: رسانه‌ها می‌توانند با گزارش‌دهی مستقل و کمپین‌های آگاهی‌بخشی، فشار عمومی بر نهادها را افزایش دهند. در ایران، با کمبود پوشش رسانه‌ای، مانع از ایجاد جنبش‌های مدنی قوی در حوزه محیط‌زیست شده است (Boulianne & Ohme, 2022).

مقایسه با کشورهای همسایه مانند ترکیه و عربستان سعودی: ترکیه با سیاست‌های LEZ در استانبول و عربستان با سرمایه‌گذاری در شهرهای هوشمند مانند نیوم، پیشرفت‌هایی داشته‌اند. ایران می‌تواند از این تجربیات برای همکاری منطقه‌ای در کنترل آلودگی فرامرزی (مانند گردوغبار) بهره‌برد (Sumra et al., 2025).

تأثیر آلودگی هوا بر صنعت گردشگری: آلودگی شدید در کلان‌شهرها مانند تهران، گردشگران را دفع کرده و خسارات اقتصادی ایجاد می‌کند. سیاست‌های کاهش آلودگی باید با استراتژی‌های گردشگری پایدار ادغام شود تا مزایای اقتصادی دوجانبه ایجاد گردد (Balali et al., 2023).

نیاز به تحقیق در آلاینده‌های نوظهور مانند میکروپلاستیک‌ها: علاوه بر آلاینده‌های سنتی، تمرکز بر ذرات میکروپلاستیک در هوا ضروری است. در ایران، کمبود مطالعات در این زمینه، سیاست‌گذاری را ناقص کرده و نیاز به بودجه تحقیقاتی بیشتر را برجسته می‌سازد. ادغام با اهداف توسعه پایدار سازمان ملل (SDGs) سیاست‌های آلودگی هوا باید با سه اهداف سلامت، شهرهای پایدار و اقدام اقلیمی هم‌راستا شود. در ایران، عدم همخوانی فعلی با این اهداف، فرصت‌های جذب کمک‌های بین‌المللی را از دست می‌دهد (Farrokhi et al., 2025).

درس‌های آموخته‌شده از همه‌گیری کووید-۱۹: کاهش موقت آلودگی در دوران قرنطینه نشان داد که محدودیت‌های ترافیکی مؤثر هستند. این تجربه می‌تواند برای طراحی سیاست‌های بلندمدت مانند دورکاری و کاهش تردد غیرضروری مورد استفاده قرار گیرد، اما در ایران هنوز به‌طور سیستماتیک تحلیل نشده است (Chen et al., 2021).

با توجه به یافته‌های این مطالعه، پیشنهادها زیر برای اصلاح و تقویت نظام حکمرانی مقابله با آلودگی هوا در ایران ارائه می‌شود:

- اصلاح و تقویت قانون هوای پاک با تأکید بر ضمانت‌های اجرایی، تعیین دقیق مسئولیت‌ها و معیارهای سنجش عملکرد.
- ایجاد یک نهاد ملی هماهنگ‌کننده در سطح عالی، با اختیارات فرابخشی و پاسخ‌گو به نهادهای نظارتی مستقل.
- توسعه حمل‌ونقل عمومی پاک از طریق سرمایه‌گذاری در ناوگان‌های برقی، دوچرخه‌محور و خطوط ریلی شهری.
- استفاده از ابزارهای اقتصادی و مالیاتی برای مدیریت تقاضا، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و تشویق رفتارهای پایدار.

- ارتقای شفافیت اطلاعات و مشارکت عمومی از طریق اطلاع‌رسانی منظم، سامانه‌های برخط داده‌محور، آموزش و آگاهی‌رسانی گسترده.
 - تقویت همکاری بین‌المللی و انتقال دانش با بهره‌گیری از تجارب جهانی در مدیریت آلودگی هوا، خصوصاً در زمینه نوآوری‌های فناورانه و حکمرانی هوشمند.
- در نهایت، مقابله مؤثر با بحران آلودگی هوا در کلان‌شهرهای ایران، نیازمند عزم سیاسی قوی، اصلاحات ساختاری، رویکردی جامع‌نگر و مشارکت فعال کلیه بازیگران اعم از دولت، بخش خصوصی، نهادهای مدنی و شهروندان است. تحقق چنین رویکردی، نه تنها به بهبود کیفیت زندگی و سلامت عمومی می‌انجامد، بلکه گامی اساسی در جهت تحقق توسعه پایدار و عدالت محیط‌زیستی خواهد بود.

Extended Abstract

Introduction: Air pollution is one of the most critical environmental challenges facing the world today, particularly in rapidly urbanizing metropolitan areas where industrial activities, traffic emissions, and population density contribute to deteriorating air quality. The consequences of poor air quality extend beyond environmental degradation, directly impacting public health by increasing respiratory and cardiovascular diseases, reducing life expectancy, and placing a substantial burden on healthcare systems. Furthermore, air pollution undermines sustainable development goals by degrading ecosystems, reducing productivity, and increasing economic costs. In Iran, metropolitan cities such as Tehran, Isfahan, and Mashhad are among the most affected urban centers, where air pollution has reached alarming levels. This situation stems from a combination of factors including rapid urban growth, heavy reliance on fossil fuels, inefficient transportation systems, industrial emissions, and climatic conditions. However, a critical aspect that exacerbates this crisis is the weakness in the legal and institutional frameworks that govern air quality management.

Materials and methods: This review article aims to systematically analyze the legal and managerial approaches to combating air pollution in metropolitan areas, with a particular focus on Iran. It examines the existing national laws, regulations, and institutional arrangements related to air pollution control, such as the Clean Air Act and associated policies, assessing their strengths and limitations. The analysis relies on legal documents, governmental reports, and academic studies, with particular attention to institutional structures, enforcement mechanisms, and governance models. The fragmented responsibilities among various governmental bodies, lack of effective coordination, insufficient financial and technical resources, and limited enforcement mechanisms are identified as major obstacles in achieving air quality improvements. The article also explores the role of public participation and transparency in enhancing policy effectiveness, highlighting the current low levels of civic engagement in environmental governance in Iran. To provide a broader perspective, the study compares Iran's approaches with successful international examples, drawing on case studies from London, Beijing, and Mexico City.

Results: The review reveals that despite the existence of laws such as the Clean Air Act, Iran's air quality management suffers from structural weaknesses. Fragmented institutional responsibilities, inadequate enforcement, and insufficient funding undermine the effectiveness of policies. In contrast, international case studies demonstrate that comprehensive legal frameworks, coordinated governance, and innovative policy tools—such as low emission zones, vehicle restrictions, and economic incentives—have led to measurable improvements in air quality. These cities highlight the importance of integrating regulatory measures, technological innovation, and stakeholder participation to achieve sustainable outcomes.

Discussion and Conclusion: Drawing on the comparative analysis, the study proposes a set of strategic recommendations for Iran. Key proposals include establishing a centralized and empowered coordinating authority responsible for air quality management across sectors and jurisdictions, updating the legal framework

with clear standards and stricter enforcement provisions, and aligning policies with international best practices. Enhancing public awareness and participation through education and transparent reporting mechanisms is essential to foster community engagement and compliance. Furthermore, investment in sustainable urban transportation infrastructure, promotion of clean energy alternatives, and utilization of economic instruments such as pollution taxes and subsidies for green technologies are recommended to address the root causes of pollution. In conclusion, addressing the complex challenge of air pollution in Iran's metropolitan areas necessitates a holistic reform of both legal and managerial systems. Implementing these recommendations can improve air quality, enhance public health outcomes, and advance sustainable urban development in Iran, offering a model for other developing countries facing similar environmental challenges.

Keywords: Air Pollution, Environmental Governance, Legal Framework, Clean Air Act, Sustainable Urban Development, Public Participation.

منابع:

- Asadollahi, M. , Hajian, M. M. , Toosi, A. & Fallahzadeh, A. M. (2024). Designing a Model for Participatory Environmental Governance in Iran Case Study: Reducing Greenhouse Gas Emissions through Carbon Trading. *Majlis and Rahbord*, 31(119), 133-173. doi: 10.22034/mr.2023.5659.5343. [In Persian]
- Ashjaei, B., & Soleimani, E. (2023). *Review of the implementation measures and strategies of the Clean Air Law - Defects of the Law (19201)*. Research Center of the Islamic Consultative Assembly. Tehran, Iran. [In Persian]
- Assembly, U. G. (2022). The human right to a clean, healthy and sustainable environment: resolution/adopted by the General Assembly.
- Awewomom, J., Dzeble, F., Takyi, Y. D., Ashie, W. B., Ettey, E. N. Y. O., Afua, P. E., ... & Akoto, O. (2024). Addressing global environmental pollution using environmental control techniques: a focus on environmental policy and preventive environmental management. *Discover Environment*, 2(1), 8.
- Balali, H., Farzanegan, M. R., Zamani, O., & Baniasadi, M. (2024). Economic sanctions, energy consumption, and CO2 emissions in Iran: a system dynamics model. *Policy Studies*, 1-30. [In Persian]
- Boulianne, S., & Ohme, J. (2022). Pathways to environmental activism in four countries: social media, environmental concern, and political efficacy. *Journal of Youth Studies*, 25(6), 771-792.
- Bretter, C., & Schulz, F. (2025). Climate policy support in the UK: An interaction of worldviews and policy types. *Policy Studies Journal*, 53(2), 388-413.
- Chen, Z., Hao, X., Zhang, X., & Chen, F. (2021). Have traffic restrictions improved air quality? A shock from COVID-19. *Journal of cleaner production*, 279, 123622.
- Faizi, F. & Barakpur, N. (2022). Assessment of Development Plans of Tehran Metropolis and its Region from the Perspective of Climate Change Impacts. *Soffeh*, 32(2), 71-88. doi: 10.52547/sofeh.32.2.71. [In Persian]
- Farrokhi, M., Khankeh, H., Mehralipour, J., Shojafard, J., & Pourvakhshoori, N. (2025). Exploring the microplastics health impacts risk perception in Iranian people: Challenges and improvement strategies. *Environmental Health Engineering And Management Journal*, 12, 1-12. [In Persian]
- Hamidi, F. , Afshari, M. & Mashhadi, A. (2024). The Mechanisms of Guaranteeing the Right to Clean Air in Iran and International Documents. *Environment and Interdisciplinary Development*, 9(85), 83-98. doi: 10.22034/envj.2024.444120.1358. [In Persian]
- Khoshakhlagh, A. H., Mohammadzadeh, M., & Morais, S. (2023). Air quality in Tehran, Iran: Spatio-temporal characteristics, human health effects, economic costs and recommendations for good practice. *Atmospheric Environment: X*, 19, 100222. [In Persian]
- Li, W., Shao, L., Wang, W., Li, H., Wang, X., Li, Y., ... & Zhang, D. (2020). Air quality improvement in response to intensified control strategies in Beijing during 2013–2019. *Science of the Total Environment*, 744, 140776.

- Ma, L., Graham, D. J., & Stettler, M. E. (2021). Has the ultra low emission zone in London improved air quality?. *Environmental Research Letters*, 16(12), 124001.
- McKinley, G., Zuk, M., Höjer, M., Avalos, M., González, I., Iniestra, R., ... & Martínez, J. (2005). Quantification of local and global benefits from air pollution control in Mexico City. *Environ. Sci. Technol.* 39(7): 1954–1961.
- Rad, A. K., Nematollahi, M. J., Pak, A., & Mahmoudi, M. (2025). Predictive modeling of air quality in the Tehran megacity via deep learning techniques. *Scientific Reports*, 15(1), 1367. [In Persian]
- Ramezani, S., & Rahimi, M. (2024). Air Pollution Governance System: Application of Organizational Network Analysis of Clean Air Law Enforcement. [In Persian]
- Rodrigues, S. (2025). London's Ultra Low Emission Zone: A Transformative Initiative for Public Health and Urban Sustainability. *Journal of City Climate Policy and Economy*, 3(2/3), 199-203.
- Söderström, S., Kern, K., Boström, M., & Gilek, M. (2016). 'Environmental governance' and 'ecosystem management': avenues for synergies between two approaches. *Interdisciplinary Environmental Review*, 17(1), 1-19.
- Soudmandi, A. (2020). Irregularities and Weaknesses of the Clean Air Act Compared to the Prevention of Air Pollution Act. *Public Law Research*, 22(68), 141-170. doi: 10.22054/qjpl.2021.12223. [In Persian]
- Sumra, K. B., Siddique, H., Afzal, S., & Qazi, A. (2025). Sustainable smart cities: promotion of circular economy in urban GCC regions. *Journal of Science and Technology Policy Management*.
- Taghizadeh, F., Mokhtarani, B., & Rahmanian, N. (2023). Air pollution in Iran: The current status and potential solutions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6), 737. [In Persian]
- Talepour, N., Tahmasebi Birgani, Y., Kelly, F. J., Jaafarzadeh, N., & Goudarzi, G. (2025). Modeling future PM10 concentrations under climate change scenarios. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11(6), 1-18. [In Persian]
- UNION, P. (2008). Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. *Official Journal of the European Union*, 152, 1-44.



Journal of Environmental
Management and Law

فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست

<https://sanad.iau.ir/en/Journal/jeml>

Foresight of the Drivers for Enhancing and Developing Pro-Environmental Behaviors of Generation Z Human Resources in the Iranian Department of Environment

Hossein Hamzavi^{*1}, Seyedeh Marzieh Hosseini², Banafsheh Fotovat³, Hossein Abedi³

¹ Master's in Organizational Behavior Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran

² Master of Human Resources Development, Faculty of Management, Kar Higher Education, Qazvin, Iran

³ Assistant Professor Department of Management Kar Higher Education, Qazvin, Iran

*Corresponding Author: hossein.hamzvii@gmail.com

Original Paper

Abstract

Received: 2024.12.23

Accepted: 2025.06.13

Keywords:

Environment,
Pro-environmental
behavior,
Environmental
behavior,
Generation Z,
Foresight.

This study was conducted with the aim of identifying and prioritizing the driving forces for improving and developing pro-environmental behavior among Generation Z human resources in the Department of Environment of Iran. This research was based on the structural cross-impact matrix analysis method with a futures studies approach and, in terms of purpose, was developmental-applied in nature. The statistical population of the study consisted of 25 experts, including university professors and managers of the Department of Environment, selected purposively. The data were collected through library studies, structured interviews, and a qualitative questionnaire in the form of a structural cross-impact matrix, and were analyzed using MICMAC statistical software. The findings of this study revealed that the alignment of the organization's macro-strategies with environmental strategies in the human resources sector, the application of financial incentives and the establishment of an environmentally oriented motivational system, the design and implementation of specialized training courses and professional environmental empowerment of employees, and the institutionalization of environmental beliefs, values, and norms in a sustainable organizational structure and culture are the most influential drivers for improving and developing pro-environmental behavior among Generation Z human resources in the Department of Environment of Iran. The results showed that identifying and prioritizing these drivers enables organizations to strategically focus on strengthening environmental culture and behaviors, increasing the commitment of young human resources, and achieving alignment between individual and organizational goals.



Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the

آینده‌نگاری پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران

حسین حمزوی^{۱*}، سیده مرضیه حسینی^۲، بنفشه فتوت^۳، حسین عابدی^۳

۱- کارشناسی ارشد مدیریت رفتار سازمانی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد توسعه منابع انسانی، دانشکده مدیریت، دانشگاه عالی کار، قزوین، ایران

۳- استادیار، گروه مدیریت، مؤسسه آموزش عالی کار، قزوین، ایران

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hossein.hamzvii@gmail.com

نوع مقاله:	چکیده
علمی-پژوهشی	این پژوهش با هدف شناسایی و اولویت‌بندی پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران انجام شد. این پژوهش بر اساس روش تحلیل ماتریس اثرات متقابل ساختاری با رویکرد آینده‌نگاری و از نظر هدف، از نوع توسعه‌ای-کاربردی انجام و جامعه آماری این پژوهش، ۲۵ نفر از خبرگان شامل اساتید دانشگاه و مدیران سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران به روش هدفمند بود. داده‌های این پژوهش از طریق مطالعات کتابخانه‌ای، مصاحبه ساختاریافته و پرسشنامه کیفی به صورت ماتریس اثرات متقابل ساختاری جمع‌آوری شده و با نرم‌افزار آماری میک‌مک تجزیه و تحلیل شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که پیشران‌های همراهی راهبردهای کلان سازمانی با استراتژی‌های محیط‌زیستی بخش منابع انسانی، بکارگیری مشوق‌های مالی و ایجاد نظام انگیزشی ترغیب‌کننده مبتنی بر مؤلفه‌های محیط‌زیستی، طراحی و پیاده‌سازی دوره‌های آموزشی تخصصی و توانمندسازی حرفه‌ای محیط‌زیستی کارکنان، نهادینه‌سازی باورها، ارزش‌ها و هنجارهای محیط‌زیستی در ساختار و فرهنگ سازمانی پایدار به عنوان تأثیرگذارین پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران هستند. نتایج این پژوهش نشان داد که شناسایی و اولویت‌بندی پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران، موجب تمرکز هوشمندانه سازمان‌ها بر ارتقای فرهنگ و رفتارهای دوستدار محیط‌زیستی، افزایش تعهد منابع انسانی جوان و هم‌سویی اهداف فردی و سازمانی می‌شود.
تاریخچه مقاله:	
ارسال: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳	
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۳	
کلمات کلیدی:	
محیط‌زیست، رفتار دوستدار محیط‌زیست، رفتار محیط‌زیستی، نسل Z، آینده‌نگاری.	

مقدمه

در عصر کنونی، بحران‌های محیط‌زیستی جهانی و ضرورت تغییر در نگرش‌ها و رفتارهای انسان نسبت به محیط‌زیست، نقش منابع انسانی در سازمان‌های محیط‌زیستی را در جوامع به عنوان عاملان اصلی تغییر پررنگ‌تر ساخته است. در واقع، با همکاری میان منابع انسانی سازمان‌های محیط‌زیستی، سازمان‌ها و جوامع می‌توانند زمینه‌ساز دستیابی به اهداف محیط‌زیستی و تحقق توسعه پایدار کشور گردند (Mousavi, 2023). در سال‌های اخیر، تعداد منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست به طور قابل توجهی افزایش یافته و این نسل نقش مهمی در تحولات فرهنگی و رفتاری سازمان‌ها ایفا می‌کند. نسل Z به عنوان نسلی بوده که تولد آن‌ها بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۰ در نظر گرفته شده و دارای ویژگی‌هایی از قبیل فردگرایی، برابری، تفاوت‌پذیری، زندگی‌خواهی، محاسبه‌گری، بازاندیشی، تمایزجویی، ارتباط‌جویی و رفتارهای دوستدار محیط‌زیستی هستند (Hamzavi et al., 2025). از همین رو، منابع انسانی نسل Z با نگرش‌های نوآورانه و حساسیت بالا نسبت به مسائل محیط‌زیستی می‌توانند رفتارهای دوستدار محیط‌زیست را در سازمان ترویج دهند و حضور فعال آن‌ها در سازمان‌ها و برنامه‌های محیط‌زیستی به افزایش تعهد سازمانی و تقویت اقدامات توسعه پایدار کمک شایانی می‌کند (Dwidienawati et al., 2021). در واقع، رفتارهای دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی به مجموعه فعالیت‌ها و اقداماتی گفته می‌شود که افراد در زندگی روزمره یا محیط کاری خود انجام می‌دهند تا اثرات منفی انسانی بر محیط‌زیست را کاهش دهند و منابع طبیعی را حفظ و پایدار کنند. این رفتارها می‌توانند شامل صرفه‌جویی در مصرف انرژی و آب، کاهش تولید زباله، استفاده از حمل‌ونقل پاک و مشارکت در فعالیت‌های حفاظت محیطی باشند. در واقع، هدف اصلی این رفتارها، حمایت از محیط زیست و ارتقای کیفیت زندگی انسان‌ها و سایر موجودات زنده است (Xu et al., 2024). همچنین، براساس تئوری رفتار برنامه‌ریزی‌شده، رفتارهای دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z مجموعه‌ای از رفتارهای انتخابی هستند که نسل Z بر اساس نگرش مثبت خود نسبت به محیط زیست، باورهای اجتماعی و ادراک کنترل بر رفتار، انجام می‌دهند. این تئوری تأکید می‌کند که قصد فرد برای انجام رفتار، مهم‌ترین پیش‌بینی‌کننده رفتار دوستدار محیط‌زیست است و عوامل روان‌شناختی مانند نگرش، هنجارهای ذهنی و احساس کنترل شخصی نقش کلیدی در شکل‌گیری این رفتارها دارند (Taslim, 2023). در نهایت، بر مبنای تئوری ارزش‌ها و نگرش‌ها، رفتارهای دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z به عنوان اقداماتی تعریف می‌شود که ناشی از مجموعه‌ای از ارزش‌ها، باورها و هنجارهای اخلاقی فردی است. طبق این نظریه، افرادی که ارزش‌های محیط زیستی قوی دارند و به پیامدهای زیانبار رفتارهای انسانی برای محیط‌زیست آگاه هستند، بیشتر به انجام رفتارهای دوستدار محیط‌زیست تمایل نشان می‌دهند. در این چارچوب، احساس مسئولیت شخصی و نگرش مثبت نسبت به محیط زیست محرک اصلی برای اتخاذ اقدامات سازگار با طبیعت محسوب می‌شود (D'Arco et al., 2025). بنابراین، رفتارهای دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z مجموعه‌ای از اقدامات هدفمند هستند که با هدف کاهش اثرات منفی انسانی بر محیط‌زیست و حفظ منابع طبیعی انجام می‌شوند و شامل صرفه‌جویی در انرژی و آب، کاهش تولید زباله و مشارکت در فعالیت‌های حفاظت محیطی هستند. بررسی مطالعات نشان می‌دهد که رفتارهای دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z می‌توانند نقش کلیدی در بهبود وضعیت محیط‌زیستی سازمان‌ها و جوامع ایفا کنند. در واقع، این نسل با حساسیت بالای خود نسبت به پیامدهای محیط‌زیستی فعالیت‌ها و اقدامات، در کاهش مصرف منابع طبیعی مانند انرژی و آب مشارکت فعال دارند. از طرفی، آن‌ها با انتخاب روش‌های پایدار در انجام وظایف کاری، مانند استفاده از فناوری‌های سبز و کاهش تولید پسماند، اثرات منفی محیط‌زیستی را کاهش می‌دهند (Tran et al., 2022). افزون بر این، نسل Z به دلیل آشنایی و تمایل به نوآوری، می‌تواند ایده‌ها و راهکارهای خلاقانه برای مدیریت پسماند، بازیافت و کاهش انتشار گازهای آلاینده ارائه دهد. علاوه بر این، رفتارهای دوستدار محیط‌زیستی آن‌ها موجب فرهنگ‌سازی محیط‌زیستی در سازمان‌ها شده و همکاران و مدیران را نیز به رعایت اصول محیط‌زیستی تشویق می‌کند. همچنین، مشارکت فعال در برنامه‌ها و پروژه‌های

حفاظت از محیط زیست، امکان پایش و بهبود مستمر فرآیندهای سازمانی را فراهم می‌آورد (Irfany et al., 2024). از طرفی، تمرکز بر رفتارهای دوستدار محیط‌زیستی در محیط کار، مانند کاهش مصرف کاغذ، جداسازی زباله‌ها و استفاده از وسایل حمل‌ونقل پاک، باعث کاهش اثرات منفی جمعی بر محیط زیست می‌شود. رفتارهای دوستدار محیط‌زیست نسل Z همچنین موجب افزایش آگاهی عمومی و انتقال پیام‌های محیط‌زیستی به جامعه می‌گردد (Parzonko et al., 2021). از سوی دیگر، این نسل با همکاری و تعامل با ذی‌نفعان، شبکه‌ای از اقدامات محیط‌زیستی مؤثر ایجاد می‌نمایند. در نهایت، تعهد و مسئولیت‌پذیری این نسل در قبال محیط زیست، زمینه‌ساز تصمیم‌گیری‌های پایدار و بهبود بلندمدت کیفیت محیط‌زیست می‌شود. به این ترتیب، رفتارهای دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z نه تنها به کاهش اثرات مخرب سازمانی کمک می‌کند، بلکه مسیر توسعه پایدار و حفاظت از منابع محیط‌زیستی را نیز تقویت می‌نماید (Walia et al., 2025).

با این حال، یکی از دلایل اصلی کم‌توجهی مدیران به رفتارهای دوستدار محیط‌زیست، تمرکز بیش از حد بر اهداف کوتاه‌مدت سازمانی و شاخص‌های مالی است. بسیاری از مدیران، ارزش‌آفرینی محیط‌زیستی را به عنوان اولویت ثانویه در نظر می‌گیرند و اقدامات و رفتارهای دوستدار محیط‌زیستی را به دلیل زمان‌بر بودن یا هزینه‌بر بودن، نادیده می‌گیرند. علاوه بر این، کمبود آگاهی یا دانش تخصصی درباره تأثیرات بلندمدت رفتارهای دوستدار محیط‌زیستی، موجب کاهش توجه مدیریتی به ترویج این رفتارها در سازمان می‌شود (Arslan & Şar, 2018). از سوی دیگر، کارکنان نسل Z به دلیل محدودیت در آموزش‌ها و سیاست‌های سازمانی، ممکن است با نحوه اجرای رفتارهای دوستدار محیط‌زیست و رفتارهای سبز آشنا نباشند. از طرفی، فشارهای کاری، اولویت‌دهی به وظایف عملیاتی و نبود انگیزه‌های تشویقی نیز می‌تواند موجب شود این نسل منابع انسانی کمتر به رفتارهای محیط‌زیستی توجه کنند. همچنین، فقدان فرهنگ سازمانی پایدار و نبود الگوهای رفتاری محیط‌زیستی در محیط کار، مانع شکل‌گیری رفتارهای دوستدار محیط‌زیست در میان منابع انسانی نسل Z می‌شود (Abbasi et al., 2024). از همین رو، توجه به بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان‌ها حائز اهمیت است. در ادامه به بررسی پژوهش‌های انجام شده مرتبط با پیشران‌ها و عوامل مؤثر بر رفتار دوستدار محیط‌زیست مختلف می‌پردازیم.

D'Arco و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی به بررسی رفتار طرفدار محیط‌زیست نسل Z در زمینه گردشگری پرداختند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که هنجارهای اجتماعی بازدارنده و هنجارهای شخصی از عوامل اصلی اثرگذار بر رفتار طرفدار محیط‌زیست نسل Z در زمینه گردشگری هستند. همچنین، هنجارهای شخصی، پیش‌بینی‌کننده اصلی هستند. هنجارهای اجتماعی بازدارنده، هم به طور مستقیم و هم به طور غیرمستقیم از طریق هنجارهای شخصی، تأثیر مثبتی بر قصد نسل Z برای انتخاب روش‌های حمل و نقل پایدار و بروز رفتار طرفدار محیط‌زیست دارند. از دیدگاه تحلیلی-انتقادی، این پژوهش با وجود ارائه نقش هنجارهای شخصی و اجتماعی در رفتار محیط‌زیستی نسل Z، به تأثیر عوامل سازمانی و نهادی در شکل‌دهی این نوع رفتارها توجه نکرده است. همچنین، پتانسیل آینده‌پژوهانه برای پیش‌بینی تغییرات رفتار نسل Z در مواجهه با فناوری‌های نوین و تغییرات محیطی به‌طور محدود بررسی شده است.

seyf & seyf (۲۰۲۲) در پژوهشی به بررسی عوامل مؤثر بر رفتار محیط‌زیستی در تجربه زیسته کنشگران محیط‌زیست پرداختند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که پنج مقوله اصلی تأثیرگذار بر رفتار محیط‌زیستی افراد شامل جامعه‌پذیری محیط‌زیستی، نگرش محیط‌زیستی، سیاست‌گذاری ساختاری، فضای مجازی و مشکلات اقتصادی است. از دیدگاه تحلیلی-انتقادی، ضعف اصلی این پژوهش عدم توجه به نقش ابزارهای سازمانی در شکل‌دهی به رفتار دوستدار محیط‌زیستی کنشگران و همچنین مکانیزم‌های انگیزشی و کنترلی سازمان‌ها برای تقویت رفتارهای پایدار است. از منظر آینده‌پژوهانه، بررسی تعامل بین عوامل مؤثر شکل‌دهی رفتار دوستدار محیط‌زیستی می‌توانست چشم‌انداز دقیق‌تری از رفتار محیط‌زیستی در سطوح سازمانی و نهادی ارائه دهد.

Saracli & Boca (۲۰۲۱) در پژوهشی به بررسی عوامل مؤثر بر ادغام مؤثر تکنیک‌های مدیریت سبز در سازمان‌ها و کسب و کارها پرداختند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که عوامل شناسایی‌شده شامل نگرش‌های محیط‌زیستی، آموزش محیط‌زیستی و مشارکت در

فعالیت‌های محیط‌زیستی هستند. این عوامل به‌طور مستقیم بر رفتارهای محیط‌زیستی دانشجویان تأثیر می‌گذارند و نشان‌دهنده اهمیت آموزش و فرهنگ‌سازی در دانشگاه‌ها برای توسعه رفتارهای پایدار است. از دیدگاه تحلیلی-انتقادی، نگرش‌ها و آموزش محیط‌زیستی به‌عنوان محرک‌های کلیدی رفتار پایدار عمل می‌کنند اما از دیدگاه سازمانی، نقش سیاست‌های نهادی، منابع و حمایت‌های ساختاری برای تداوم و گسترش مدیریت محیط‌زیستی در سطح سازمان‌ها کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

Seif & Nematollahi (2019) در پژوهشی به بررسی عوامل مؤثر بر رفتار دوستدار محیط‌زیست پرداختند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که نگرانی، نگرش و دانش محیط‌زیستی تأثیر مستقیم و معناداری بر رفتارهای دوستدار محیط‌زیست دارند. همچنین، هنجارهای ذهنی، مسئولیت‌پذیری و وابستگی به طبیعت از طریق متغیرهای میانجی نگرانی، نگرش و دانش محیط‌زیستی تأثیر غیرمستقیم معناداری بر رفتار دوستدار محیط‌زیست دارند. از دیدگاه تحلیلی-انتقادی، ضعف اصلی این پژوهش در تمرکز صرف بر روابط علی-معلولی بین متغیرها و غفلت از تحلیل راهبردها و زمینه‌های شکل‌گیری رفتار دوستدار محیط‌زیست است.

Moradi (۲۰۱۹) در پژوهشی به ارزیابی تأثیر عوامل مؤثر بر رفتارهای محیط‌زیستی پرداخت. یافته‌های این پژوهش نشان داد که متغیر نگرانی‌های محیط‌زیستی رابطه‌ای مثبت و معنادار با نگرش‌ها، هنجارهای ذهنی و کنترل رفتاری درک‌شده دارد، در حالی که کیفیت محیطی درک‌شده رابطه‌ای مثبت و معنادار با نگرش‌ها، هنجارهای ذهنی، کنترل رفتاری درک‌شده و تعهدات اخلاقی نشان می‌دهد. علاوه بر این، نگرش‌ها، هنجارهای ذهنی، کنترل رفتاری درک‌شده و تعهدات اخلاقی به‌طور مثبت و معنادار بر قصد انجام رفتارهای مسئولانه محیط‌زیستی تأثیر می‌گذارند و قصد انجام رفتارهای مسئولانه محیط‌زیستی نیز رابطه‌ای مثبت و معنادار با خود رفتارهای مسئولانه محیط‌زیستی دارد. از دیدگاه تحلیلی-انتقادی، نقش چارچوب‌ها و سیاست‌های سازمانی در تقویت یا محدود کردن این نگرش‌ها و رفتارها به اندازه کافی مورد توجه قرار نگرفته است. علاوه بر این، پژوهش به مکانیزم‌های زمینه‌ساز نهادی که می‌توانند قصد و اجرای رفتارهای مسئولانه محیط‌زیستی را در سطح سازمانی تسهیل کنند، نپرداخته است.

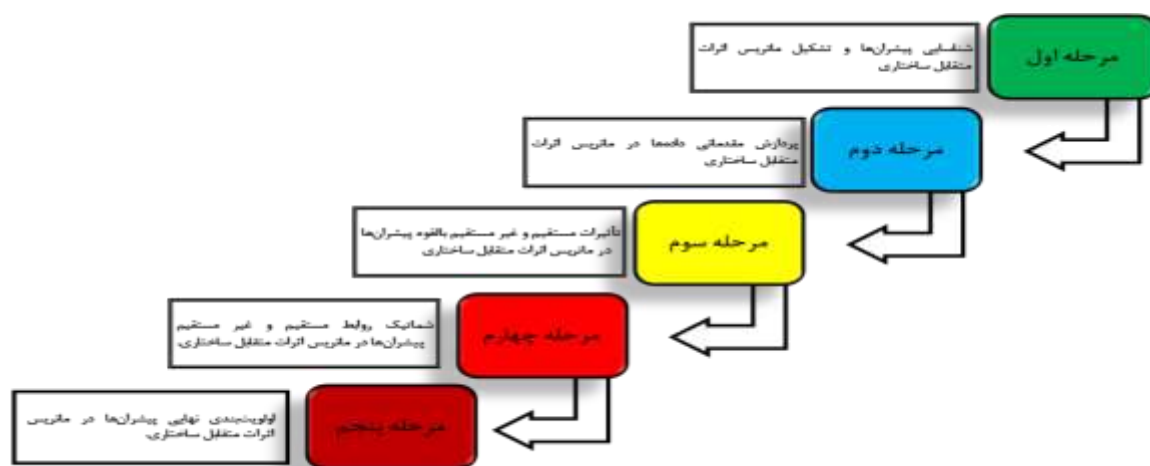
در نگاهی دیگر، موضوع پژوهش فعلی با چندین سند بالادستی کشور در دستیابی اهداف این اسناد مرتبط است؛ از جمله اسناد بالادستی می‌توان به سند ملی محیط‌زیست جمهوری اسلامی ایران اشاره کرد که اهداف و سیاست‌های کلان حفاظت محیط‌زیست را تعیین می‌کند و تأکید دارد مشارکت و همکاری دستگاه‌های مختلف در توسعه رفتار محیط‌زیستی ضروری است؛ همچنین، سند برنامه جامع آموزش همگانی محیط‌زیست که با رویکرد آموزش و فرهنگ‌سازی، مبنایی برای تقویت رفتارهای پایدار در منابع انسانی نسل Z فراهم می‌کند؛ و سند چشم‌انداز جمهوری اسلامی ایران در افق ۱۴۰۴ که توسعه منابع انسانی و رفتارهای پایدار را به‌صورت غیرمستقیم مورد تأکید قرار می‌دهد. توجه به این اسناد امکان تدوین چارچوبی هم‌راستا با سیاست‌ها و راهبردهای کلان کشور برای بهسازی رفتار محیط‌زیستی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست را فراهم می‌کند. در واقع، نوآوری و اهمیت انجام این پژوهش در آن است که با بهره‌گیری از ویژگی‌های نسل Z، مانند آگاهی محیط‌زیستی بالا و تمایل به مشارکت اجتماعی، می‌توان آن‌ها را به پیشران‌های مؤثر در توسعه رفتارهای دوستدار محیط‌زیست سازمانی تبدیل کرد، که نه تنها عملکرد سازمان را در حوزه حفاظت محیط‌زیست بهبود می‌بخشد، بلکه می‌تواند الگویی برای سایر دستگاه‌ها و سازمان‌های دولتی باشد. در انتها، باید بر اصل ۵۰ قانون اساسی تأکید نمود که بر حفظ محیط‌زیست سالم برای نسل‌های آینده تأکید دارد و دولت را موظف می‌کند که تدابیری برای حفاظت از منابع طبیعی و جلوگیری از آلودگی اتخاذ کند. با تقویت رفتارهای دوستدار محیط‌زیستی منابع انسانی نسل Z، سازمان حفاظت محیط‌زیست می‌تواند نقش مؤثری در اجرای عملی این اصل ایفا کند. به عبارت دیگر، آموزش، فرهنگ‌سازی و ایجاد انگیزه برای رفتار پایدار، هم اهداف سازمانی و هم تعهد قانونی کشور به حفظ محیط‌زیست را تحقق می‌بخشد.

با بررسی تحقیقات گذشته و توجه به خلأ پژوهشی در زمینه رفتارهای دوستدار محیط‌زیست، و از سوی دیگر، اهمیت منابع انسانی نسل Z به عنوان سرمایه‌ای کلیدی برای آینده سازمان‌ها، لزوم شناسایی و اولویت‌بندی پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران آشکار می‌شود. در واقع، مرور مطالعات نشان می‌دهد که با

شناسایی و اولویت‌بندی این پیشران‌ها با رهیافت آینده‌نگاری راهبردی، فرصت‌های ارزشمندی برای ارتقای فرهنگ محیط‌زیستی، افزایش تعهد منابع انسانی جوان، و مقابله با چالش‌های آتی این سازمان فراهم خواهد شد. همچنین، شناسایی و اولویت‌بندی پیشران‌های مذکور می‌تواند به سیاست‌گذاران، برنامه‌ریزان و مدیران سازمان کمک کند تا برنامه‌های بهسازی و توسعه رفتارهای دوستدار محیط‌زیست در منابع انسانی نسل Z را عملیاتی کرده و تصمیمات مؤثرتری در جهت تحقق توسعه پایدار اتخاذ نمایند. در مقابل، عدم شناسایی و اولویت‌بندی این پیشران‌ها ممکن است منجر به کاهش کارایی و اثربخشی راهبردهای محیط‌زیستی، ضعف در نهادینه‌سازی ارزش‌ها و هنجارهای پایدار، و در نهایت عدم دستیابی به اهداف کلان سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران گردد. بر این اساس، پژوهش حاضر با توجه به مبانی نظری و مطالعات پیشین، پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران را با رهیافت آینده‌نگاری راهبردی شناسایی کرده و از طریق گردآوری دیدگاه‌های خبرگان و تحلیل آن‌ها در قالب ماتریس اثرات متقابل ساختاری با استفاده از نرم‌افزار میک‌مک، به اولویت‌بندی این پیشران‌ها خواهد پرداخت. بنابراین، هدف این پژوهش شناسایی و اولویت‌بندی پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران با رویکرد آینده‌نگاری راهبردی است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف شناسایی و اولویت‌بندی پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران انجام شد. این پژوهش بر اساس روش تحلیل ماتریس اثرات متقابل ساختاری با رویکرد آینده‌نگاری و از نظر هدف، از نوع توسعه‌ای-کاربردی انجام شد. روش ماتریس تحلیل اثرات متقابل ساختاری با رویکرد آینده‌گاری، ابزاری کارآمد برای بازشناسی و اولویت‌بندی پیشران‌های مؤثر بر آینده است (Eshaghi Gordji et al., 2024). جامعه آماری این پژوهش، ۲۵ نفر از خبرگان شامل اساتید دانشگاه و مدیران سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران به روش هدفمند بود. به این صورت که، تعداد ۱۴ نفر از این خبرگان از اساتید دانشگاهی و اعضای هیأت علمی دانشگاه‌های دولتی کشور (با مدرک دکترای تخصصی، سابقه پژوهش در حوزه رفتار سازمانی و محیط‌زیست و حداقل ۱۲ سال سابقه تدریس) و ۱۱ نفر از خبرگان از مدیران سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران (با مدرک دکترای تخصصی، تجربه سمت مدیریت عالی و میانی و حداقل سابقه کاری ۱۵ سال) انتخاب شدند. داده‌های این پژوهش از طریق مطالعات کتابخانه‌ای، مصاحبه‌های ساختاریافته با خبرگان و استفاده از روش امتیازدهی در ماتریس میک‌مک، در بازه‌ی امتیاز صفر تا سه جمع‌آوری شد. جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار میک‌مک و تکیه بر امتیاز نهایی هر پیشران انجام شده و بر اساس میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری پیشران‌ها اولویت‌بندی شد. مراحل اجرای تحلیل اثرات متقابل ساختاری با رهیافت آینده‌گاری راهبردی به صورت زیر است (Salehi Sadaghyani et al., 2025؛ Rezaei Manesh et al., 2025):

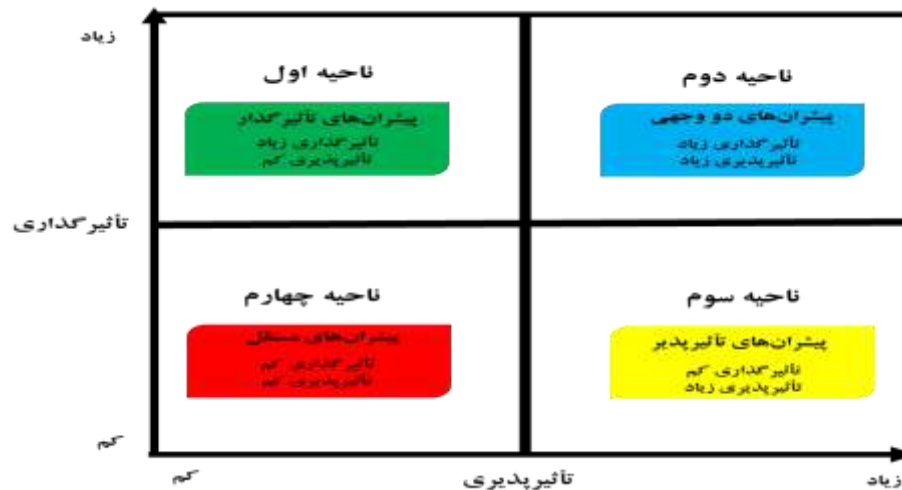


شکل ۱- مراحل اجرای تحلیل ماتریس اثرات متقابل ساختاری با رهیافت آینده‌گاری

Fig. 1 – The Procedure for Performing a Structural Cross-Impact Matrix Analysis as a Foresight Method

روش تحلیل اثرات متقابل ساختاری، ابزاری مؤثر برای بررسی احتمال وقوع پدیده‌ها در مجموعه‌ای از سناریوهای آینده، فهم پویایی‌های سیستم و شناسایی و رتبه‌بندی پیشران‌های کلیدی اثرگذار بر آینده است. در این رویکرد، تحلیل بر اساس ارزیابی تعاملات بالقوه میان عناصر مختلف و قضاوت‌های تخصصی درباره تأثیرات آن‌ها بر یکدیگر صورت می‌گیرد. در ماتریس اثرات متقابل ساختاری امتیازدهی به پارامترها (پیشران‌ها) به این صورت بوده که، امتیاز صفر (بدون تأثیر)، امتیاز یک (تأثیر ضعیف)، امتیاز دو (تأثیر متوسط) و امتیاز سه (تأثیر زیاد) است، که خبرگان از طریق مصاحبه نیمه ساختاریافته به پارامترها (پیشران‌ها) امتیاز خود را اعلام می‌نمایند. به این صورت که پیشران‌ها بر اساس میزان و شدت تأثیری که بر سایر پیشران‌های دیگر می‌گذارند، از صفر (بدون تأثیر) تا سه (تأثیر زیاد)، امتیاز آن‌ها اعلام می‌شود.

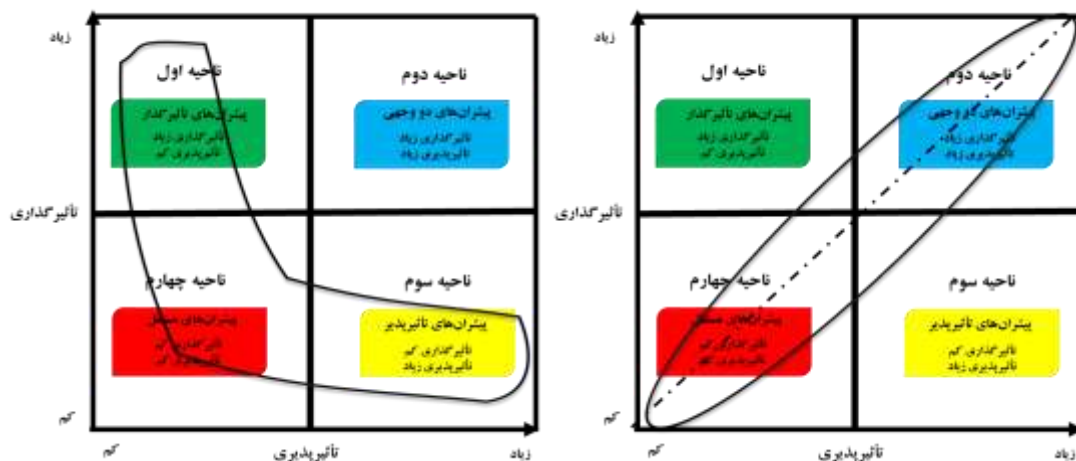
قبل از تحلیل اطلاعات باید بیان کرد که هر یک از پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران مطابق با ماتریس اثرات متقابل ساختاری بر اساس شکل ۲ در یک قسمت از ماتریس قرار می‌گیرند. بر اساس شکل ۲ پیشران‌های قرار گرفته در ناحیه اول ماتریس دارای بیشترین تأثیرگذاری (نفوذ) و کمترین تأثیرپذیری (وابستگی) بوده و به عنوان متغیرهای تأثیرگذار (نفوذی) شناخته می‌شوند؛ همچنین، پیشران‌های قرار گرفته در ناحیه دوم ماتریس دارای بیشترین تأثیرگذاری (نفوذ) و بیشترین تأثیرپذیری (وابستگی) بوده و به عنوان متغیرهای دو وجهی (پیوندی) شناخته می‌شوند. همچنین، پیشران‌های قرار گرفته در ناحیه سوم ماتریس دارای کمترین تأثیرگذاری (نفوذ) و بیشترین تأثیرپذیری (وابستگی) بوده و با عنوان متغیرهای وابسته (اثرپذیر) شناخته می‌شوند. و در نهایت، پیشران‌های قرار گرفته در ناحیه چهارم ماتریس دارای کمترین تأثیرگذاری (نفوذ) و کمترین تأثیرپذیری (وابستگی) بوده و به عنوان متغیرهای مستقل (حذف شونده) شناخته می‌شوند (Hamzavi et al., 2025).



شکل ۲- شماتیک پراکندگی پیشران‌ها در ماتریس اثرات متقابل ساختاری بر اساس تأثیرگذاری و تأثیرپذیری

Fig. 2 – Schematic of the dispersion of drivers in the structural cross-impact matrix based on influence and dependence

همچنین، نحوه توزیع و پراکندگی پیشران‌ها در ماتریس اثرات متقابل ساختاری نشان‌دهنده میزان پایداری یا ناپایداری سیستم است. بر اساس شکل شماره ۳، در سیستم‌های پایدار، پراکندگی پیشران‌ها به شکل L بوده که بیانگر تأثیرگذاری بالای برخی پیشران‌ها و پایداری کلی سیستم است. در این سیستم، جایگاه هر یک از عوامل به‌طور دقیق مشخص شده و نقش آن‌ها به‌وضوح قابل تشخیص است. در مقابل، در سیستم‌های ناپایدار، وضعیت پیچیده‌تر بوده و متغیرها به‌صورت پراکنده در امتداد محور قطری صفحه توزیع ماتریس اثرات متقابل ساختاری شده‌اند (Kooshki Jahromi et al., 2025).



شکل ۳- شماتیک پراکندگی پیشران‌ها در ماتریس اثرات متقابل ساختاری بر اساس پایداری و ناپایداری سیستم

Fig. 3 – A schematic for the dispersion of drivers within a structural cross-impact matrix based on system stability and instability

نتایج

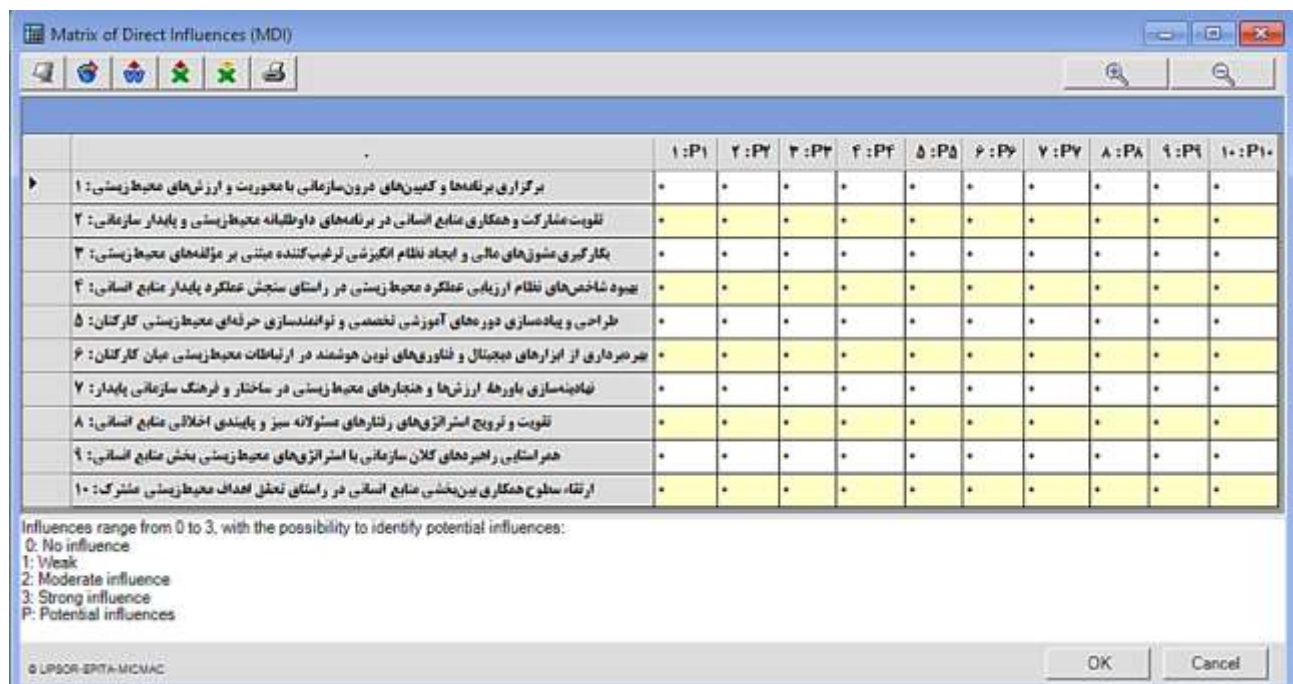
مرحله اول: شناسایی پیشران‌ها و تشکیل ماتریس اثرات متقابل ساختاری

به منظور بهره‌گیری از نظرات خبرگان، پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران مطابق با اسناد و مدارک موجود در پایگاه‌های معتبر علمی خارجی (اسکوپوس، امرالد، گوگل اسکولار، ساینس دایرکت، الزویر و ...) و پایگاه‌های معتبر داخلی (سیویلیکا، مگیران، نورمگز، علم‌نت، گنج و ...) شناسایی گردید. جهت شناسایی پیشران‌ها با توجه به حجم بالای مقالات و اسناد انتشاریافته، منابع انتخاب‌شده مربوط به بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ بودند. برای جست‌وجوی مقالات، اسناد و مدارک، از واژه‌های کلیدی متنوعی نظیر «رفتار دوستدار محیط‌زیست نسل Z»، «رفتارهای دوستدار محیط‌زیست نسل Z»، «رفتار مسئولانه محیط‌زیستی نسل Z»، «عوامل مؤثر بر رفتار دوستدار محیط‌زیست نسل Z» و «رفتار دوستدار محیط‌زیست نسل Z» استفاده شد. به منظور انتخاب مقالات مناسب، کل محتوای مقاله و موضوع پژوهش مورد بررسی دقیق قرار گرفت. در نهایت، پس از بررسی‌های انجام شده ۱۰ مورد از پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران شناسایی شد. در جدول ۱ پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱- پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران
Table 1 – Drivers for the Improvement and Development of Environmentally Friendly Behavior among Generation Z Human Resources in the Environmental Protection Organization of Iran

ردیف	پیشران‌ها	علامت اختصاری	مفهوم پیشران
۱	برگزاری برنامه‌ها و کمپین‌های درون‌سازمانی با محوریت و ارزش‌های محیط‌زیستی	P1	ایجاد آگاهی کارکنان از طریق فعالیت‌های اجتماعی با برگزاری کمپین‌های محیط‌زیستی در سازمان.
۲	تقویت مشارکت و همکاری منابع انسانی در برنامه‌های داوطلبانه محیط‌زیستی و پایدار سازمانی	P2	افزایش مشارکت فعال کارکنان نسل زد در پروژه‌ها و اقدامات سبز و محیط‌زیستی سازمانی.
۳	بکارگیری مشوق‌های مالی و ایجاد نظام انگیزشی ترغیب‌کننده مبتنی بر مؤلفه‌های محیط‌زیستی	P3	تشویق کارکنان به رفتارهای سبز با پاداش‌ها و سیستم انگیزشی کارآمد و اثربخش.
۴	بهبود شاخص‌های نظام ارزیابی عملکرد محیط‌زیستی در راستای سنجش عملکرد پایدار منابع انسانی	P4	سنجش و ارزیابی شاخص‌های دقیق عملکرد منابع انسانی در راستای توسعه رفتارهای سبز سازمانی.
۵	طراحی و پیاده‌سازی دوره‌های آموزشی تخصصی و توانمندسازی حرفه‌ای محیط‌زیستی کارکنان	P5	افزایش دانش و مهارت کارکنان برای فعالیت‌های محیط‌زیستی مؤثر و پایدار سازمان از طریق آموزش‌های تخصصی.
۶	بهره‌برداری از ابزارهای دیجیتال و فناوری‌های نوین هوشمند در ارتباطات محیط‌زیستی میان کارکنان	P6	ارتباطات سبز سریع و مؤثر کارکنان در فعالیت‌ها و برنامه‌های محیط‌زیستی سازمان با ابزارهای دیجیتال و هوشمند.
۷	نهادینه‌سازی باورها، ارزش‌ها و هنجارهای محیط‌زیستی در ساختار و فرهنگ سازمانی پایدار	P7	تقویت فرهنگ سازمانی پایدار با باورها، ارزش‌ها و هنجارهای محیط‌زیستی و سبز مشخص.
۸	تقویت و ترویج استراتژی‌های رفتارهای مسئولانه سبز و پایبندی اخلاقی منابع انسانی	P8	نهادینه‌سازی مقوله مسئولیت اجتماعی و پایبندی اخلاقی محیط‌زیستی میان منابع انسانی سازمان.
۹	همراستایی راهبردهای کلان سازمانی با استراتژی‌های محیط‌زیستی بخش منابع انسانی	P9	هماهنگی اهداف و مقاصد در سطح کلان سازمان با برنامه‌ها و استراتژی‌های سبز و محیط‌زیستی منابع انسانی.
۱۰	ارتقاء سطوح همکاری بین‌بخشی منابع انسانی در راستای تحقق اهداف محیط‌زیستی مشترک	P10	تقویت تعامل تیم‌ها و بخش‌ها برای تحقق پروژه‌ها و اهداف محیط‌زیستی سازمان.

از همین رو، ارتباط بالفعل و بالقوه بین پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران در ماتریس اثرات متقابل ساختاری در این پژوهش 10×10 بوده و مطابق شکل ۴ است.



شکل ۴- ماتریس اولیه پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران در نرم افزار میک‌مک

Fig. 4- An initial matrix of improvement drivers and development of pro-environmental behavior of Gen Z human resources at the Iran Department of Environment in MICMAC software

مرحله دوم: پردازش مقدماتی داده‌ها در ماتریس اثرات متقابل ساختاری

پس از تشکیل ماتریس اثرات متقابل ساختاری، خبرگان بر اساس طیف امتیازبندی میک‌مک میزان اثرگذاری و اثرپذیری بین پیشران‌ها را تعیین می‌نمایند (Bakhshizadeh Borj et al., 2025). نتایج حاصل از پردازش مقدماتی داده‌ها در ماتریس در جدول ۲ و درجه مطلوبیت و بهینه‌شدگی ماتریس (پایایی) در جدول ۳ قابل نمایش است. لازم به ذکر است مطابق با نظر خبرگان ماتریس اثرات متقابل ساختاری پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران از روایی مطلوبی برخوردار است.

جدول ۲- ویژگی‌های ماتریس اثرات متقابل ساختاری پیشران‌ها

Table 2 – Characteristics of the structural-driving force interaction matrix

شاخص	ابعاد ماتریس	تعداد تکرار	تعداد صفر	تعداد یک	تعداد دو	تعداد سه	جمع	درجه پرشدهی
مقدار	10×10	۲	۱۰	۴۴	۲۸	۱۸	۹۰	۹۵ درصد

جدول ۳- درجه مطلوبیت و بهینه‌شدگی ماتریس

Table 3 - Degree of desirability and optimality of the matrix

چرخش	تأثیرگذاری	تأثیرپذیری
۱	۹۹ درصد	۱۰۰ درصد
۲	۱۰۰ درصد	۱۰۰ درصد

بر اساس جدول ۳، درجه پرشدگی ماتریس برابر با ۹۵ درصد است که بیانگر میزان تأثیرگذاری پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران بر یکدیگر است. همچنین بر اساس جدول ۴، ماتریس تحلیل اثرات متقابل ساختاری تأثیرگذاری پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران، با استفاده از شاخص‌های آماری و دو بار چرخش داده‌ها، از مطلوبیت و بهینگی صد در صد برخوردار بوده که نشان‌دهنده مناسب بودن ابزار پژوهش (پایایی مناسب) است. پس از تأیید درجه مطلوبیت و بهینه‌شدگی ماتریس، در ادامه، میزان اثرگذاری یک بعد بر سایر ابعاد (حاصل جمع سطرهای ماتریس) و میزان اثرپذیری یک پیشران از سایر پیشران‌ها (حاصل جمع ستون‌های ماتریس)، در جدول زیر ارائه شده است. امتیاز کل برابر با ۱۵۴ است.

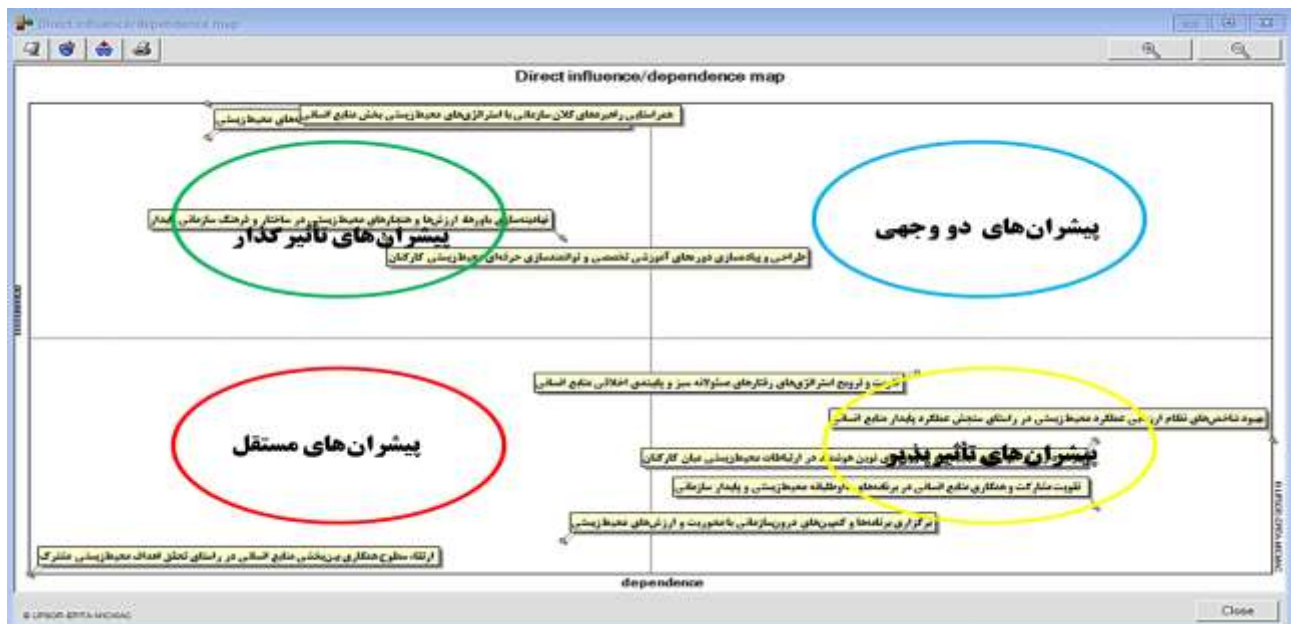
جدول ۴- نتایج اولیه میزان امتیاز اثرگذاری و اثرپذیری پیشران‌ها

Table 4 - Preliminary results show the influence and dependence scores of the drivers

ردیف	پیشران‌ها بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران	علامت اختصاری	تعداد امتیاز کل سطرها (تأثیرگذاری)	تعداد امتیاز کل ستون‌ها (تأثیرپذیری)
۱	برگزاری برنامه‌ها و کمپین‌های درون سازمانی با محوریت و ارزش‌های محیط‌زیستی	P1	۱۰	۱۵
۲	تقویت مشارکت و همکاری منابع انسانی در برنامه‌های داوطلبانه محیط‌زیستی و پایدار سازمانی	P2	۱۱	۱۸
۳	بکارگیری مشوق‌های مالی و ایجاد نظام انگیزشی ترغیب‌کننده مبتنی بر مؤلفه‌های محیط‌زیستی	P3	۲۲	۱۳
۴	بهبود شاخص‌های نظام ارزیابی عملکرد محیط‌زیستی در راستای سنجش عملکرد پایدار منابع انسانی	P4	۱۳	۱۹
۵	طراحی و پیاده‌سازی دوره‌های آموزشی تخصصی و توانمندسازی حرفه‌ای محیط‌زیستی کارکنان	P5	۱۹	۱۴
۶	بهره‌برداری از ابزارهای دیجیتال و فناوری‌های نوین هوشمند در ارتباطات محیط‌زیستی میان کارکنان	P6	۱۳	۱۸
۷	نهادینه‌سازی باورها، ارزش‌ها و هنجارهای محیط‌زیستی در ساختار و فرهنگ سازمانی پایدار	P7	۱۹	۱۵
۸	تقویت و ترویج استراتژی‌های رفتارهای مسئولانه سبز و پایبندی اخلاقی منابع انسانی	P8	۱۵	۱۷
۹	همراستایی راهبردهای کلان سازمانی با استراتژی‌های محیط‌زیستی بخش منابع انسانی	P9	۲۳	۱۳
۱۰	ارتقاء سطوح همکاری بین‌بخشی منابع انسانی در راستای تحقق اهداف محیط‌زیستی مشترک	P10	۹	۱۲
امتیاز کل			۱۵۴	۱۵۴

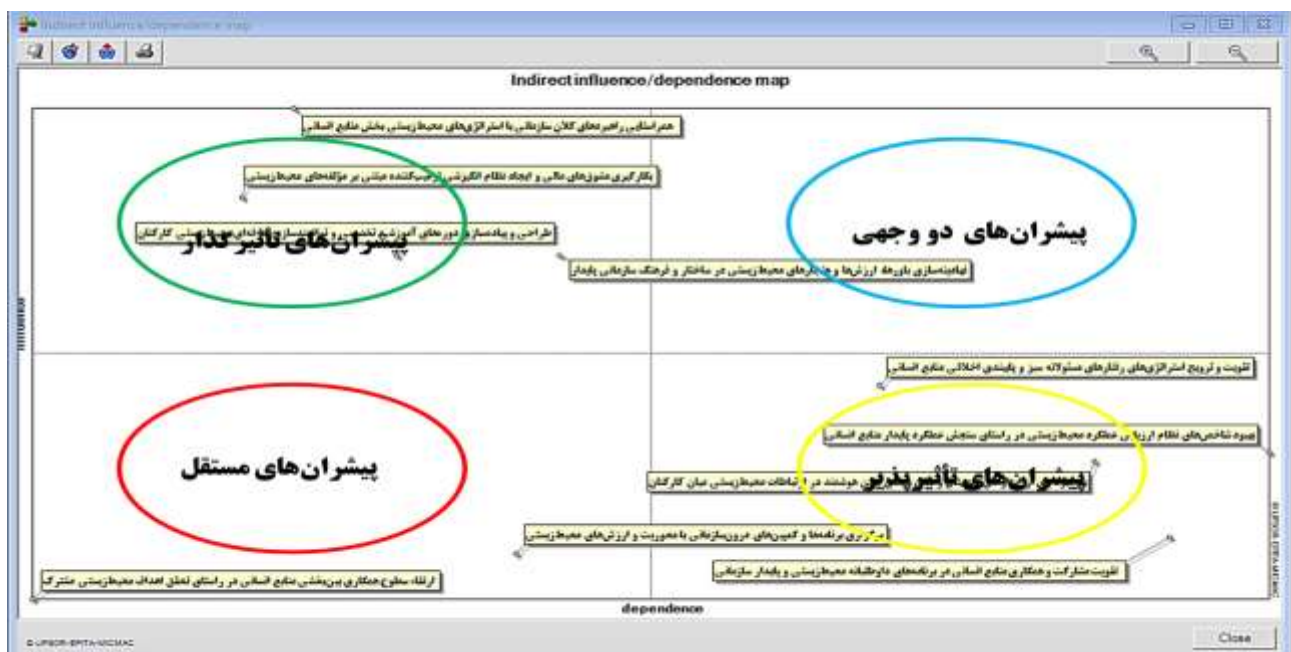
مرحله سوم: تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم بالقوه پیشران‌ها در ماتریس اثرات متقابل ساختاری

در این مرحله، دو ماتریس تأثیرات مستقیم بالقوه (اثر وابستگی مستقیم) و تأثیرات غیرمستقیم بالقوه (اثر وابستگی غیرمستقیم) نیز با تخصیص یک مقدار متناظر به مقادیر تعریف شده در نرم‌افزار میک‌مک به دست می‌آیند، که شامل تأثیرگذاری و تأثیرپذیری برای اولویت‌بندی پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران مدنظر هستند. در شکل ۵ و ۶ نیز ماتریس اثر وابستگی مستقیم بر اساس تحلیل میک‌مک نیز بدست آمده است.



شکل ۵- ماتریس اثر وابستگی مستقیم

Fig. 5: Direct Dependency Influence Matrix



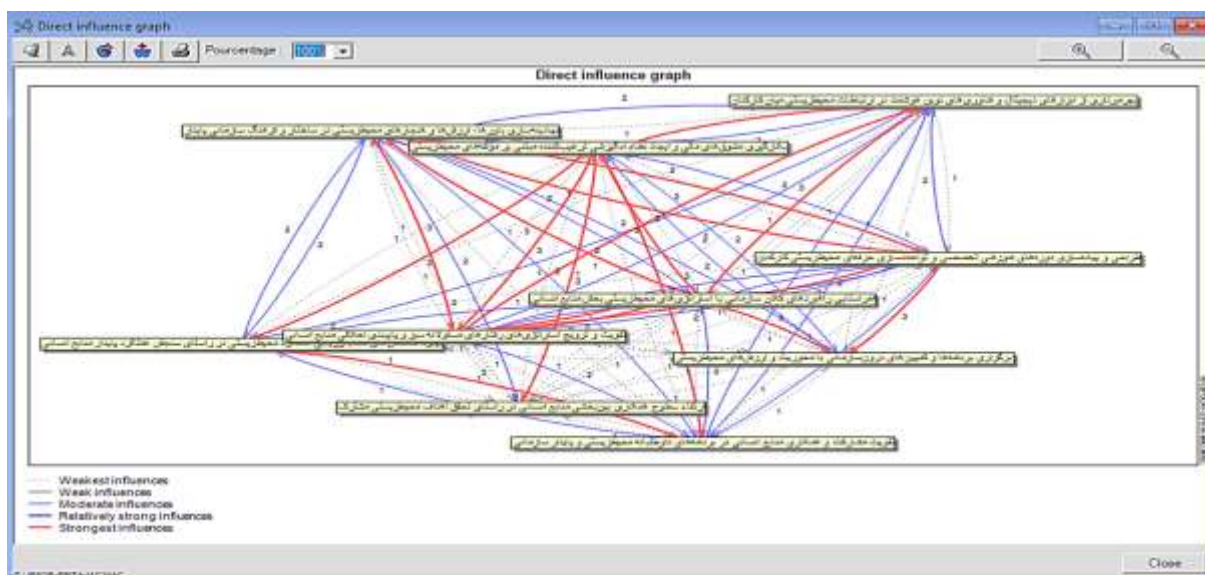
شکل ۶- ماتریس اثر وابستگی غیر مستقیم

Fig. 6 - indirect dependence effect matrix

همانطور که در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده شماتیک پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران در وضعیت مطلوب بوده، به‌طوری که قرارگیری پیشران‌ها از نظر پراکندگی تأثیرگذاری و تأثیرپذیری به شکل کاملاً واضح در حالت پایدار و در دو ناحیه متغیرهای تأثیرگذار، تأثیرپذیر و مستقل پراکنده شده‌اند. بنابراین، در این سیستم، جایگاه هر یک از پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران به‌طور دقیق مشخص شده و نقش آن‌ها به‌وضوح قابل تشخیص است.

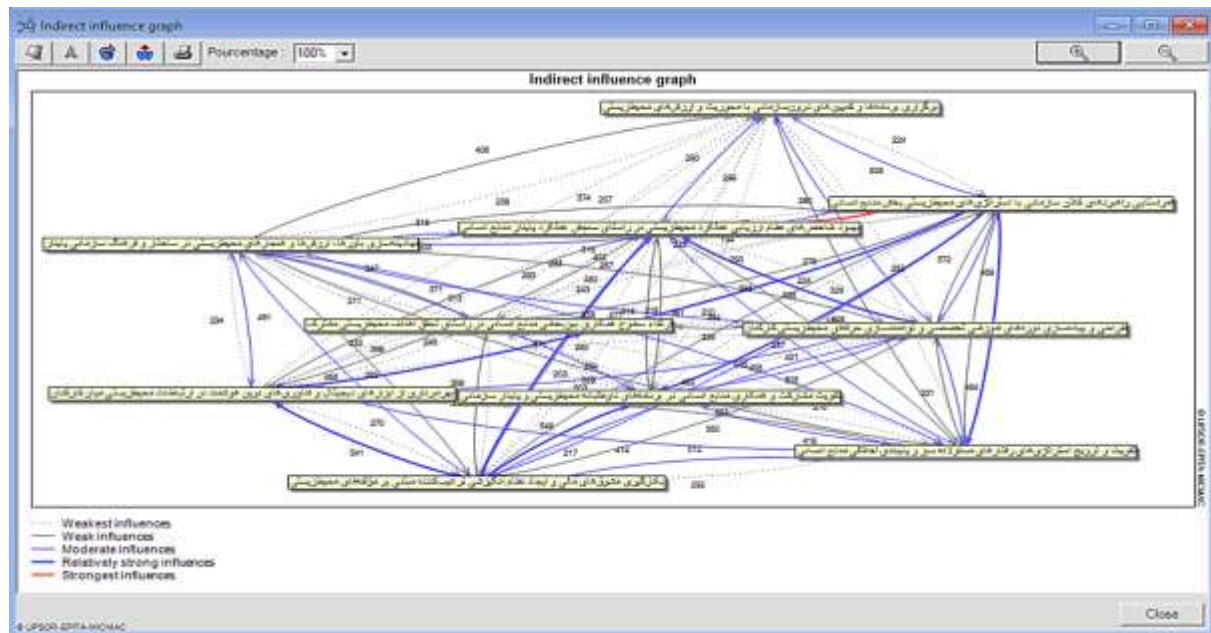
مرحله چهارم: شماتیک روابط مستقیم و غیرمستقیم پیشران‌ها در ماتریس اثرات متقابل ساختاری

در این مرحله، روابط مستقیم و غیرمستقیم ابعاد در ماتریس اثرات متقابل ساختاری بر اساس امتیازی که به ابعاد تعلق گرفته است نمایش داده می‌شود. در این تصاویر تأثیر زیاد (خطوط قرمز)، متوسط (خطوط آبی)، کم (خطوط مشکی)، خیلی کم (خطوط نقطه چین) به آن‌ها تعلق گرفته است (Hamzavi et al., 2025). در شکل ۷ و ۸ تأثیرگذاری پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران در سطح پوشش ۱۰۰ درصد به ترتیب روابط مستقیم و غیرمستقیم بین پیشران‌ها نمایش داده شده است.



شکل ۷- روابط مستقیم بین پیشران‌ها با پوشش ۱۰۰ درصد

Fig. 7- Direct relationships between drivers with 100% coverage



شکل ۸- روابط غیرمستقیم بین پیشران‌ها با پوشش ۱۰۰ درصد

Fig. 8 – Indirect relationships between drivers with 100% coverage

مرحله پنجم: اولویت‌بندی نهایی پیشران‌ها در ماتریس اثرات متقابل ساختاری

در این مرحله، بر اساس تحلیل روابط مستقیم اولویت‌بندی پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران بر اساس بیشترین تأثیرگذاری و تأثیرپذیری در میک‌مک به تفکیک در جدول ۵ و ۶ آورده شده است.

جدول ۵- اولویت‌بندی پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران به تفکیک تأثیرگذاری

Table 5- Prioritization of Drivers for Enhancing and Developing Pro-environmental Behavior among Generation Z Human Resources in Iran's Department of Environment, by Impact

ردیف	اولویت‌بندی بر اساس تأثیرگذاری	علامت اختصاری	امتیاز نهایی به دست آمده	
			تأثیرگذاری مستقیم	تأثیرگذاری غیرمستقیم
۱	همراستایی راهبردهای کلان سازمانی با استراتژی‌های محیط‌زیستی بخش منابع انسانی	P9	۱۴۹۳	۱۴۷۵
۲	بکارگیری مشوق‌های مالی و ایجاد نظام انگیزشی ترغیب‌کننده مبتنی بر مؤلفه‌های محیط‌زیستی	P3	۱۴۲۸	۱۳۱۹
۳	طراحی و پیاده‌سازی دوره‌های آموزشی تخصصی و توانمندسازی حرفه‌ای محیط‌زیستی کارکنان	P5	۱۲۳۳	۱۲۱۸
۴	نهادینه‌سازی باورها، ارزش‌ها و هنجارهای محیط‌زیستی در ساختار و فرهنگ سازمانی پایدار	P7	۱۲۳۳	۱۲۱۷
۵	تقویت و ترویج استراتژی‌های رفتارهای مسئولانه سبز و پایبندی اخلاقی منابع انسانی	P8	۹۷۴	۹۹۱

ردیف	اولویت‌بندی بر اساس تأثیرگذاری	علامت اختصاری	امتیاز نهایی به دست آمده	
			تأثیرگذاری مستقیم	تأثیرگذاری غیرمستقیم
۶	بهبود شاخص‌های نظام ارزیابی عملکرد محیط‌زیستی در راستای سنجش عملکرد پایدار منابع انسانی	P4	۸۴۴	۸۷۴
۷	بهره‌برداری از ابزارهای دیجیتال و فناوری‌های نوین هوشمند در ارتباطات محیط‌زیستی میان کارکنان	P6	۸۴۴	۸۵۹
۸	تقویت مشارکت و همکاری منابع انسانی در برنامه‌های داوطلبانه محیط‌زیستی و پایدار سازمانی	P2	۷۱۴	۷۲۶
۹	برگزاری برنامه‌ها و کمپین‌های درون‌سازمانی با محوریت و ارزش‌های محیط‌زیستی	P1	۶۴۹	۶۹۷
۱۰	ارتقاء سطوح همکاری بین‌بخشی منابع انسانی در راستای تحقق اهداف محیط‌زیستی مشترک	P10	۵۸۴	۶۱۸

جدول ۶- اولویت‌بندی پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران به تفکیک تأثیرپذیری

Table 6- Prioritization of Drivers for Enhancing and Developing Pro-environmental Behavior among Generation Z Human Resources in Iran's Department of Environment, by Receptivity

ردیف	اولویت‌بندی بر اساس تأثیرپذیری	علامت اختصاری	امتیاز نهایی به دست آمده	
			تأثیرگذاری مستقیم	تأثیرگذاری غیرمستقیم
۱	بهبود شاخص‌های نظام ارزیابی عملکرد محیط‌زیستی در راستای سنجش عملکرد پایدار منابع انسانی	P4	۱۲۳۳	۱۲۱۹
۲	تقویت مشارکت و همکاری منابع انسانی در برنامه‌های داوطلبانه محیط‌زیستی و پایدار سازمانی	P2	۱۱۶۸	۱۱۸۴
۳	بهره‌برداری از ابزارهای دیجیتال و فناوری‌های نوین هوشمند در ارتباطات محیط‌زیستی میان کارکنان	P6	۱۱۶۸	۱۱۵۷
۴	تقویت و ترویج استراتژی‌های رفتارهای مسئولانه سبز و پایبندی اخلاقی منابع انسانی	P8	۱۱۰۳	۱۰۸۲
۵	برگزاری برنامه‌ها و کمپین‌های درون‌سازمانی با محوریت و ارزش‌های محیط‌زیستی	P1	۹۷۴	۹۶۹
۶	نهادینه‌سازی باورها، ارزش‌ها و رفتارهای محیط‌زیستی در ساختار و فرهنگ سازمانی پایدار	P7	۹۷۴	۹۵۴
۷	طراحی و پیاده‌سازی دوره‌های آموزشی تخصصی و توانمندسازی حرفه‌ای محیط‌زیستی کارکنان	P5	۹۰۹	۹۱۲
۸	بکارگیری مشوق‌های مالی و ایجاد نظام انگیزشی ترغیب‌کننده مبتنی بر مؤلفه‌های محیط‌زیستی	P3	۸۴۴	۸۷۶
۹	همراستایی راهبردهای کلان سازمانی با استراتژی‌های محیط‌زیستی بخش منابع انسانی	P9	۸۴۴	۸۵۸
۱۰	ارتقاء سطوح همکاری بین‌بخشی منابع انسانی در راستای تحقق اهداف محیط‌زیستی مشترک	P10	۷۷۹	۷۸۴

مطابق با یافته‌ها و تحلیل روابط مستقیم و غیرمستقیم بین پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران، مشاهده می‌شود که پیشران‌های همراستایی راهبردهای کلان سازمانی با استراتژی‌های محیط‌زیستی بخش منابع انسانی، بکارگیری مشوق‌های مالی و ایجاد نظام انگیزشی ترغیب‌کننده مبتنی بر مؤلفه‌های محیط‌زیستی، طراحی و پیاده‌سازی دوره‌های آموزشی تخصصی و توانمندسازی حرفه‌ای محیط‌زیستی کارکنان، نهادینه‌سازی باورها، ارزش‌ها و هنجارهای محیط‌زیستی در ساختار و فرهنگ سازمانی پایدار به عنوان پیشران‌های تأثیرگذار هستند. همچنین، مشاهده می‌شود که پیشران‌های بهبود شاخص‌های نظام ارزیابی عملکرد محیط‌زیستی در راستای سنجش عملکرد پایدار منابع انسانی، تقویت مشارکت و همکاری منابع انسانی در برنامه‌های داوطلبانه محیط‌زیستی و پایدار سازمانی، بهره‌برداری از ابزارهای دیجیتال و فناوری‌های نوین هوشمند در ارتباطات محیط‌زیستی میان کارکنان، تقویت و ترویج استراتژی‌های رفتارهای مسئولانه سبز و پابندی اخلاقی منابع انسانی به عنوان پیشران‌های تأثیرپذیر هستند. در نهایت، مشاهده می‌شود که پیشران‌های برگزاری برنامه‌ها و کمپین‌های درون‌سازمانی با محوریت و ارزش‌های محیط‌زیستی، ارتقاء سطوح همکاری بین‌بخشی منابع انسانی در راستای تحقق اهداف محیط‌زیستی مشترک به عنوان پیشران‌های مستقل هستند.

بحث و نتیجه گیری

امروزه، بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان‌ها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا این نسل به‌طور طبیعی گرایش بیشتری به ارزش‌های پایدار و فناوری‌های نوین دارد. شناسایی و تقویت پیشران‌های مؤثر بر این موضوع می‌تواند موجب ارتقای آگاهی محیط‌زیستی، افزایش مشارکت داوطلبانه و ایجاد حس تعلق در میان آن‌ها شود. علاوه بر این، تمرکز بر چنین پیشران‌هایی موجب هم‌سویی اهداف فردی و سازمانی و کاهش تعارضات رفتاری در محیط کار می‌گردد. در نهایت، این رویکرد نه تنها به بهبود عملکرد محیط‌زیستی منجر می‌شود، بلکه بهره‌وری سازمانی و مشروعیت اجتماعی سازمان را نیز ارتقا می‌بخشد. لذا، هدف از انجام این پژوهش، شناسایی و اولویت‌بندی پیشران‌های بهسازی و توسعه رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران بود.

در وهله اول، یافته‌های این پژوهش نشان داد که پیشران‌های همراستایی راهبردهای کلان سازمانی با استراتژی‌های محیط‌زیستی بخش منابع انسانی، بکارگیری مشوق‌های مالی و ایجاد نظام انگیزشی ترغیب‌کننده مبتنی بر مؤلفه‌های محیط‌زیستی، طراحی و پیاده‌سازی دوره‌های آموزشی تخصصی و توانمندسازی حرفه‌ای محیط‌زیستی کارکنان، نهادینه‌سازی باورها، ارزش‌ها و هنجارهای محیط‌زیستی در ساختار و فرهنگ سازمانی پایدار به عنوان پیشران‌های تأثیرگذار هستند. به این معنا که این پیشران‌ها از قدرت تأثیرگذاری به شدت بالایی در برابر سایر پیشران‌های شناسایی‌شده، دارند. به عبارت دیگر، میزان تأثیرگذاری این پیشران‌ها، موجب می‌شود که قابلیت به شدت بالایی جهت پایداری سیستم ایفا نمایند. بر همین اساس، می‌توان استنباط نمود که پیشران همراستایی راهبردهای کلان سازمانی با استراتژی‌های محیط‌زیستی منابع انسانی موجب می‌شود که سیاست‌های کلان، تصمیمات مدیریتی و رفتارهای منابع انسانی نسل Z در یک مسیر هماهنگ حرکت کنند. این هم‌سویی ضمن کاهش تعارضات و دوباره‌کاری‌ها، موجب می‌شود منابع انسانی نسل Z بدانند اقدامات محیط‌زیستی آنان بخشی از چشم‌انداز کلی سازمان است. زمانی که کارکنان چنین درکی از پیوستگی اهداف داشته باشند، احساس معنا و هدفمندی بیشتری خواهند یافت. این موضوع به افزایش انگیزه، وفاداری و مشارکت در اجرای برنامه‌های محیط‌زیستی می‌انجامد. در نهایت، انسجام سازمانی و بهره‌وری محیط زیستی به شکل چشمگیری ارتقا پیدا خواهد کرد. از طرفی، پیشران بکارگیری مشوق‌های مالی و نظام‌های انگیزشی مبتنی بر محیط‌زیست یکی از مهم‌ترین ابزارهای اثرگذار بر رفتار این نسل است. نسل Z به‌دلیل تمایل به عدالت سازمانی و شفافیت، واکنش مثبتی به نظام‌های پاداش‌دهی شفاف و مرتبط با اقدامات محیط‌زیستی دارد. این نظام‌ها نه

تنها موجب تشویق رفتارهای محیط‌زیستی فردی مانند کاهش مصرف انرژی و مدیریت پسماند می‌شوند، بلکه الگویی مثبت برای سایر کارکنان نیز ایجاد می‌کنند. همچنین، وقتی مشوق‌ها در قالب مالی، غیرمالی و نمادین طراحی شوند، طیف متنوعی از انگیزه‌ها پوشش داده خواهد شد. بنابراین، پایداری رفتارهای محیط‌زیستی و نهادینه‌شدن آن در فرهنگ سازمانی تضمین می‌شود. از سوی دیگر، پیشران طراحی و اجرای دوره‌های آموزشی تخصصی محیط‌زیستی به منابع انسانی نسل Z کمک می‌کند تا دانش، نگرش و مهارت‌های لازم برای اجرای رفتارهای دوستدار محیط زیست و پایدار را کسب کنند. در واقع، نسل Z که گرایش بالایی به یادگیری دیجیتال و مهارت‌افزایی دارد، به‌طور ویژه از چنین برنامه‌هایی استقبال می‌کند. این آموزش‌ها نه تنها آگاهی نظری ایجاد می‌کنند، بلکه با تمرکز بر دوره‌های آموزشی عملی، امکان تجربه و کاربرد رفتارهای محیط‌زیستی و پایدار را نیز فراهم می‌سازند. در نتیجه، منابع انسانی نسل Z به‌جای اقدامات سطحی، توانایی اجرای راه‌حل‌های خلاقانه و پایدار را پیدا می‌کنند. این فرآیند مستقیماً به ارتقای کیفیت عملکرد فردی و سازمانی منجر خواهد شد. در نهایت، پیشران نهادینه‌سازی باورها، ارزش‌ها و هنجارهای محیط‌زیستی در فرهنگ سازمانی، پایه‌ای‌ترین اقدام برای تغییر رفتار پایدار منابع انسانی نسل Z است. وقتی ارزش‌های محیط‌زیستی در سیاست‌ها، آیین‌نامه‌ها و هویت فرهنگی سازمان جایگاه واقعی پیدا کنند، رفتار دوستدار محیط‌زیستی به بخشی از وظایف عادی کارکنان تبدیل می‌شود. نسل Z که به هویت جویی و معناگرایی در کار علاقه‌مند است، در چنین محیطی احساس تعلق و انگیزش بیشتری خواهد داشت. علاوه بر این، ارزش‌های مشترک محیط‌زیستی زمینه‌ساز تقویت همکاری، همبستگی و کاهش مقاومت در برابر تغییر می‌شوند. یافته‌های این بخش با نتایج پژوهش seyf & (۲۰۲۲) همخوانی نسبی دارد. به این صورت که محققان پنج مقوله اصلی تأثیرگذار بر رفتار محیط‌زیستی افراد شامل جامعه‌پذیری محیط‌زیستی، نگرش محیط‌زیستی، سیاست‌گذاری ساختاری، فضای مجازی و مشکلات اقتصادی را شناسایی کردند. این مقوله‌ها با پیشران‌های شناسایی شده اثرگذار همراستایی دارند.

در وهله دوم، یافته‌های این پژوهش نشان داد که پیشران‌های بهبود شاخص‌های نظام ارزیابی عملکرد محیط‌زیستی در راستای سنجش عملکرد پایدار منابع انسانی، تقویت مشارکت و همکاری منابع انسانی در برنامه‌های داوطلبانه محیط‌زیستی و پایدار سازمانی، بهره‌برداری از ابزارهای دیجیتال و فناوری‌های نوین هوشمند در ارتباطات محیط‌زیستی میان کارکنان، تقویت و ترویج استراتژی‌های رفتارهای مسئولانه سبز و پایبندی اخلاقی منابع انسانی به عنوان پیشران‌های تأثیرپذیر هستند. به این معنا که این پیشران‌ها از قدرت تأثیرپذیری به شدت بالایی در برابر سایر پیشران‌های شناسایی شده، دارند. به عبارت دیگر، میزان تأثیرپذیری این پیشران‌ها، موجب می‌شود که در جهت پایداری سیستم تحت تأثیر سایر پیشران‌ها نقش خود را ایفا نمایند. بر همین اساس، می‌توان استنباط نمود که پیشران بهبود شاخص‌های نظام ارزیابی عملکرد محیط‌زیستی در راستای سنجش عملکرد پایدار منابع انسانی موجب می‌شود اقدامات و رفتارهای دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z به‌طور دقیق‌تر سنجیده و پایش شوند. بهبود این شاخص‌ها نسل Z را قادر می‌سازد تا پیشرفت فردی و تیمی خود را در مسیر اهداف محیط‌زیستی مشاهده کنند. وقتی نتایج عملکرد به صورت شفاف و مستمر ارائه شوند، انگیزه و تعهد منابع انسانی برای ارتقای رفتارهای دوستدار محیط‌زیست افزایش می‌یابد. علاوه بر این، داده‌های ارزیابی می‌توانند به مدیران در تصمیم‌گیری‌های بهینه و تخصیص منابع کمک کنند. در نهایت، این فرایند به بهبود مستمر عملکرد سازمانی و نهادینه شدن رفتارهای محیط‌زیستی منجر می‌شود. از سوی دیگر، پیشران تقویت مشارکت و همکاری منابع انسانی در برنامه‌های داوطلبانه محیط‌زیستی و پایدار سازمانی موجب ایجاد حس مسئولیت اجتماعی و تعلق سازمانی می‌شود. در واقع، نسل Z که به ارزش‌های جمعی و همکاری گروهی اهمیت می‌دهد، در چنین برنامه‌هایی انگیزه بیشتری برای مشارکت خواهد داشت. این مشارکت نه تنها رفتارهای دوستدار محیط‌زیست را تقویت می‌کند، بلکه فرهنگ سازمانی را نیز در جهت پایداری محیط‌زیستی غنی‌تر می‌سازد. علاوه بر این، برنامه‌های داوطلبانه تجربه عملی و تعامل میان‌بخشی را فراهم می‌کنند. نتیجه نهایی، افزایش انسجام تیمی، تعهد اخلاقی و اثرگذاری محیط‌زیستی سازمان است. از طرفی، پیشران بهره‌برداری از ابزارهای دیجیتال و فناوری‌های نوین هوشمند در ارتباطات محیط‌زیستی میان کارکنان امکان تسهیل ارتباط، اشتراک دانش و اطلاع‌رسانی سریع درباره فعالیت‌های محیط‌زیستی را فراهم می‌کند. در واقع، نسل Z به دلیل

آشنایی و علاقه به فناوری‌های نوین، این نوع ارتباطات را بسیار مؤثر و جذاب می‌بیند. بهره‌برداری از این ابزارها موجب افزایش مشارکت، شفافیت و سرعت تصمیم‌گیری در پروژه‌های محیط‌زیستی می‌شود. همچنین، ارتباطات دیجیتال موجب مستندسازی و رصد دقیق‌تر فعالیت‌ها و رفتارهای دوستدار محیط‌زیستی شده و بازخورد سریع را فراهم می‌آورد. لذا، این فناوری‌ها به نهادینه شدن رفتارهای محیط‌زیستی و ارتقای فرهنگ سبز سازمان کمک می‌کنند. در نهایت، پیشران تقویت و ترویج استراتژی‌های رفتارهای مسئولانه سبز و پایبندی اخلاقی منابع انسانی موجب می‌شود ارزش‌های محیط‌زیستی در تمامی تصمیمات و عملکردهای کارکنان جاری شود. این نسل که به شفافیت و اخلاق حرفه‌ای حساس است، با مشاهده رفتارهای مسئولانه دیگران، خود را ملزم به رعایت آن‌ها می‌داند. این فرایند علاوه بر ارتقای تعهد فردی، همگرایی و همکاری میان کارکنان را نیز افزایش می‌دهد. همچنین، اخلاق‌گرایی و مسئولیت‌پذیری محیط‌زیستی، اعتماد سازمانی و مشروعیت اجتماعی سازمان را تقویت می‌کند. در نهایت، این رویکرد رفتارهای دوستدار محیط‌زیستی را پایدار کرده و موجب بهبود عملکرد کلان سازمان می‌شود. یافته‌های این بخش با نتایج پژوهش D'Arco و همکاران (۲۰۲۵) همخوانی نسبی دارد. به این صورت که محققان هنجارهای اجتماعی بازدارنده و هنجارهای شخصی را از عوامل اصلی اثرگذار بر رفتار طرفدار محیط‌زیست نسل Z را شناسایی نمودند. این هنجارها با پیشران‌های شناسایی شده اثرگذار همراستایی دارند.

در وهله آخر، یافته‌های این پژوهش نشان داد که پیشران‌های برگزاری برنامه‌ها و کمپین‌های درون‌سازمانی با محوریت و ارزش‌های محیط‌زیستی، ارتقاء سطوح همکاری بین‌بخشی منابع انسانی در راستای تحقق اهداف محیط‌زیستی مشترک به عنوان پیشران‌های مستقل هستند. به این معنا که این پیشران‌ها هم تأثیرگذاری پایین و هم تأثیرپذیری پایین به سایر پیشران‌ها دارند و می‌توان پس از توجه به پیشران‌های مهم با اولویت پایین‌تر مورد توجه قرار گیرند یا این که بطور کامل حذف شوند. به عبارت دیگر، میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری پایین این پیشران‌ها، موجب می‌شود که در جهت پایداری یا ناپایداری سیستم نقشی را ایفا ننمایند. بر همین اساس، می‌توان استنباط نمود که پیشران برگزاری برنامه‌ها و کمپین‌های درون‌سازمانی با محوریت و ارزش‌های محیط‌زیستی موجب ارتقای آگاهی و حساسیت کارکنان نسبت به مسائل محیط‌زیستی می‌شود. نسل Z که به مشارکت فعال و محیط‌زیست حساس است، با حضور در این برنامه‌ها انگیزه و تعهد بیشتری پیدا می‌کند. این کمپین‌ها فرصتی برای تعامل، تبادل نظر و ایجاد فضای سازمانی محیط‌زیستی فراهم می‌آورند. علاوه بر این، اجرای موفق کمپین‌ها موجب الگوسازی رفتارهای پایدار و الهام‌بخشی به سایر کارکنان خواهد شد. در نهایت، پیشران ارتقاء سطوح همکاری بین‌بخشی منابع انسانی در راستای تحقق اهداف محیط‌زیستی مشترک ه هماهنگی و انسجام فعالیت‌های محیط‌زیستی در سطح سازمان کمک می‌کند. در واقع، نسل Z با گرایش به کار تیمی و تعامل جمعی، از فرصت‌های همکاری بین واحدها استقبال می‌کند. این همکاری باعث تبادل دانش، منابع و تجربیات شده و کارایی رفتارها و فعالیت‌های دوستدار محیط‌زیست را افزایش می‌دهد. همچنین، هماهنگی میان بخش‌ها موانع اجرای پروژه‌های محیط‌زیستی را کاهش داده و زمان پاسخ‌دهی را کوتاه می‌کند. در نهایت، ارتقاء همکاری بین‌بخشی موجب تحقق اهداف محیط‌زیستی مشترک و بهبود عملکرد کلی فردی و سازمانی می‌گردد. یافته‌های این بخش با نتایج پژوهش Saracli & Boca (۲۰۲۱) همخوانی نسبی دارد. به این صورت که محققان عوامل را در بخش‌های نگرش‌های محیط‌زیستی مشارکت‌کنندگان، آموزش محیط‌زیستی از طریق کمپین‌ها و مشارکت در فعالیت‌های محیط‌زیستی بین بخشی شناسایی نمودند. این عوامل از نظر معنایی با پیشران‌های شناسایی شده اثرگذار همراستایی دارند.

بر اساس نتایج پژوهش، پیشنهاد می‌شود که:

به مدیران و رهبران سازمان‌ها پیشنهاد می‌شود دوره‌های عملی و کارگاهی با تمرکز بر مهارت‌های محیط‌زیستی برگزار کنند. استفاده از کارشناسان داخلی و مدرسان حرفه‌ای آموزش را اثربخش‌تر می‌کند. این اقدام دانش و توانمندی کارکنان را افزایش داده و رفتار دوستدار محیط‌زیستی را نهادینه می‌سازد. برای عملیاتی شدن، تقویم سالانه آموزشی تدوین و ارزیابی مهارت‌ها پس از هر دوره انجام شود.

به مدیران و رهبران سازمان‌ها پیشنهاد می‌شود دستورالعمل‌ها و چارچوب‌های فرهنگی محیط‌زیستی در تمام واحدها ارائه گردد. برگزاری جلسات توجیهی و نشست‌های فرهنگی نیز توصیه می‌شود. این کار موجب تقویت هنجارهای سبز و همسویی رفتار کارکنان با ارزش‌های سازمان می‌شود. برای اجرای عملی، شاخص‌های فرهنگی محیط‌زیستی اندازه‌گیری و به صورت دوره‌ای گزارش عملکرد منتشر گردد. به مدیران و رهبران سازمان‌ها پیشنهاد می‌شود جلسات هماهنگی ماهانه بین مدیران ارشد و کارشناسان محیط‌زیست برگزار کنند. اهداف کلان و اهداف محیط‌زیستی همگام شوند تا تضاد در برنامه‌ها کاهش یابد. این همراستایی موجب بهبود تصمیم‌گیری و افزایش تعهد کارکنان می‌شود. همچنین یک جدول زمانی عملیاتی با مسئولیت‌های مشخص برای هر واحد تعریف گردد تا اجرا و پایش برنامه‌ها تسهیل شود.

به مدیران و رهبران سازمان‌ها پیشنهاد می‌شود شاخص‌های ارزیابی را بازنگری و معیارهای کمی و کیفی محیط‌زیستی اضافه کنند. ارائه بازخورد مستمر به کارکنان باعث شفافیت و ارتقای عملکرد می‌شود. این روش رفتارهای سبز و پاسخگویی سازمانی را تقویت می‌کند. برای اجرای عملی، نرم‌افزار ارزیابی محیط‌زیستی پیاده‌سازی گردد تا شاخص‌ها به صورت خودکار پایش و گزارش شوند. به مدیران و رهبران سازمان‌ها پیشنهاد می‌شود کارکنان را به حضور در پروژه‌های داوطلبانه تشویق کرده و گروه‌های سبز داخلی تشکیل دهند. ارائه گواهی و ثبت فعالیت‌ها به عنوان امتیاز سازمانی نیز مؤثر است. این اقدام مشارکت و تعهد کارکنان به اهداف محیط‌زیستی را افزایش می‌دهد. برای اجرای عملی، برنامه زمان‌بندی سالانه داوطلبی تدوین و مسئول واحدها برای پیگیری حضور کارکنان تعیین گردد. به مدیران و رهبران سازمان‌ها پیشنهاد می‌شود کمیته‌های بین‌بخشی تشکیل و نشست‌های هماهنگی منظم برگزار گردد. علاوه بر این، پروژه‌های مشترک با اهداف محیط‌زیستی مشخص تعریف شود. این اقدام انسجام سازمانی و تحقق موفق اهداف محیط‌زیستی را تضمین می‌کند. برای اجرای عملی، سامانه ثبت پروژه‌های مشترک و میزان مشارکت هر بخش راه‌اندازی شود.

بر اساس نتایج پژوهش، پیشنهادهای آتی برای محققان توصیه می‌شود:

پیشنهاد می‌شود که پژوهشگران جهت بررسی عمیق‌تر موضوع به طراحی مدل رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان‌های دولتی با روش داده بنیاد و یا پدیدارشناسی بپردازند. این اقدام موجب شناسایی عمیق ابعاد رفتار دوستدار محیط‌زیست در میان نسل Z می‌شود.

همچنین، پیشنهاد می‌شود که محققان در پژوهشی به شناسایی و اولویت‌بندی چالش‌ها، آسیب‌ها و فرصت‌های بهبود رفتار دوستدار محیط‌زیست منابع انسانی نسل Z در سازمان‌های دولتی با رویکرد سبز بپردازند. این اقدام به عنوان راهکاری راهبردی موجب تبیین استراتژی‌های محیط‌زیستی و پایدار در سازمان‌های دولتی می‌شود.

Extended Abstract

Introduction: In the contemporary era, global environmental crises and the urgent need for sustainable development have highlighted the strategic role of human resources in fostering pro-environmental behaviors. Among them, Generation Z, characterized by their innovation, environmental sensitivity, and social engagement, is increasingly shaping organizational culture in the Iranian Department of Environment. Given their individualistic yet collaborative tendencies and heightened ecological awareness, this generation can act as pivotal drivers for embedding sustainability in organizational behavior. However, managerial focus on short-term financial goals, limited environmental training, and the absence of motivational systems have hindered the effective development of pro-environmental practices. Therefore, identifying and prioritizing the most influential drivers is essential to strategically align organizational policies with sustainable development objectives.

Materials and methods: This research adopts a futures studies approach using structural cross-impact matrix analysis (MICMAC) to identify and prioritize the drivers of pro-environmental behavior among Generation Z employees in the Department of Environment of Iran. The study is developmental–applied in nature. The statistical population included 25

purposely selected experts, consisting of 14 university professors specializing in organizational behavior and environmental management, and 11 senior and middle managers from the Department of Environment. Data collection was conducted through library research, structured expert interviews, and a qualitative questionnaire based on cross-impact scoring (0–3 scale). The collected data were analyzed with MICMAC software, assessing influence and dependence relations among 10 identified drivers.

Results: The analysis revealed that four drivers demonstrated the highest influence: (1) alignment of organizational macro-strategies with environmental strategies in the HR sector, (2) implementation of financial incentives and motivational systems based on environmental values, (3) specialized environmental training and professional empowerment, and (4) institutionalization of environmental beliefs, values, and norms within organizational culture. Meanwhile, drivers such as improving environmental performance evaluation indicators, strengthening voluntary participation, utilizing smart digital tools, and promoting ethical environmental responsibility exhibited high dependence. Conversely, intra-organizational campaigns and cross-sectional collaboration were identified as independent drivers with relatively lower systemic impact. The findings also confirmed the robustness of the structural matrix with a 95% filling degree and high stability of the system under analysis.

Discussion and Conclusion: The results emphasize that the sustainability of pro-environmental behavior among Generation Z employees relies primarily on strategic alignment, motivational systems, and continuous empowerment. Embedding environmental values into organizational culture not only enhances employees' sense of purpose but also promotes organizational legitimacy and social accountability. Moreover, strengthening evaluation systems, digital communication, and voluntary initiatives ensures greater adaptability and systemic resilience. The study concludes that organizations should prioritize capacity-building strategies, design incentive-based frameworks, and institutionalize green cultural values to effectively engage Generation Z in sustainable practices. These findings are consistent with prior research highlighting the roles of social norms, ethical responsibility, and digital engagement in shaping sustainable behaviors. Overall, the foresight-driven prioritization of drivers provides policymakers and managers with a strategic roadmap to foster a green organizational culture, enhance employee commitment, and achieve long-term environmental sustainability.

Keywords: Environment, Pro-environmental behavior, Environmental culture, Generation Z, Strategic foresight, MICMAC analysis.

References

- Abbasi, M. A., Amran, A., & Sahar, N. E. (2024). Assessing the impact of corporate environmental irresponsibility on workplace deviant behavior of generation Z and millennials: a multigroup analysis. *International Journal of Ethics and Systems*, 40(1), 45-67. <http://dx.doi.org/10.1108/IJOES-05-2022-0099> [In Persian]
- Arslan, M., & Şar, S. (2018). Examination of environmentally friendly “green” logistics behavior of managers in the pharmaceutical sector using the theory of planned behavior. *Research in Social and Administrative Pharmacy*, 14(11), 1007-1014. <https://doi.org/10.1016/j.sapharm.2017.12.002>
- Bakhshizadeh Borj, K., Hamzavi, H., & Jamali, M. (2025). Identifying and prioritizing drivers for optimizing the sustainable value chain of Iran's petrochemical industry with a strategic foresight approach. *Strategic Value Chain Management*, 1(3), 1-26. doi: 10.22075/svcm.2025.36996.1024 . [In Persian]
- D'Arco, M., Marino, V., & Resciniti, R. (2025). Exploring the pro-environmental behavioral intention of Generation Z in the tourism context: The role of injunctive social norms and personal norms. *Journal of Sustainable Tourism*, 33(6), 1100-1121. <http://dx.doi.org/10.1080/09669582.2023.2171049>
- Dwidienawati, D., Abdinagoro, S. B., Gandasari, D., & Tjahjana, D. (2021, April). Do generation Y and Z really concern about environmental issues?. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 729 (1): 012137. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/729/1/012137>

- Eshaghi Gordji, M., Zarei, A. A., Hamzavi, H., Asadbak, M., & Mohammadi Shir Kalai, H. A. (2024). Prioritizing Environmental Policy Issues of the Islamic Republic of Iran. *Governance and Development Journal*, 4(1), 74-92. doi: 10.22111/jipaa.2024.447250.1166. [In Persian]
- Hamzavi, H., Hemmatifar, M., fotovat, B. and Hosseini, S. M. (2025). Identifying and prioritizing strategic drivers for developing behavioral competencies of Generation Z employees in government organizations with a futures research approach. *Comparative Studies in Public Administration*, 3(1). doi: 10.22098/cpa.2025.17291.1068 [In Persian]
- Hamzavi, H., Salehi Sadaghyani, J., & najafi, F. (2025). Identifying and ranking the drivers of environmental performance optimization and development of oil and gas refineries in the Republic of Iran using a strategic foresight approach. *Journal of Urban Environmental Management*, 3(1), 34-55. doi: 10.48306/juem.2025.523414.1073 . [In Persian]
- Irfany, M. I., Khairunnisa, Y., & Tieman, M. (2024). Factors influencing Muslim Generation Z consumers' purchase intention of environmentally friendly halal cosmetic products. *Journal of Islamic Marketing*, 15(1), 221-243. <http://dx.doi.org/10.1108/JIMA-07-2022-0202>
- Kooshki Jahromi, A., Zarjou, S., & hamzavi, H. (2025). Identifying and Prioritizing Drivers for Developing Behavioral Competencies of Future Leaders in the Third Millennium: A Foresight Approach. (e728228). *Organizational Behaviour Studies Quarterly*, e728228 doi: 10.22034/obs.2025.2055410.3527 [In Persian]
- Moradi, A. (2019). Evaluating the Impact of Factors Affecting Environmental Behaviors: Extension of the Theory of Planned Behavior Model, *Second National Conference on Social Capital and Sustainable Development*, Qom, <https://civilica.com/doc/974480>
- Mousavi, S. F. (2023). The role of environmental employees in promoting a culture of environmental protection in organizations and communities. In *Proceedings of the First International Conference on Counseling, Social Work, and Education with a Foresight Approach*, Bushehr, Iran. <https://civilica.com/doc/2174349> [In Persian]
- Parzonko, A. J., Balińska, A., & Sieczko, A. (2021). Pro-environmental behaviors of Generation Z in the context of the concept of homo socio-o-economicus. *Energies*, 14(6), 1597. <http://dx.doi.org/10.3390/en14061597>
- Rezaei Manesh, B., Hamzavi, H. & Marziyeh Hosseini, S. (2025). Identifying and Prioritizing Drivers for Optimizing Sustainable Performance of Oil, Gas, and Petrochemical Organizations with a Futures Research Approach. *Modern Research in Performance Evaluation*, 4(1), 11-26. doi: 10.22105/mrpe.2025.506185.1146 [In Persian]
- Salehi Sadaghyani, J., hamzavi, H., & Asadi, F. (2025). Identifying and ranking the drivers for improving the human capital performance evaluation system in government organizations in the Republic of Iran. *Modern Research in Performance Evaluation*. 4, 2, 2025, 156-176. doi: 10.22105/mrpe.2025.509270.1149. [In Persian]
- Saracli, S., & Boca, G. D. (2021). Factors influencing students' environmental behavior for sustainable development. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 20(1). <http://dx.doi.org/10.30638/eemj.2021.001>
- Seif, M. H., & Nematollahi, S. (2019). The Effective Factors on Environmentally Friendly Behavior: A Case Study. *Library Philosophy and Practice (e-journal)*, 2842. <https://digitalcommons.unl.edu/libphilprac/2842/>
- seyf, A., & seyf, H. (2022). Factors Affecting on Environmental Behavior in the lived Experience of Environmental Activists (Case study: The Association Rescuers and Supporters of Gahrroud Ashtrankoh, Durood). *Sustainable Development of Geographical Environment*, 4(6), 79-93. doi: 10.52547/sdge.4.6.79
- Taslim, M. (2023). Generations and sustainability: a study of three generations–x, y and z with special focus on the role of education and communication to promote sustainable behavior among zers. *Business Transformation-Accelerators for Sustainable Growth*, 173. <http://dx.doi.org/10.37074/jalt.2023.6.1.ss2>
- Tran, K., Nguyen, T., Tran, Y., Nguyen, A., Luu, K., & Nguyen, Y. (2022). Eco-friendly fashion among generation Z: Mixed-methods study on price value image, customer fulfillment, and pro-environmental behavior. *Plos one*, 17(8), e0272789. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272789>

- Walia, S. K., Tiwari, P., Choudhary, P., & Mandic, A. (2025). Does Gen Z's Responsible Tourism Intentions Impact Ecologically Conscious Consumer Behavior? Investigating the Moderating Role of Sustainable Intelligence in Eighteen National Parks in India. *Tourism Planning & Development*, 1-24. [http://dx.doi.org/10.21511/im.21\(1\).2025.02](http://dx.doi.org/10.21511/im.21(1).2025.02)
- Xu, Z., Li, Y., Wang, C., & Shan, J. (2024). Social capital and environmentally friendly behaviors. *Environmental Science & Policy*, 151, 103612. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2023.103612>



Journal of Environmental
Management and Law

فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست

<https://sanad.iau.ir/en/Journal/jeml>

Investigating the effect of educational interventions and safety climate factors on improving risk perception of hazardous situations of working at height and working in confined spaces among workers employed in grain storage silos

Farzin Sayyad Ghorbani Shirin¹, Sanaz Hosseini^{*2}

¹ HSE Consultant and Silo Safety Officer

² Expert in charge of the HSE Center

**Corresponding Author: Sanaz Hosseini6081 @gmail.com*

Original Paper

Abstract

Received: 2024.12.08

Accepted: 2025.05.31

Keywords:

Working at height,
working in confined
spaces,
risk perception,
educational
interventions.

Falling from a height and respiratory diseases caused by working in confined spaces are one of the main and at the same time the most important risks in most temporary grain storage silos, so that if safety tips and requirements are not observed, the possibility of irreparable injuries and even death for the technical and maintenance personnel of these facilities is not unimaginable. The purpose of this study is to determine the effect of educational interventions and safety climate factors on providing a work environment with a high safety culture and understanding the risk of dangerous situations of working at height and in confined spaces among the technical, engineering and operational personnel of temporary grain storage silos. In this study, 15 workers and personnel from PM's technical, engineering and operations units entered the study phase. Background information on safety culture and climate was obtained by completing a safety climate questionnaire, and a behavioral questionnaire was used to examine the risk perception of dangerous work situations at height, including dangerous work situations on scaffolding, conveyors, and work in the space inside hives. Factor analysis was used to analyze factors related to safety climate and risk perception using the Bonferroni adjustment test (from the series of post hoc tests in analysis of variance) and binary logistic regression test in the SPSS21 software environment. The results of the present study indicate a significant impact of educational interventions on the components of safety culture and employee empowerment in relation to the perception of the risk of hazardous work situations at height and in confined spaces. In this regard, the findings indicate that holding training classes focusing on the importance of safety in the workplace can have a positive impact on workers' behavior to a large extent and promote a safety culture in the silo workplace.



Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the

بررسی تأثیر مداخلات آموزشی و فاکتورهای جو ایمنی در بهبود درک ریسک موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع و کار در فضای بسته در کارگران شاغل در سیلوی نگهداری غلات

فرزین صیاد قربانی شیرین^۱، ساناز حسینی^{۲*}

۱- مشاور HSE و مسئول ایمنی سیلو

۲- کارشناس مسئول مرکز HSE

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Sanaz Hosseini6081@gmail.com

نوع مقاله: علمی-پژوهشی	چکیده
تاریخچه مقاله: ارسال: ۱۴۰۳/۰۹/۱۸ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰	سقوط از ارتفاع و همچنین بیماری‌های تنفسی ناشی از کار در فضاهای بسته یکی از اصلی‌ترین و در عین حال مهمترین خطرات موجود در اکثر سیلوهای نگهداری موقت غلات هستند، به گونه‌ای که در صورت عدم رعایت نکات و الزامات ایمنی، امکان بروز صدمات جبران ناپذیر و حتی مرگ برای پرسنل بخش فنی و نگهداری این تأسیسات خالی از تصور نیست. هدف از انجام این مطالعه تعیین میزان تأثیر مداخلات آموزشی و فاکتورهای جو ایمنی بر فراهم آوردن محیط کاری با فرهنگ ایمنی بالا و درک ریسک موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع و فضای بسته در بین پرسنل فنی مهندسی و عملیاتی سیلوی نگهداری موقت غلات است. در این مطالعه، ۱۵ نفر از کارگران و پرسنل واحدهای فنی مهندسی و عملیات PM وارد فاز مطالعه شدند. اطلاعات زمینه‌ای فرهنگ و جو ایمنی از طریق تکمیل پرسشنامه جو امنیتی و جهت بررسی درک ریسک موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع از پرسشنامه رفتاری شامل موقعیت‌های خطرناک کار بر روی داربست، کانویر و کار در فضای درون کندوها استفاده شد. آنالیز فاکتور جهت انجام تحلیل فاکتورهای مرتبط با جو ایمنی و درک ریسک با استفاده از آزمون تعدیل بونفرونی (از سری آزمون‌های تعقیبی در تحلیل واریانس) و آزمون رگرسیون لجستیک باینری در محیط نرم افزار SPSS21 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج مطالعه حاضر حاکی از تأثیر چشمگیر مداخلات آموزشی بر مولفه‌های فرهنگ ایمنی و توانمندسازی کارکنان در ارتباط با درک ریسک موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع و فضای بسته است. همچنین انجام مداخلات آموزشی سبب بهبود چشمگیر در فرهنگ ایمنی کارگران شده است. در همین راستا یافته‌ها بیانگر آن است که برگزاری کلاس‌های آموزشی با محوریت اهمیت موضوع ایمنی در محیط کار می‌تواند تا حد زیادی بر رفتار کارگران تأثیر مثبت گذاشته و سبب ارتقاء فرهنگ ایمنی در محیط کاری سیلو گردد.
کلمات کلیدی: کار در ارتفاع، کار در فضای بسته، درک ریسک، مداخلات آموزشی.	

مقدمه

در کشورهای در حال توسعه و رو به رشد تولیدی و اقتصادی، فرآیند صنعتی شدن، گسترش زیرساخت‌های فنی و اقتصادی و در عین حال عدم توجه کافی به مقوله ایمنی در فعالیتهای صنعتی باعث افزایش میزان حوادث ناشی از کار شده است. حوادث ناشی از کار به حوادثی اطلاق می‌شود که در حین انجام وظایف شغلی در محیط کار به وقوع پیوسته و منجر به بروز آسیب‌های کشنده و غیرکشنده می‌شود (Halvani et al, 2005). طبق گزارشات ارائه شده توسط سازمان بهداشت جهانی، سالیانه در حدود ۳/۵ میلیون نفر در جهان جان خود را در اثر حوادث شغلی از دست می‌دهند و خسارات ناشی از این حوادث به حدود ۵۰۰ میلیون دلار برآورد می‌گردد (Sepehr et al., 2014). طبق گزارشات سازمان بین‌المللی کار، یک سوم مرگ‌های ناشی از کار به دلیل حوادث رخ می‌دهند (Teixeira et al., 2019). همچنین طبق آخرین گزارش رسمی پزشکی قانونی، در سال ۱۴۰۳ تعداد ۲۶۵۴۸ نفر به علت حوادث حین کار در ایران دچار آسیب شده که سبب ۱۹۸۶ مورد مرگ شده است. مطالعات حاکی از آن است که شدیدترین حوادث بعد از معادن مربوط به صنعت ساخت و ساز است (Teixeira et al, 2019). وجود خطرات مختلف در عملیات ساخت و ساز این صنعت را به یکی از پر مخاطره ترین صنایع در دنیا مبدل کرده است (Mirzaei, 2006). سالانه حدود ۱۰۸۰۰۰ حادثه منجر به مرگ در صنعت ساخت و ساز در سراسر دنیا روی می‌دهد که معادل ۳۰٪ از کل حوادث شغلی منجر به مرگ است (Asivandzadeh et al., 2020). در بخش مرتبط با فعالیتهای ساخت و ساز و فنی مهندسی، کار در ارتفاع از مهمترین و اصلی ترین عوامل بروز مرگ و میر کارگران گزارش شده است. طبق آمار ارائه شده توسط اداره کار ایالات متحده آمریکا (BLS)، به طور تقریبی هر ساله ۱۵۰/۰۰۰ حادثه ساختمانی به وقوع می‌پیوندد. سازمان OSHA، سقوط از ارتفاع را عامل اصلی جراحت و آسیب‌های ساختمانی معرفی کرده است (Mortazavi et al., 2010). امروزه مدیران صنایع دریافته‌اند که برای کاهش نرخ حوادث، یکی از راه‌های قابل توجه و مهم، توجه به ایمنی است. عمدتاً حوادث در بخش صنعت به دلایل مختلفی به وقوع می‌پیوندد که بخش اعظم آن‌ها شامل ضعف در شناسایی شرایط ناایمن که ممکن است قبل از شروع فعالیت وجود داشته باشد و یا این که بعد از شروع فعالیت گسترش یابد، عدم توقف کار بعد از شناسایی یک موقعیت ناایمن توسط کارکنان، تصمیم به انجام عمل ناایمن بدون توجه به شرایط اولیه محیط کار.

همچنین در صنعت سیلوگذاری، علاوه بر کار در ارتفاع، یکی دیگر از مخاطراتی که کارگران، بالاخص کارگران شاغل در بخش کفروبی سیلوهای نگهداری موقت غلات با آن مواجه هستند، وجود گرد و غبار زیاد در محدوده کاری است که به نوبه خود سبب بروز بیماری‌های مزمن و حاد همچون برونشیت، تحریک مجاری تنفسی و ... می‌گردد. علاوه بر این گرد و غبار غلات بر روی پوست بدن اثرات نامطلوبی می‌گذارد (Hnizdo et al., 2006). به استناد آمار سازمان تأمین اجتماعی ایران، در سال ۱۴۰۲ در حدود ۲۷/۳۷۷ نفر در ایران دچار مسمومیت ناشی از کار و ۲۱۵۵ نفر بر اثر حوادث ناشی از کار فوت شده‌اند که از این میان ۴۶٪ ناشی از سقوط از بلندی بوده است. امروزه ثابت شده که مهمترین عامل در بروز حوادث شغلی، اعمال ناایمن با میزان ۸۰٪ بوده و تنها ۱۰٪ این حوادث به دلیل شرایط ناایمن است (Mirzaei, 2006).

با توجه به کثرت افراد در معرض مواجهه با آلاینده‌های ایجاد شده در فرآیند کفروبی سیلو، نیاز به تهیه و تدوین یک برنامه جامع به منظور کاهش میزان مواجهه با گرد و غبار ناشی از کفروبی سیلوه‌ها بسیار حائز اهمیت است. ارزیابی ریسک مرتبط با گرد و غبار یکی از راه‌های نیل به این هدف بوده و می‌تواند در تصمیم‌گیری ارائه راهکارهای کنترلی کمک شایانی نماید (Allahyari, 2006). هدف از انجام فرآیند ارزیابی ریسک گرد و غبار، شامل ارزیابی میزان مواجهه و تعیین احتمال اثرات نامطلوب تماس با گرد و غبار است. یکی از عوامل مهم تعیین کننده ایمنی و سلامت شغلی، عوامل خطرساز سازمانی محل کار هستند که شامل عوامل روانی اجتماعی از قبیل جو ایمنی هستند (Mohammadi Zeidi et al., 2013). جو ایمنی مفهومی چند بعدی سازمانی است که بر رفتارهای ایمن کارگران در سطح سازمانی، گروهی و فردی اثر گذار است. اصطلاح جو ایمنی به درک مشترک کارگران در ارتباط با اجرا و اولویت بندی اقدامات مرتبط با ایمنی، سیاست‌ها و فرآیندهای ایمنی در محیط کار در مقایسه با سایر اولویت‌ها مانند تولید اطلاق می‌شود. مقوله جو ایمنی در توصیف

بینش‌های مشترک کارکنان از نحوه مدیریت ایمنی در محیط کار مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مقوله نسبتاً ناپایدار بوده و تحت تغییر اجزای محیط یا شرایط موجود دچار تغییر می‌شود. اهمیت جو ایمنی به قابلیت پذیرش آن توسط کارکنان و همچنین به قابلیت آن در پیش بینی رفتار ایمن مربوط می‌شود (Larsson, 2008). ضعف در شناسایی شرایط ناایمن قبل از شروع به کار، تداوم فعالیت بعد از شناسایی شرایط ناایمن و تصمیم به انجام عمل ناایمن، سه عامل اصلی در بروز حوادث مرتبط با کار در ارتفاع و فضای بسته هستند (Abdelhamid & Everett, 2000). پژوهشگران معتقدند آموزش مسائل ایمنی یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر سطح فرهنگ ایمنی سازمان‌ها است. آموزش ایمنی سبب ارتقاء آگاهی و انگیزش و به دنبال آن تغییر در نگرش فرد و در نهایت سبب ارتقاء فرهنگ ایمنی می‌گردد (Asivandzadeh et al., 2020). از مهمترین خصوصیات جو ایمنی مثبت ارتباط مناسب بین کارکنان و مدیران، مشارکت پرسنل در تصمیم‌گیری‌های مربوط به ایمنی و بهداشت و از همه مهمتر تعهد مدیریت به مقوله ایمنی است. به عبارتی جو ایمنی تلاشی در جهت شناسایی نقاط ضعف ایمنی و فرصت‌های لازم برای اصلاح آن است. ارزیابی جو ایمنی تصویری از وضعیت ایمنی سازمان در زمان مشخص را فراهم می‌کند و اندازه‌گیری آن برای شناسایی حیطه‌هایی که نیاز به بهبود و توجه بیشتر دارند بسیار مفید است (Abedinzadeh et al., 2022).

با توجه به مطالب فوق الذکر و با توجه به اهمیت فرهنگ ایمنی به عنوان یکی از عوامل دخیل در پیشگیری و کاهش حوادث شغلی، مطالعه حاضر به منظور بررسی بینش و نگرش کارگران واحدهای فنی مهندسی و عملیات نسبت به موضوعات ایمنی کار در ارتفاع و فضای بسته و تحلیل رفتار آنان در موقعیت‌های خطرناک انجام می‌گیرد.

Mortazavi و همکاران (۲۰۱۰)، در مطالعه خود با موضوع بررسی ارتباط میان فاکتورهای جو ایمنی و درک ریسک موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع در میان کارگران ساختمانی دریافتند که فاکتورهای نگرش کارگران نسبت به مقوله ایمنی و سطح ریسک در کارگاه‌های ساختمانی و روابط کاری بدست آمده از آنالیز فاکتور ۵۷٪ واریانس کل هستند. همچنین دریافتند که موقعیت‌های کار بر روی داربست بدون گاردریل و حفاظت لبه‌ها، دسترسی به داربست با بالا و پایین رفتن از اتصالات نردبانی محکم نشده جزء ریسک‌ها و موقعیت‌های خطرناک بوده که در اکثر کارگاه‌های ساختمانی دیده می‌شود. Golbabaie و همکاران (۲۰۱۱)، در مطالعه خود با موضوع ارزیابی ریسک بهداشتی مواجهه با فیوم کل در فرآیندهای مختلف جوشکاری در یک صنعت خودروسازی دریافتند که راه‌های کنترلی مورد نیاز و موثر شامل کنترل فنی، پایش هوای تنفسی و بیولوژیکی جوشکاران، آموزش، اجرای برنامه‌های حفاظت تنفسی، توسعه و اجرای روش‌های کاری صحیح و ایمن و در نهایت ارزیابی مجدد ریسک بعد از اجرای روش‌های کنترلی هستند. Miralizadeh و همکاران (۲۰۲۴)، در مقاله خود با موضوع ارزیابی ریسک بهداشتی آلاینده‌های ذره‌ای هوا (PM_{10} و $PM_{2.5}$) در منطقه پونک تهران دریافتند که غلظت ۲۴ ساعته PM_{10} تنها در یک روز در سال از مقدار توصیه شده EPA فراتر رفته و برابر با $230 \mu g/m^3$ شده است که خطر سرطان‌زایی جدی برای همه گروه‌های سنی را در بر دارد.

آموزش ایمنی سبب ارتقاء آگاهی و انگیزش و به دنبال آن تغییر در نگرش فرد و در نهایت سبب ارتقاء فرهنگ ایمنی می‌گردد (Asivandzadeh et al., 2020). با توجه به کلیه موارد فوق الذکر و مهمتر از همه اهمیت فرهنگ ایمنی به عنوان عامل مهم در پیشگیری و کاهش میزان حوادث شغلی، مطالعه حاضر جهت بررسی میزان تأثیر آموزش ایمنی بر بهبود فرهنگ ایمنی و درک ریسک موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع و کار در فضای بسته صورت می‌پذیرد.

مواد و روش‌ها

محقق شدن اهداف تحقیقاتی و دستیابی به نتایج کاربردی مستلزم تدوین و تهیه استراتژی کاربردی و حصول برنامه کاربردی است. بدین منظور تحقیق حاضر به روش آزمایشی به صورت پیش‌آزمون و پس‌آزمون در یک سیلوی غلات در سال ۱۴۰۳ صورت پذیرفت. پس از

انجام بازدید و بررسی‌های به عمل آمده و با در نظرگیری پارامترهای کاری نظیر انجام فرآیند PM و تعمیرات بر روی برج الواتور، کانوایر و روی کندوهای ذخیره‌سازی و همچنین فرآیند کفروبی باقیمانده غلات درون هر کندو، جامعه آماری هدف جهت انجام تحقیق مشخص شد. جهت گردآوری اطلاعات مورد نیاز از یک پرسشنامه دو مرحله‌ای شامل آیتم‌های مرتبط با جو ایمنی در بخش اول و آیتم‌های مرتبط با رفتار بر روی ۸ موقعیت خطرناک کار در ارتفاع و ۱ موقعیت خطرناک کار در فضای بسته استفاده شد. بدین منظور قبل از انجام مداخلات آموزشی، پرسشنامه‌های مربوطه بین پرسنل واحد فنی مهندسی و تأسیسات توزیع و پس از تکمیل جمع آوری شدند. همچنین جهت بررسی مقایسه‌ای درصد پاسخ پرسنل به ریسک موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع و کار در فضای بسته از چک لیست استفاده شد. بخش اول پرسشنامه از ۱۰ آیتم مرتبط با جو ایمنی تشکیل شده است. با توجه به تعدد پرسشنامه‌های موجود در زمینه جو ایمنی، در این مطالعه از پرسشنامه تدوین شده توسط مک دونالد و هری مک ۲۰۰۱ جهت بررسی بینش و نگرش پرسنل نسبت به مقولاتی همچون روش‌های ایمنی انجام کار، محیط کار ایمن، لوازم و تجهیزات حفاظت فردی استفاده شد. در این تحقیق پرسنل واحد فنی مهندسی و تأسیسات جهت ارزیابی فرهنگ ایمنی انتخاب شدند. بخش دوم پرسشنامه جهت بررسی میزان درک ریسک ۸ موقعیت خطرناک کار در ارتفاع شامل کار بر روی برج الواتور، کار بر روی کانوایر، کار بر روی سازه کندوها، کار بر روی داربستی که به خوبی تخته‌گذاری نشده است، کار بر روی داربست بدون گاردریل و لبه‌های حفاظتی، بالا و پایین رفتن از اتصالات جهت دسترسی به داربست، نردبان با اتصالات محکم نشده، استفاده از نردبان شکسته شده و یک موقعیت خطرناک کار در فضای بسته هستند. در این نظرسنجی از پرسنل خواسته شد ارزیابی خود نسبت به سطح ریسک موقعیت‌های خطرناک با طیف لیکرت (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) تعیین نمایند (Mortazavi et al., 2010). موقعیت‌های خطرناک شناسایی شده در جدول شماره ۵ ارائه شده است. مجموعاً اطلاعات مربوط به ۱۵ نفر پرسنل شاغل در بخش فنی مهندسی و عملیات که دارای خطرات و حوادث متنوعی بودند، به عنوان گروه‌های هدف شناسایی و جمع آوری گردیدند.

جهت حصول اطمینان از بومی بودن پرسشنامه تهیه شده، روایی و پایایی مجدد آن در پرسشنامه مورد سنجش قرار گرفت (Asivandzadeh et al., 2020). جهت سنجش پایایی پرسشنامه مزبور از روش همسانی درونی با محاسبه آلفای کرونباخ $\alpha=0/83$ با استفاده از نرم افزار SPSS 21، استفاده گردید. ابعاد پرسشنامه مذکور شامل موارد زیر است:

- (۱) صلاحیت و آموزش پرسنل.
- (۲) ارجحیت بین مقوله ایمنی و مقوله بارگیری.
- (۳) وضعیت ارتباطات درون سازمانی.
- (۴) حوادث و شبه حوادث رخ داده.
- (۵) تعهدات مدیریت و سازمان.
- (۶) تفکرات سرپرستان و مدیران در زمینه ایمنی.
- (۷) وضعیت رعایت قوانین و مقررات ایمنی و بهداشت محیط کار.
- (۸) وضعیت نادیده گرفتن قوانین و مقررات ایمنی و بهداشت محیط کار.
- (۹) نگرش کلیه کارکنان نسبت به فرهنگ ایمنی.

انجام مداخلات آموزشی

در این پژوهش انجام مداخلات آموزشی شامل ۲ مرحله است. مرحله نخست انجام مداخلات آموزشی و مرحله دوم بررسی میزان اثربخشی مداخلات آموزشی انجام شده. در ابتدا پیش از انجام مداخلات آموزشی مد نظر، با همفکری و برگزاری جلساتی با مسئول ایمنی و همچنین کمیته ارزیابی ریسک سیلو، تصمیماتی در خصوص ارائه جزوات آموزشی، کتب فنی تخصصی، دستورالعمل‌ها و اسلایدهای آموزشی مبتنی بر نوع فعالیت‌های تخصصی بخش تأسیسات و واحد فنی و مهندسی اتخاذ گردید. تدوین دوره‌های آموزشی مدنظر عمدتاً

بر اساس بررسی و ارزیابی ریسک صورت پذیرفته، نظرات مشخصه کمیته ارزیابی ریسک، مخاطرات موجود در هر رده شغلی در واحد فنی مهندسی و عملیات، مصاحبه با پرسنل شاغل در هر بخش و استفاده از نظرات کارشناسان خبره در زمینه ایمنی انجام شد. درون مایه این دوره‌های آموزشی شامل بررسی حوادث مشابه رخ داده در صنایع و علل وقوع آن‌ها، شرایط و عوامل ایجاد مخاطره در محیط کار، آشنایی پرسنل با انواع لوازم و تجهیزات حفاظت فردی در محیط کار و طریقه صحیح استفاده از آن‌ها، آموزش افراد در زمینه نحوه برخورد در هنگام مواجهه با عوامل و شرایط خطرناک و مخاطره آمیز در محیط کار و اتخاذ تصمیمات منطقی و به موقع مبتنی بر رعایت کامل مسائل و نکات ایمنی، آشنایی با شرایط و اعمال ناایمن، افزایش سطح درک پرسنل شاغل در زمینه کار در ارتفاع و کار در فضای بسته در خصوص تشخیص و تمییز شرایط و اعمال ناایمن در محیط کار، بررسی میزان تأثیرات تغییر رفتارات ناایمن در محیط کار و درک شرایط خطرناک، افزایش سطح درک و آگاهی پرسنل نسبت به زیان‌های شرایط نامناسب ارگونومی و اتخاذ شرایط ارگونومی مناسب در ایستگاه‌های کاری بوده است. با توجه به تعداد کم نفرات شاغل در واحدهای فنی مهندسی و عملیات، کلیه پرسنل در قالب یک گروه تحت آموزش قرار گرفتند. انجام فرآیند مداخلات آموزشی در ۶ جلسه (هر هفته یک جلسه دو ساعته) انجام شد. انجام فرآیند آموزشی در محل امور اداری سیلو و به شکل انجام بحث گروهی، مداخله پرسنل فنی مهندسی و عملیات در فرایند بحث گروهی، تشکیل جلسه طوفان فکری و نظرسنجی از پرسنل در خصوص درک رفتارات ناایمن بوده است.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

فرایند تجزیه و تحلیل داده‌های بدست آمده توسط نرم افزار SPSS21 انجام شد. میانگین مولفه‌های فرهنگ ایمنی و پاسخ پرسنل به موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع و کار در فضای بسته تعیین گردید. ابعاد جو ایمنی با استفاده از روش واریمکس بر روی اطلاعات بدست آمده از پرسشنامه جو ایمنی صورت پذیرفت. روش واریمکس رایج‌ترین روش چرخش متعامد در تحلیل عاملی است. هدف این چرخش رسیدن به ساختار ساده با متعامد نگه داشتن محوره‌های عاملی است. روش واریمکس پیچیدگی مولفه‌ها را از طریق بزرگ سازی بارهای بزرگ و کوچک سازی بارهای کوچک در داخل هر مولفه (ستون) به حداقل می‌رساند. در این مطالعه مقادیر به صورت $KMO = 0/72$ و $Bartlett Test = 362/134$ و $P < 0/05$ ، $df = 55$ بدست آمد. بار فاکتور بیشتر از $0/3$ جهت برآورد حداقل سطح، بار $0/4$ به عنوان مهمترین بار و بار برابر یا بیشتر از $0/5$ به طور عملی مهم هستند (Mortazavi et al., 2010). مجموع اطلاعات بدست آمده از آنالیز انجام شده حاکی از آن است که میان پرسنل پاسخ دهنده همبستگی وجود داشته و از اینرو اطلاعات بدست آمده جهت انجام آنالیزهای آماری مناسب هستند. جهت بررسی میزان تأثیر مداخلات آموزشی انجام شده بر فرهنگ ایمنی و درک پرسنل نسبت به اعمال، شرایط و موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع و فضای بسته قبل از انجام این مداخلات و یک ماه بعد از مداخلات آموزشی مزکور، از مقایسه دو به دوی تعدیل بونفرونی استفاده گردید. آزمون تعدیل بونفرونی یکی از آزمون‌های تعقیبی در تحلیل واریانس می باشد که برای مقایسه دو به دوی گروه‌ها بکار می رود تا دقیقاً مشخص شود که کدامیک از دو گروه‌ها با یکدیگر تفاوت دارند (Asivandzadeh et al., 2020). جهت بررسی نقش و میزان تأثیرات فرهنگ ایمنی بر تغییر رفتار پرسنل در مواجهه با شرایط و موقعیت‌های ناایمن و خطرناک در محیط کار از آزمون رگرسیون لجستیک باینری استفاده شد. این آزمون تعیین رابطه متغیرهای مستقل با یک متغیر وابسته دوگانه (دو جوابی صفر و یک) است. تکنیک رگرسیون برای ارزیابی قدرت رابطه بین یک متغیر وابسته و مستقل استفاده می‌شود. این آزمون به پیش بینی مقدار یک متغیر وابسته از یک یا چند متغیر مستقل کمک می‌کند. مدل رگرسیون لجستیک باینری، یکی از اقسام رگرسیون لجستیک است که تعداد طبقات متغیر پاسخ در این مدل دو دسته هستند. در صورت بیشتر بودن تعداد طبقات از دو عدد، با توجه به جنس پاسخ‌های ارائه شده به صورت اسمی و ترتیبی، مدل رگرسیون اسمی و رگرسیون ترتیبی پدید می‌آید (Asivandzadeh et al., 2020). در این مطالعه متغیرهای مستقل (مولفه‌های فرهنگی) و متغیرهای وابسته (موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع و کار در فضای بسته) با استفاده از آزمون ارزیابی لجستیک باینری مورد ارزیابی اثرات مستقل قرار گرفته و سطح معنی داری $0/01$ انتخاب شد. جهت تعیین میزان ریسک مواجهه با گرد و غبار و گازهای محبوس در فضای بسته درون کندوها، از روش توسعه یافته توسط بخش ایمنی و بهداشت

وزارت کار سنگاپور با نام روش نیمه کمی ارزیابی تماس شغلی با مواد شیمیایی استفاده شد (Ministry of Manpower, 2005). این روش در یازده مرحله انجام می‌شود که مهمترین آن‌ها عبارتند از مراحل شناسایی مواد مخاطره آمیز، تعیین میزان مخاطره (HR)، تماس، سطح تماس (ER) و در نهایت تعیین سطح ریسک مواجهه است. نتایج ارزیابی میزان مواجهه پرسنل بخش عملیات کفروبی با گرد و غبار گازهای محبوس درون کندوها در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

نتایج

خصوصیات و اطلاعات جمعیت شناختی کارکنان شرکت کننده در مطالعه در جدول شماره ۱ ارائه شده است. داده‌ها حاکی از آن است که میانگین سنی پرسنل ۳۵/۶ سال با دامنه تغییرات ۴۹-۲۷ سال، میانگین سابقه کاری پرسنل ۹/۴۱ سال و سطح تحصیلات ۷۲/۳٪ لیسانس، ۲/۳۸٪ فوق لیسانس و ۲۵/۳۲٪ دیپلم بوده است. فاکتورهای مربوط به جو ایمنی ۵۳٪ کل واریانس را تشکیل می‌دهند. نتایج مربوط به آنالیز فاکتور جو ایمنی در جدول شماره ۳ ارائه شده است.

جدول ۱- اطلاعات جمعیت شناختی مربوط به پرسنل شرکت کننده در مطالعه

Table 1 – Demographic information pertaining to the personnel participating in the study

متغیر	میانگین
سن	۳۵/۶ (۲۷ – ۴۹) سال
سابقه کار	۹/۴۱ ± ۱/۲۶ سال
سطح تحصیلات	
کارشناسی ارشد	۲/۳۸٪
کارشناسی	۷۲/۳٪
دیپلم	۲۵/۳۲٪

شکل ۲- میانگین غلظت گرد و غبار در فضای داخلی کندوها

Fig. 2- Mean Dust Concentration inside the Hives

میانگین غلظت (mg/m^3)	میانگین
۰/۰۲۷ (۰/۰۱۵)	< ۰/۰۵

جدول ۳- آنالیز فاکتور برای آیتم‌های جو ایمنی

Table 3 – Factor Analysis of Safety Climate Items

ردیف	آیتم	فاکتور ۱	فاکتور ۲	فاکتور ۳
۱	لرزم نیاز به برقراری روابط کاری خوب میان پرسنل جهت افزایش سطح ایمنی با اهمیت است.	۰/۰۴۸	۰/۷۴۱	۰/۰۴۶
۲	انجام آموزش در خصوص پاسخ به موقعیت‌های خطرناک در محیط کار الزامیست	۰/۷۴۱	۰/۵۴۳	۰/۰۱۳
۳	جلوگیری از وقوع حوادث در محیط کار وظیفه هر شخص است.	۰/۲۷۱	۰/۷۲۶	۰/۰۷۲
۴	انجام کار در ارتفاع دارای ریسک قابل توجهی است.	۰/۰۱۷	۰/۰۱۶	۰/۷۴۲
۵	زمان کافی جهت انجام کار به صورت ایمن وجود دارد.	۰/۷۱۲	۰/۲۴۲	۰/۱۱۴
۶	استفاده از لوازم و تجهیزات ایمنی در کاهش میزان صدمات مفید هستند.	۰/۷۱۰	۰/۲۶۳	۰/۰۱۱
۷	اکثر پرسنل با روش‌های استفاده صحیح از لوازم و تجهیزات حفاظت فردی و روش‌های انجام صحیح کار آشنا هستند.	۰/۶۳۹	۰/۳۱۶	۰/۰۶۴
۸	انجام کار به صورت ایمن بخشی از توانایی‌های فنی پرسنل محسوب می‌گردد.	۰/۴۲۳	۰/۰۲۲	۰/۴۴۶

با توجه به نتایج مطالعات به عمل آمده مشاهده گردید که میانگین نهایی سطح شاخص فرهنگ ایمنی پرسنل شاغل در واحدهای فنی مهندسی و عملیات قبل از انجام مداخلات آموزشی $21/6 \pm 143$ بوده که کمتر از حد مطلوب تعریف شده در فرهنگ ایمنی است. در جدول شماره ۴، میانگین نمرات مراحل انجام مولفه‌های فرهنگ ایمنی نشان داده شده است (Asivandzadeh et al., 2020). بر اساس نتایج ارائه شده در این جدول، مولفه تعهد سازمانی و تعهد مدیریت نامطلوب‌ترین و وضعیت نگرش کلیه پرسنل به فرهنگ ایمنی مطلوب‌ترین وضعیت را دارا بوده است. میزان درک ریسک موقعیت‌های مخاطره آمیز کار در ارتفاع و کار در فضای بسته به صورت درصد در جدول شماره ۵ آورده شده است. از نتایج بدست آمده می‌توان دریافت که ارائه پاسخ‌های متناقض به فاکتورهای مشخص شده حاکی از عدم درک کافی پرسنل به مخاطرات فرآیند کار در ارتفاع و کار در فضای بسته است.

جدول ۴- مقایسه میانگین شاخص مولفه‌های فرهنگ ایمنی در محیط کار

Table 4 - Comparison of the Mean Index of Safety Culture Components in the Workplace

میانگین شاخص (بعد از انجام مداخله آموزشی)	میانگین شاخص (پیش از مداخله آموزشی)	شاخص مطلوبیت	مولفه فرهنگ ایمنی ارائه شده
۲۷/۶	۱۶	۲۰	انجام آموزش‌های حین کار و صلاحیت پرسنل
۲۱/۳	۹	۱۷	بررسی مقایسه‌ای بین ارجحیت انجام کار با ایمنی
۲۹/۵	۱۰	۲۰	ارتباطات مابین پرسنل با یکدیگر
۲۰/۳	۸	۱۶	ارتباطات مابین پرسنل با مدیریت
۴۷/۹	۲۰	۴۲	میزان مشارکت پرسنل در امور مرتبط با ایمنی
۲۸/۲	۱۷	۲۶	آگاهی پرسنل از حوادث و انواع شبه حوادث
۳۵	۱۶	۳۱	تعهدات مدیریت ارشد به مقوله ایمنی
۲۶/۷	۱۱	۱۹	وضعیت سرشیفتان واحد فنی و مهندسی
۵۳/۴	۲۴	۴۶	میزان رعایت قوانین و مقررات ایمنی در محیط کار
۱۶/۸	۶	۱۲	میزان عدم رعایت قوانین و مقررات ایمنی در محیط کار
۵۲/۷	۲۲	۴۶	سطح نگرش کلیه پرسنل

مقایسه مقادیر بدست آمده از بررسی فرهنگ ایمنی و درک ریسک موقعیت‌های خطرناک قبل و یک ماه بعد از انجام مداخلات آموزشی در جدول شماره ۶ آورده شده است. با توجه به مجموع مقادیر بدست آمده مشخص شد که اختلاف معنی داری مابین میزان درک کارگران از موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع و کار در فضای بسته و همچنین فرهنگ ایمنی قبل و بعد از انجام مداخلات آموزشی وجود دارد. طبق مقادیر بدست آمده از جدول شماره ۶، بعد از انجام فرآیند مداخله آموزشی، میانگین سطح فرهنگ ایمنی به رقم $27/6 \pm 249/31$ ارتقاء پیدا کرد. همچنین با توجه به مقادیر بدست آمده و ارائه شده در جدول شماره ۵، بعد از انجام مداخلات آموزشی، سطح درک کارگران نسبت به موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع و کار در فضای بسته افزایش پیدا کرده و میزان توانایی آنان در رابطه با تصمیم‌گیری صحیح و سریع در مواقع مواجهه با عوامل یا شرایط خطرناک به سطح مطلوب رسیده است (Asivandzadeh et al., 2020). نتایج حاصل از تعدیل بونفرونی بیانگر وجود اختلاف معنی داری بین نمرات فرهنگ ایمنی و درک ریسک موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع و کار در فضای بسته قبل و بعد از انجام فرآیند مداخلات آموزشی است.

شکل ۵- مقایسه پاسخ پرسنل به درک ریسک موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع، قبل و بعد از انجام مداخلات آموزشی

Fig. 5: Comparison of personnel responses to risk perception of hazardous work-at-height situations, before and after the implementation of educational interventions

موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع و کار در فضای بسته			قبل از انجام مداخلات آموزشی			یکماه بعد از انجام مداخلات آموزشی		
			کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد
کار بر روی برج الواتور				۷۰			۹۶	
کار بر روی کانوایر				۶۲		۸۹		
کار بر روی سازه کندو				۷۶			۹۳	
کار بر روی داربستی که به خوبی تخته گذاری نشده است				۶۵		۹۶		
کار بر روی داربست بدون گارد ریل و لبه های حفاظتی				۶۲			۹۱	
بالا و پایین رفتن از اتصالات جهت دسترسی به داربست				۵۹		۷۳		
نردبان با اتصالات محکم نشده				۶۹			۸۷	
استفاده از نردبان شکسته شده				۶۲			۹۹	
وجود ذرات گرد و غبار و گازهای محبوس در فضای درون کندوها				۷۲			۹۹	

شکل ۶- مقایسه نمرات فرهنگ ایمنی، درک ریسک موقعیت‌های خطرناک و جو ایمنی قبل و بعد از انجام مداخلات آموزشی

Fig. 6 - Comparison of Safety Culture Scores, Risk Perception of Hazardous Situations, and Safety Climate Before and After Educational Interventions

مولفه	بازه زمانی	P - Value
فرهنگ ایمنی	قبل از انجام مداخلات آموزشی	۰/۰۵
	بعد از انجام مداخلات آموزشی	۰/۰۷
درک کارگران نسبت به موقعیت‌های خطرناک	قبل از انجام مداخلات آموزشی	۰/۰۳
	بعد از انجام مداخلات آموزشی	۰/۲
جو ایمنی	قبل از انجام مداخلات آموزشی	۰/۰۳
	بعد از انجام مداخلات آموزشی	۰/۷

جهت بررسی میزان تأثیرات مداخلات آموزشی بر نگرش پرسنل در مواجهه با موقعیت‌های خطرناک از آزمون لجستیک باینری استفاده شد. هدف از انجام آزمون لجستیک باینری بررسی اثرات مستقل فاکتورهای (مخاطرات کار در ارتفاع و فضای بسته، درک ریسک و جو ایمنی) بر روی موقعیت‌های خطرناک شناسایی شده است. در این فرآیند، ۹ موقعیت خطرناک کار در ارتفاع و فضای بسته به عنوان متغیرهای وابسته و فاکتورهای جو ایمنی به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند (Mortazavi et al., 2010). نتایج آزمون لجستیک باینری در جدول شماره ۷ آورده شده است. طبق نتایج آزمون لجستیک باینری، بعد از انجام مداخلات آموزشی، ارتباط معکوس و معنی داری بین تمامی موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع، کار در فضای بسته، فرهنگ ایمنی و جو ایمنی برقرار شد.

شکل ۷- رگرسیون لجستیک باینری موقعیت‌های خطرناک

Fig. 7- Binary Logistic Regression of Hazardous Situations

فرهنگ ایمنی و جو ایمنی قبل از انجام			یکماه بعد از انجام مداخلات آموزشی			ریسک موقعیت‌های خطرناک
مداخلات آموزشی			آموزشی			
B	Wald	P - Value	B	Wald	P - Value	
۰/۰۳۷	۱/۰۱	۰/۰۷۲	-۰/۳۹۶	۴/۰۲۹	۰/۰۸	کار بر روی برج الواتور
۰/۲۴۲	۱/۲۰	۰/۰۱۸	-۰/۴۰۶	۵/۲۸۱	۰/۰۷	کار بر روی کانوایر
-۰/۱۵	۳/۲۹	۰/۰۰۲	-۰/۳۶۸	۳/۰۵	۰/۱۱	کار بر روی سازه کندو
-۰/۸۲	۵/۰۲۶	۰/۰۴۱	-۰/۷۰۶	۵/۴۲۹	۰/۰۸	کار بر روی داربستی که به خوبی تخته گذاری نشده است
۰/۲۴۶	۱/۶۲	۰/۱۴	-۰/۸۷۲	۱/۴۹۱	۰/۶۱۸	کار با داربست بدون گاردریل و تخته‌های حفاظتی
-۰/۰۶۵	۴/۱۲	۰/۰۴۲	-۰/۷۰۱	۶/۵۱۴	۰/۰۵	بالا و پایین رفتن از اتصالات جهت دسترسی به داربست
۰/۹۵	۳/۲۹	۰/۰۰۷	-۰/۳۲۱	۱/۲۵۹	۰/۰۳۹	نردبان با اتصالات محکم نشده
-۰/۱۲	۱/۲۰۱	۰/۰۴۹	-۰/۶۲۸	۲/۰۲۶	۰/۶۱۶	استفاده از نردبان شکسته شده
۰/۳۴۲	۱/۶۶	۰/۱۶	-۰/۴۰۶	۷/۰۲۲	۰/۰۰۹	وجود ذرات گرد و غبار و گازهای محبوس در فضای درون کندوها

کار بر روی کانوایر، کار بر روی سازه کندوها، کار بر روی داربست بدون تخته، دارای بیشترین درصد پاسخ به ریسک‌ها بوده و کار بر روی داربست بدون حفاظ گذاری دارای کمترین میزان ریسک شناسایی شده است. مقادیر منفی ضریب B بدست آمده در موقعیت‌های خطرناک اشاره شده بیانگر تأثیرات مستقیم نگرش ایمنی در مواجهه با این موقعیت‌ها است. فاکتور مداخلات آموزشی دارای ارتباط معنی داری با ۴ مورد موقعیت خطرناک و فاکتور جو ایمنی نیز دارای ارتباط معنی داری با ۵ مورد موقعیت خطرناک کار در ارتفاع و کار در فضای بسته است.

بحث و نتیجه گیری

هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی میزان تأثیرات مداخلات آموزشی بر فرهنگ ایمنی و درک ریسک موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع و کار در فضای بسته بین پرسنل شاغل در سیلوی غلات است. نتایج حاصل از اجرای این طرح پژوهشی حاکی از تأثیرات مثبت انجام فرآیند مداخلات آموزشی به همراه مداخلات فنی و PM در بهبود فرهنگ ایمنی کارگران نسبت به موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع و کار در فضای بسته دارد. میانگین امتیاز جو ایمنی برای کلیه ابعاد بالاتر از میانگین طیف لیکرت یعنی (۳) بوده و در بین فاکتورهای اندازه گیری شده، نگرش و مشارکت و تعهد کارکنان در زمینه ایمنی بالاترین میانگین امتیاز را به خود اختصاص داده‌اند و پس از آن‌ها به ترتیب متغیرهای دانش و تعهد مدیریت قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج حاصل از جدول شماره ۴، میانگین شاخص مولفه‌های فرهنگ ایمنی در مراحل اول و دوم انجام مداخلات آموزشی افزایش معنی داری داشته که به نوبه خود نشان دهنده تأثیرات سازنده انجام آموزش و اقدامات فنی بر فرهنگ ایمنی کارکنان است. سطح نگرش کارگران شاغل در سیلو به مقوله ایمنی ارتباط مستقیم و مثبتی با سطح دانش، آموزش‌های حین خدمت قوانین و مقررات جاری و رویه‌های ایمنی حاکم در محدوده سیلو دارد. بر اساس یافته‌های مطالعه، افراد دارای مدارک تحصیلی دانشگاهی دارای سطح ایمنی بالاتر و معنی داری نسبت به سایر کارکنان هستند. همسو با یافته‌های تحقیق فوق، مطالعه صورت پذیرفته توسط سیگولارو نیز حاکی از بالاتر بودن سطح فرهنگ ایمنی در افراد با تحصیلات

بیشتر است. وی عنوان نمود که داشتن دانش ایمنی و مهارت فنی عوامل تعیین کننده‌ای برای اختلاف فردی از لحاظ عملکرد ایمنی است.

نتایج حاصل از پژوهش بیانگر آن است که متوسط نمره جو ایمنی قبل از انجام مداخلات آموزشی ۱۴/۴۵٪ و بعد از انجام مداخلات آموزشی به رقم ۳۲/۶۸٪ ارتقاء یافته است. از آنجایی که این مقدار دارای روندی صعودی است، در نتیجه جو ایمنی واحد مورد مطالعه مثبت است. نتایج بررسی فوق حاکی از آن است که جو ایمنی نسبت به قبل از انجام مداخلات آموزشی رشد قابل توجهی داشته است. انجام مطالعات فوق بیانگر آن است که انجام فرآیند مداخلات آموزشی تأثیر بسیار زیادی بر نگرش آن‌ها در زمینه جو ایمنی و نگرش آن‌ها بر ریسک در محیط کاری دارد (Mortazavi et al., 2010). در صورتی که قبل از انجام مداخلات آموزشی، این مولفه‌ها وضعیت نامطلوبی داشته که به نوبه خود ناشی از عدم توجه و اهتمام مدیران ارشد در رابطه با توجه به برقراری ارتباط سازنده با پرسنل عملیاتی، بررسی وضعیت ایمنی محیط کار پرسنل، تأثیر آموزش و آگاهی دادن به کارگران در خصوص رعایت نکات ایمنی است. نگرش ایمنی که بیانگر اعتقادات و احساسات کارکنان نسبت به سیاست‌ها و اقدامات ایمنی است، یکی از مهمترین فاکتورهای بر جو ایمنی بوده که به صورت گسترده توسط سایر محققین مورد بررسی قرار گرفته است. راه حل‌های ایمنی که تنها بر پایه رویکردهای مهندسی، مقررات و دستورالعمل‌ها باشند، در صورتی که نگرش‌ها نسبت به ایمنی ضعیف باشند و سیستم مدیریت ایمنی موثر در محیط کار، مبتنی بر ارتباطات سازنده مابین مدیریت و کارکنان عملیاتی حاکم نباشد، با شکست مواجه خواهد شد. بنابر این مداخلات آموزشی بایستی به شیوه‌ای خاص روی این متغیر تمرکز داشته تا بهبود عملکرد و جو ایمنی را تسریع بخشد. بررسی‌های صورت گرفته نشان دهنده آن است که عدم توجه کافی مدیریت به ارتباط با پرسنل عملیاتی به نوبه خود به سبب نادیده گرفتن قوانین، مقررات و مسائل مرتبط با ایمنی و بهداشت حرفه‌ای از سوی پرسنل در محیط کار شده است و همان‌طور که از نتایج حاصله مشاهده می‌گردد، مولفه ارتباط مابین پرسنل با مدیریت در نامطلوبترین وضعیت است. بر اساس یافته‌های ذکر شده در جدول شماره ۵، موقعیت‌های زیر از کمترین میزان ریسک در بین پرسنل برخوردار هستند:

- کار بر روی برج الواتور.

- کار بر روی کانوایر.

- کار بر روی داربست بدون گاردریل و لبه‌های حفاظتی.

این یافته‌ها حاکی از عدم درک صحیح پرسنل عملیاتی سیلو نسبت به موقعیت‌های خطرناک کار در محوطه سیلو است. همچنین موارد زیر دارای بیشترین مقادیر ریسک بوده و در این موارد اکثر پرسنل توقف کامل کار را ترجیح می‌دهند:

- کار بر روی سازه کندو.

- کار بر روی داربستی که به خوبی تخته گذاری نشده است.

- بالا و پایین رفتن از اتصالات جهت دسترسی به داربست.

- استفاده از نردبان شکسته شد.

- وجود ذرات گرد و غبار و گازهای محبوس در فضای درون کندوها.

جهت بدست آوردن ترتیب پیشبینی کننده‌ها از آماره Wald استفاده شد. از میان ۵ موقعیت بدست آمده، کار بر روی داربستی که به خوبی تخته گذاری نشده است به دلیل داشتن Wald بالا (۵/۰۲۶)، به عنوان مهمترین موقعیت در پیش بینی رفتار محسوب می‌گردد (Mortazavi et al., 2010). مقدار ضریب B آیتم کار بر روی داربستی که به خوبی تخته گذاری نشده برابر با ۰/۸۲- بوده که بیانگر سطح آگاهی پرسنل عملیاتی از مباحث ایمنی و عدم انجام کار در موقعیت‌های خطرناک است. ضریب مثبت B بیانگر تمایل پرسنل به انجام کار در موقعیت مدنظر را نشان می‌دهد. با دقت در نتایج ارائه شده در جدول شماره ۷ مشاهده می‌گردد که پس از انجام مداخلات آموزشی فاکتورهای وجود ذرات گرد و غبار و گازهای محبوس در فضای درونی کندوها با Wald ۷/۰۲۲ و بالا و پایین رفتن از اتصالات

جهت دسترسی به داربست با Wald ۶/۵۱۴ به عنوان مهمترین موقعیت در پیش بینی رفتار در نظر گرفته می‌شود و توانایی لمس و درک عمیق موقعیت‌های خطرناک را توسط پرسنل عملیاتی نشان می‌دهد. در مراحل نهایی این تحقیق شاهد آن بودیم که پرسنل عملیاتی در شناسایی انواع مخاطرات موجود در محدوده کاری سیلو و همچنین بحث گروهی در رابطه با آن‌ها مشارکت و انگیزش بیشتری از خود نشان داده و انجام کار با کیفیت بهتر و در عین حال توجه بیشتر به سلامت و ایمنی خود و سایر پرسنل را از خود نشان می‌دهند (Asivandzadeh et al., 2020). وجود ضرایب منفی B در آیت‌های بدست آمده یک ماه بعد از انجام مداخلات آموزشی حاکی از افزایش آگاهی پرسنل نسبت به مخاطرات و همچنین تمایل به انجام کار در شرایط ایمن دارد. همچنین نتایج آزمون رگرسیون لجستیک باینری بر روی مجموع داده‌ها حاکی از وجود ارتباط مهم آماری میان نگرش و رفتار ایمنی پرسنل است. پیشرفت‌های روز افزون در زمینه مسائل ایمنی با تمرکز هرچه بیشتر بر مطالعات مداخله‌ای سبب خلق فرصت‌های جدیدی در زمینه تشویق کارکنان به نگرش مثبت به مقوله ایمنی و متعاقباً کاهش حوادث داشته است. در این راستا مطالعات صورت پذیرفته توسط کوپر با ارائه مدلی جهت بررسی تأثیر آموزش ایمنی بر فرهنگ ایمنی موفق به اثبات فرضیه مورد نظر در مطالعات شده و اظهار داشتند که آموزش مسائل ایمنی می‌تواند بر فرهنگ ایمنی و متعاقباً عملکرد کارکنان تأثیرات مثبت بگذارد. تغییر نگرش مدیریت نسبت به ایمنی با مقدم شمردن آن در انجام فرآیندها در هر شرایطی و انتقال این نگرش از طریق وضع مقررات ایمنی و تبلیغ فرهنگ و جو ایمنی به پرسنل زیرمجموعه خود در کنار تأمین آسایش و سلامت جسمانی و روانی آن‌ها، ایجاد انگیزش و بهبود شرایط و محیط کار می‌تواند نقش موثری در افزایش بهره‌وری و کاهش حوادث داشته باشد.

گزارشات ناشی از حوادث شغلی و آثار و پیامدهای فردی و اجتماعی ناشی از آن‌ها بیانگر اهمیت موضوع آموزش و نقش آن در بهبود تفکر و نگرش کارکنان به مسائل ایمنی است. صنایع و کارگاه‌ها می‌توانند با اتخاذ سری تدابیر ایمنی و بهداشتی، طراحی صحیح فنی مهندسی به همراه انجام آموزش‌های لازمه به صورت منسجم از وقوع حوادث شغلی و پیامدهای ناشی از آن جلوگیری نمایند. مداخلات آموزشی تأثیر به سزایی در کاهش حوادث شغلی و افزایش سطح فاکتورهای جو ایمنی و بهبود نگرش پرسنل به مقوله ایمنی دارد. برگزاری دوره‌های آموزشی به واسطه انجام فرآیند مداخله آموزشی به نوبه خود علاوه بر سطح فرهنگ و نگرش ایمنی پرسنل عملیاتی، به نوبه خود سبب اتخاذ تدابیر ایمنی و بهداشتی صحیح در محیط کار توسط مدیریت ارشد خواهد شد. یافته‌های حاصل از تحقیق حاضر بیانگر تأثیر بالای حضور و مشارکت پرسنل عملیاتی در جلسات مرتبط با مقوله ایمنی در سیلو بوده و نقش زیادی در افزایش سطح درک ریسک موقعیت‌های خطرناک کار در ارتفاع و کار در فضای بسته دارد. نتایج حاصل از این تحقیق به طور خلاصه در ذیل ارائه شده است.

- ۱- انجام فرآیند مداخلات آموزشی به همراه پیشرفت‌های نوین در زمینه ایمنی و بهداشت محیط کار، با ایجاد فرصت‌های جدید، باعث بهبود نگرش پرسنل به مقوله ایمنی و کاهش حوادث در محیط کار می‌شود.
- ۲- در یک بازه زمانی بعد از انجام مداخلات آموزشی، افزایش معنی داری در میانگین نمرات رفتار ایمنی پرسنل مشاهده شد.
- ۳- انجام فرآیند مداخلات آموزشی سبب افزایش معنی داری در تعهدات مدیریت ارشد در زمینه اهتمام به مسائل مرتبط با ایمنی در سیلو شده است.
- ۴- در این مطالعه بعد از انجام مداخلات آموزشی، وضعیت آموزش و همچنین نگرش کلی پرسنل به فرهنگ ایمنی و ارجحیت بین مقوله ایمنی و کار افزایش معنی داری پیدا کرد.
- ۵- تشکل کمیته ارزیابی ریسک با مشارکت مسئولین HSE، مسئول ایمنی شرکت، مدیریت ارشد شرکت و پرسنل شاغل در بخش فنی و مهندسی و عملیات جهت کنترل ریسک‌های موجود در محدوده سیلو نقش مهمی در کاهش سوانح دارد.
- ۶- تدوین برنامه حفاظت در برابر سقوط و همچنین حفاظت در شرایط کار در فضای بسته به عنوان یکی از ارکان اصلی کاهش مخاطرات شغلی پیشنهاد می‌گردد.

۷- تبادل نظرات و اشتراک گذاری تجربیات بین پرسنل با یکدیگر می‌تواند گامی موثر در جهت نیل به اهداف و همچنین بهبود شرایط و جو ایمنی در محیط کاری سیلو باشد.

Extended Abstract

Introduction: Occupational accidents remain a significant concern in developing countries, particularly in industries involving high-risk activities such as working at height and in confined spaces. According to global reports, approximately 3.5 million people die annually from work-related incidents, with substantial economic losses estimated at 500 billion USD. In Iran, official data from 1403 (2024) indicate 26,548 injuries and 1,986 fatalities from occupational accidents, with falls from height accounting for 46% of deaths. The grain storage silo industry is particularly hazardous due to activities like maintenance on elevator towers, conveyors, and hive structures, as well as silo cleaning, which exposes workers to dust and confined space risks. Safety climate, defined as workers' shared perceptions of safety policies and priorities, plays a crucial role in influencing safe behaviors. Poor risk perception and unsafe acts contribute to 80% of accidents, underscoring the need for educational interventions to enhance awareness and culture. This study investigates the impact of educational interventions and safety climate factors on improving risk perception of hazardous situations in working at height and confined spaces among grain silo workers.

Materials and methods: This quasi-experimental study employed a pre-test and post-test design conducted in a grain silo facility in 1403 (2024). The target population consisted of 15 technical engineering and operations personnel exposed to high-risk tasks, such as preventive maintenance on elevator towers, conveyors, and storage hives, as well as silo floor cleaning. Data were collected using a two-part questionnaire: the first part assessed safety climate with 10 items adapted from McDonald and Harry's 2001 questionnaire (Cronbach's alpha = 0.83), covering dimensions like personnel competence, safety prioritization, communication, and management commitment. The second part evaluated risk perception of 8 height-related hazards (e.g., working on scaffolds without guardrails) and 1 confined space hazard (dust and trapped gases in hives) using a Likert scale. Educational interventions were delivered over 6 two-hour weekly sessions, including lectures, group discussions, brainstorming, and materials on hazard identification, PPE usage, ergonomics, and safe decision-making. Statistical analysis was performed using SPSS 21, including factor analysis (Varimax rotation, KMO = 0.72), Bonferroni-adjusted pairwise comparisons, and binary logistic regression to examine the effects of safety climate on risk perception. Exposure risk to dust and gases was assessed using Singapore's semi-quantitative method.

Results: Participants had a mean age of 35.6 years (range: 27-49), mean work experience of 9.41 years, and education levels of 72.3% bachelor's, 2.38% master's, and 25.32% diploma. Safety climate factors explained 53% of variance, with organizational commitment and management dedication scoring lowest pre-intervention. Pre-intervention mean safety culture score was 143 ± 21.6 (below optimal), improving to 249.31 ± 27.6 post-intervention ($p < 0.05$). Risk perception increased significantly, with workers showing better recognition of hazards like unscaffolded platforms and broken ladders. Binary logistic regression revealed inverse significant relationships between safety climate factors and all 9 hazardous situations post-intervention, with working on unscaffolded platforms (Wald = 5.026) and confined space dust exposure (Wald = 7.022) as strongest predictors of safe behavior. Bonferroni tests confirmed significant differences in safety culture and risk perception pre- and post-intervention.

Discussion and Conclusion: The findings demonstrate that educational interventions, combined with technical measures, significantly enhance safety culture and risk perception among silo workers, leading to safer behaviors and reduced accident potential. Post-intervention improvements align with prior studies (e.g., Mortazavi et al., 2010; Asivandzadeh et al., 2020), emphasizing the role of training in fostering positive attitudes toward safety. Workers with higher education exhibited superior safety performance, consistent with literature linking knowledge to better outcomes. Limitations include the small sample size; future research should involve larger cohorts and longitudinal follow-up. Recommendations include forming risk assessment committees, developing fall protection programs, and promoting experience-sharing among workers. Overall, targeted education fosters a proactive safety climate, ultimately minimizing occupational hazards in high-risk industries like grain silos.

Keywords: Safety climate, Risk perception, Educational interventions, Work at height, Confined spaces, Confined spaces, Occupational hazards.

References

- Halvani, G., Fallah, H., Barkhordari, A., Daman, R. K., Behjati, M., & Koohi, F. (2010). A Survey of causes of occupational accidents at working place under protection of Yazd Social Security Organization in 2005. *Iran occupational health*, 7(3), 22-9. [In Persian]
- Sepehr, P., Mohammad Fam, I., & Ketabi, D. (2014). Effect of engineering and management interventions on promoting safety culture indicators among workers of Iranian pipe rolling factory. *Tolooebehdasht*, 13(3), 11-20. [In Persian]
- Teixeira, L. R., Azevedo, T. M., Bortkiewicz, A., da Silva, D. T. C., de Abreu, W., de Almeida, M. S., ... & Braga, J. U. (2019). WHO/ILO work-related burden of disease and injury: protocol for systematic reviews of exposure to occupational noise and of the effect of exposure to occupational noise on cardiovascular disease. *Environment international*, 125, 567-578.
- Mirzaei, H. (2006). Guide to safety, health and workplace conditions. *Training center and Industrial Research of Iran*, 27.
- Asivandzadeh, E., Jamalizadeh, Z., Safari Variani, A., Mohebi, A., & Khoshnavaz, H. (2020). Evaluating the Impact of Training and Technical Interventions on Improving Safety Culture and Understanding the Risk of Dangerous Situations at Height among Construction Workers, *Journal of Health*, 11(1), 109-122.
- Mortazavi, S. B., Asilian, H., Ostavakhan, M. (2010). "A Survey of the Relationship between Safety Climate Factors and Risk Perception of Hazardous Work-at-Height Situations among Construction Workers." *Iranian Occupational Health Journal*, 8(1).
- Allahyari, T. (2006). *Risk analysis and risk assessment in chemical processes*. Fanavaran. [in Persian].
- Mohammadi Zeidi, I., Pakpour Haji Agha, A., & Mohammadi Zeidi, B. (2013). The effect of an educational intervention based on the theory of planned behavior to improve safety climate. *Iran Occupational Health*, 9(4), 30-40.
- Larsson, S., Pousette, A., & Törner, M. (2008). Psychological climate and safety in the construction industry-mediated influence on safety behaviour. *Safety Science*, 46(3), 405-412.
- Abdelhamid, T. S., & Everett, J. G. (2000). Identifying root causes of construction accidents. *Journal of construction engineering and management*, 126(1), 52-60.
- Abedinzadeh, F., Givehchi, S., & Hoveidi, H. (2022). Assessment of Safety Climate Among Employees of an Industrial Poultry Slaughterhouse. *Journal of Environmental Studies*, 47(4), 429-444. doi: 10.22059/jes.2021.318405.1008139
- Golbabaie, F., Ghahri, A., Mahdizadeh, M., Ghiasuddin, M., Mohajer, K., & Eskandari, D. (2011). Health risk assessment of exposure to total fume in different welding processes of an automobile industry. *Journal of Health and Safety at Work*, 1(1), 9-18.
- Miralizadeh Fard, S. R., Khoram Nejadian, S., & Rashidi, Y. (2024). Health risk assessment of air particulate pollutants (PM10 and PM2.5) in Tehran, A case study of Poonak. *Journal of Natural Environment*, 76(4), 675-687. doi: 10.22059/jne.2023.356444.2536
- Ministry of Manpower, O.S.a.H.D. (2005). Singapore, a semi-quantitative method to assess occupational exposure to harmful chemicals.
- Hnizdo, E., Kennedy, S. M., Blanc, P. D., Toren, K., Bernstein, I. L., & Chan-Yeung, M. (2006). *Chronic airway disease due to occupational exposure*. In *Asthma in the Workplace*. CRC Press. 709-738.



Journal of Environmental
Management and Law

فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست

<https://sanad.iau.ir/en/Journal/jeml>

The Effectiveness of Project-Based Environmental Ethics Education on Responsibility and Attitudes Toward the Environment Among Fifth-Grade Male Students in District 3 of Isfahan

Malihe Shirazi¹, Nasrollah Ghashghaeizadeh^{*2}

¹. Master's degree, Department of educational management, Isf.c., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

². Assistant professor, Department of educational management, Isf.c., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

*Corresponding Author: nasir252@iau.ac.ir

Original Paper

Abstract

Received: 2024.11.05

Accepted: 2025.04.08

Keywords:

Environmental Ethics
Education,
Project-Based Method,
Responsibility,
Environmental Attitude,
Fifth-Grade Students.

The present study aimed to investigate the effectiveness of project-based environmental ethics education on the environmental attitudes and responsibility of fifth-grade elementary students in District 3 of Isfahan, Iran. This research was applied in purpose and employed a quasi-experimental design with a pretest-posttest control group. The statistical population consisted of all fifth-grade male students in the district, from which 60 students were randomly selected and assigned to experimental and control groups. Data were collected using two standardized questionnaires: the Environmental Responsibility Questionnaire by Cashman (2015) and the Environmental Attitude Questionnaire by Dunlap, Boyce, and Stanley (2018), both previously validated for reliability and validity. The experimental group received eight weeks of project-based environmental ethics education, while the control group received no intervention. The results of multivariate analysis of covariance (MANCOVA) indicated a significant effect of project-based education on environmental attitudes ($F = 118.099, p < 0.001, \eta^2 = 0.678$) and environmental responsibility ($F = 210.132, p < 0.001, \eta^2 = 0.790$). These findings suggest that project-based education significantly improved students' attitudes and heightened their sense of environmental responsibility. The active participation of students in educational activities fostered the internalization of ethical values, enhanced self-efficacy, and promoted a more positive attitude toward nature. The results underscore the importance of employing active and participatory approaches in environmental education at the elementary level and provide valuable guidance for educational policymakers in fostering environmentally responsible and aware future generations.



Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the

اثربخشی آموزش اخلاق محیط زیستی به روش پروژه بر مسئولیت پذیری و نگرش به محیط زیست دانش آموزان پسر پایه پنجم ناحیه ۱۳ اصفهان

ملیحه شیرازی^۱، نصراله قشقائی زاده^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، گروه علمی مدیریت آموزشی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۲- استادیار، گروه علمی مدیریت آموزشی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: nasir@iua.ac.ir

نوع مقاله:	چکیده
علمی-پژوهشی	هدف پژوهش حاضر بررسی اثربخشی آموزش اخلاق محیط زیستی به روش پروژه محور بر نگرش و مسئولیت پذیری محیط زیستی دانش آموزان پایه پنجم ابتدایی ناحیه ۳ شهر اصفهان بود. این مطالعه از نظر هدف کاربردی و از نظر روش، نیمه تجربی با طرح پیش آزمون و پس آزمون با گروه کنترل انجام شد. جامعه آماری شامل کلیه دانش آموزان پسر پایه پنجم این ناحیه بود که از میان آن ها ۶۰ نفر به صورت تصادفی انتخاب و در دو گروه آزمایش و کنترل گمارده شدند. ابزار گردآوری داده ها شامل دو پرسشنامه استاندارد مسئولیت پذیری محیط زیستی و نگرش محیط زیستی بود که روایی و پایایی آن ها تأیید شده است. گروه آزمایش طی هشت هفته آموزش اخلاق محیط زیستی را به روش پروژه محور دریافت کرد و گروه کنترل هیچ مداخله ای نداشت. نتایج تحلیل کوواریانس چندمتغیره نشان داد که آموزش پروژه محور بر نگرش محیط زیستی ($F=118.099$; $p<0.001$; $\eta^2=0.678$) و مسئولیت پذیری محیط زیستی ($F=210.132$; $p<0.001$; $\eta^2=0.790$) تأثیر معنادار دارد. بدین معنا که آموزش مبتنی بر پروژه توانست موجب بهبود قابل توجه نگرش و افزایش سطح احساس مسئولیت دانش آموزان نسبت به محیط زیست شود. بر اساس یافته ها، مشارکت عملی دانش آموزان در فعالیت های آموزشی موجب درونی سازی ارزش های اخلاقی، تقویت خودکارآمدی و ایجاد نگرش مثبت تر نسبت به طبیعت گردید. نتایج این پژوهش بر اهمیت به کارگیری رویکردهای فعال و مشارکتی در آموزش محیط زیستی مدارس ابتدایی تأکید دارد و می تواند راهنمایی مؤثر برای سیاست گذاران آموزشی در جهت پرورش نسل های آینده مسئول و آگاه محیط زیستی باشد.
تاریخچه مقاله:	
ارسال: ۱۴۰۳/۰۸/۱۵	
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰	
کلمات کلیدی:	
آموزش اخلاق محیط زیستی، روش پروژه، مسئولیت پذیری، نگرش محیط زیستی، دانش آموزان پایه پنجم	

مقدمه

بحران‌های محیط زیستی معاصر (مانند آلودگی و تغییر اقلیم) تهدیدی جدی برای بقای بشر هستند که ریشه در تغییر نگرش انسان دارد. انسان امروزی، برخلاف باورهای سنتی، طبیعت را صرفاً منبعی برای مصرف می‌بیند و همین نگاه مصرف‌گرایانه، تعامل پایدار با محیط زیست را مختل کرده است (Wilson, 2022). مؤثرترین راهبرد برای مقابله با بحران‌های محیط زیستی، دگرگونی نگرش نسل‌های آینده است که صرفاً از طریق آموزش امکان‌پذیر است. این آموزش باید فراتر از دانش‌افزایی، با تکیه بر اخلاق محیط زیستی، حس احترام، مسئولیت‌پذیری و تعهد به همزیستی با طبیعت را در کودکان و نوجوانان نهادینه سازد (Vladova, 2023). نظام‌های آموزشی و به‌طور خاص مدارس، مسئولیت اساسی در شکل‌دهی نگرش‌های پایدار نسبت به محیط زیست دارند. آموزش زود هنگام مفاهیم محیط زیستی در این نهادها، برای نهادینه‌سازی رفتارهای صحیح و تربیت نسلی آگاه و متعهد حیاتی است (Afzal Khani et al., 2020; Abolhassani et al., 2012). آموزش اخلاقی در میان کودکان، که ذهن‌های انعطاف‌پذیری دارند، می‌تواند پایه‌های یک نگرش پایدار را بنا نهد. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که کودکان در سنین ابتدایی، مانند پایه پنجم دبستان، در مرحله‌ای از رشد شناختی هستند که می‌توانند مفاهیم اخلاقی پیچیده را درک کنند و آن‌ها را در رفتارهای روزمره اعمال نمایند (Fili et al., 2022; Asgaripoor et al., 2020). تحقق این تحول اساسی در آموزش، مستلزم به‌کارگیری رویکردهایی است که یادگیرنده را در محور فرآیند آموزش قرار داده و فرصت‌های مناسبی برای تجربه، تأمل، گفت‌وگو و کنش‌گری فعالانه فراهم آورد (Abolhassani et al., 2012; Hosseini Rad & Rahmaty, 2022). یکی از کارآمدترین روش‌ها برای دستیابی به این اهداف، یادگیری مبتنی بر پروژه است. این روش، فرآیند یادگیری را از یک حالت انفعالی به یک فرآیند فعال، مشارکتی، پژوهش‌محور و خلاقانه دگرگون می‌سازد (Darling-Hammond et al., 2024). در این رویکرد، کسب دانش نه از طریق انتقال صرف، بلکه از مسیر کشف، تجربه، حل مسائل واقعی و اجرای پروژه‌های عینی صورت می‌پذیرد. این متدولوژی، به‌ویژه در انتقال مفاهیم محیط زیستی که نیازمند درک کاربردی و پرورش نگرش اخلاقی هستند، اثربخشی قابل توجهی دارد (Afzal Khani et al., 2020). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که مشارکت دانش‌آموزان در پروژه‌های آموزشی نه تنها سطح درک آنان از مسائل محیط زیستی را افزایش می‌دهد، بلکه به ایجاد تغییرات رفتاری مثبت نیز منجر می‌شود (Krajcik et al., 2023; Abolhassani et al., 2012). Qaaddi & Talebi (2018) در مطالعه توصیفی-همبستگی خود بر روی دانش‌آموزان دختر مقطع متوسطه شهرستان داراب دریافتند که با وجود رابطه مثبت بین نگرش، دانش و ارزش‌های زیست‌محیطی با رفتار، عملکرد رفتاری محیط‌زیستی آن‌ها به‌طور نسبی ضعیف است. این نتیجه بر ناکافی بودن آموزش‌های نظری صرف تأکید کرده و به‌طور ضمنی ضرورت استفاده از رویکردهای عملی و فعال مانند یادگیری مبتنی بر پروژه را برای تحقق تغییرات رفتاری مؤثر برجسته می‌سازد.

با هدف برون‌رفت از محدودیت‌های آموزش‌های نظری، soleimani و همکاران (2019) الگوی آموزش در بستر طبیعت را برای تقویت اخلاق محیط‌زیستی پیشنهاد داده‌اند. یافته‌های این پژوهش، مبتنی بر تحلیل اسناد بالادستی، نشان می‌دهد که تعامل مستقیم با محیط طبیعی از طریق این الگو، فرآیند درونی‌سازی مفاهیم و تعمیق تجربیات عاطفی مرتبط با اخلاق محیط‌زیستی را شتاب می‌بخشد. پژوهش Qajanti Far و همکاران (2025) بر اثربخشی برنامه‌های آموزشی خلاقانه و غیرمستقیم، از جمله داستان‌سرایی و نمایش، در مقطع ابتدایی تأکید دارد. این روش‌ها، به‌طور معناداری آگاهی شناختی و نگرش مثبت دانش‌آموزان نسبت به محیط زیست را ارتقا بخشیده‌اند و پتانسیل رویکردهای کیفی را در سنین پایین مورد تأیید قرار داده‌اند. Krajcik و همکاران (2023) در یک مطالعه تجربی، اثربخشی آموزش پروژه‌محور را بر یادگیری علوم در دانش‌آموزان ابتدایی ارزیابی کردند. نتایج حاکی از آن بود که این رویکرد عملیاتی (از طریق اجرای کمپین‌های عملی و طراحی پوسترهای آموزشی)، منجر به تحول یادگیری عمیق و افزایش تعهدات فردی و اجتماعی دانش‌آموزان شده است، که می‌تواند به نگرش و مسئولیت‌پذیری محیط‌زیستی تعمیم یابد.

Uzorka و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای درباره راهبردهای درگیری دانش‌آموزان در ابتکارات پایداری، نشان دادند که آموزش مبتنی بر پروژه از طریق فعالیت‌های میدانی و تحلیل موقعیت‌های واقعی، نه تنها سطح دانش را ارتقا می‌دهد، بلکه تعهدات اخلاقی، عاطفی و اجتماعی را در قبال توسعه پایدار تقویت می‌کند. این نتایج، هم‌راستا با پژوهش حاضر، بر نقش اساسی روش پروژه‌محور در ترویج نگرش‌ها و رفتارهای مسئولانه محیط‌زیستی فراتر از انتقال صرف مفاهیم نظری تأکید می‌ورزد. Altassan (۲۰۲۴) در پژوهشی، نقش حیاتی ادغام پایدار انرژی خورشیدی، تغییر رفتار و شیوه‌های بازیافت در نهادهای آموزشی را برای حفاظت محیط و آموزش کیفیت مورد تأکید قرار داد. نتایج نشان داد که استفاده از منابع آموزشی خارج از کلاس درس (مانند پروژه‌های عملی و تعامل با سازمان‌های محلی)، موجب افزایش علاقه، درک عملی و حس تعهد محیط‌زیستی در دانش‌آموزان می‌شود؛ رویکردی که پیوند میان مدرسه و جامعه را برای تحقق اهداف تربیتی ضروری می‌سازد.

با وجود اهمیت موضوع، تاکنون در ایران تحقیقات محدودی به بررسی تأثیر روش‌های نوین آموزشی از جمله یادگیری مبتنی بر پروژه در آموزش اخلاق محیط‌زیستی پرداخته‌اند. به‌ویژه در مدارس ابتدایی و در مناطق خاص، خلأ پژوهش‌های میدانی به‌وضوح احساس می‌شود (Hosseini Rad & Rahmaty, 2022). این پژوهش بر مبنای دغدغه‌ای محوری شکل گرفت که ناظر بر وجود یک گسست عمیق میان محتوای آموزشی رسمی و کاربست اخلاقی آن در عرصه محیط‌زیست است. محدود شدن فرایند آموزش به انتقال صرف داده‌ها و مفاهیم نظری، در تربیت نسلی متعهد و مسئولیت‌پذیر که به لحاظ اخلاقی در قبال طبیعت احساس وظیفه کند، ناکارآمد است. این ضرورت، محرک اصلی برای کنکاش در شیوه‌های آموزشی بدیع و مؤثری همچون یادگیری مبتنی بر پروژه شد؛ رویکردی که پتانسیل تبدیل دانش‌آموزان از دریافت‌کنندگان منفعل اطلاعات، به کنشگران آگاه و مسئول در مواجهه با چالش‌های زیست‌بوم خود را داراست. بنابراین در این پژوهش، با بهره‌گیری از رویکرد آموزش مبتنی بر پروژه، به تقویت اخلاق محیط‌زیستی در میان دانش‌آموزان پرداخته شد. تمرکز تحقیق بر بررسی میزان اثربخشی این رویکرد بر دو مؤلفه اساسی یعنی مسئولیت‌پذیری و نگرش محیط‌زیستی دانش‌آموزان پسر پایه پنجم ابتدایی در ناحیه ۳ اصفهان بود. اهمیت این مطالعه در آن نهفته است که با اتکا به روش‌های علمی و داده‌های تجربی، به ارزیابی یکی از شیوه‌های نوین تربیتی پرداخته شد که می‌تواند در سیاست‌گذاری‌های آموزشی آینده مورد توجه قرار گیرد. بر این اساس، پرسش اساسی پژوهش این است که آیا آموزش اخلاق محیط‌زیستی به روش پروژه محور بر نگرش محیط‌زیستی و مسئولیت‌پذیری محیط‌زیستی دانش‌آموزان پایه پنجم اثربخش است؟

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نظر هدف کاربردی و با روش نیمه تجربی انجام شده است. طرح پژوهش از نوع پیش‌آزمون-پس‌آزمون با گروه کنترل است. این نوع طرح به دلیل بررسی تأثیر یک مداخله آموزشی (آموزش اخلاق محیط‌زیستی به روش پروژه‌محور) بر متغیرهای وابسته (مسئولیت‌پذیری و نگرش به محیط‌زیست)، در شرایط نسبتاً کنترل‌شده، انتخاب شده است. در ابتدا، هر دو گروه آزمایش و کنترل از نظر مسئولیت‌پذیری و نگرش به محیط‌زیست در مرحله پیش‌آزمون مورد سنجش قرار گرفتند. سپس، آموزش اخلاق محیط‌زیستی به روش پروژه محور تنها برای گروه آزمایش اجرا شد. پس از پایان دوره آموزشی، دوباره هر دو گروه در مرحله پس‌آزمون مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. این طراحی امکان بررسی تأثیر علی متغیر مستقل (آموزش اخلاق محیط‌زیستی به روش پروژه‌محور) بر متغیرهای وابسته را در محیطی نسبتاً کنترل‌شده فراهم می‌سازد.

جامعه آماری و روش نمونه‌گیری

جامعه آماری پژوهش شامل کلیه دانش‌آموزان پسر پایه پنجم ابتدایی منطقه ۳ آموزش و پرورش شهر اصفهان بود. جهت تعیین نمونه، از روش نمونه‌گیری خوشه‌ای چندمرحله‌ای استفاده شد. در مرحله اول، یک مدرسه از مدارس پسرانه منطقه ۳ به صورت تصادفی انتخاب

شد. مدرسه انتخاب شده، از نظر امکانات آموزشی، سطح تحصیلی دانش‌آموزان و شرایط جغرافیایی با سایر مدارس هم‌سطح بوده و شرایط لازم برای انجام پژوهش را دارا بود. در مرحله دوم، از میان کلاس‌های پایه پنجم مدرسه، دو کلاس به‌صورتی انتخاب شدند و به‌طور تصادفی به عنوان گروه آزمایش و گروه کنترل گمارده شدند. در نهایت، حجم نمونه ۶۰ نفر (۳۰ نفر در گروه آزمایش و ۳۰ نفر در گروه کنترل، مطابق جدول ۱) به روش تصادفی ساده انتخاب شدند. این روش، ضمن رعایت اصول اخلاقی و اجرایی، امکان انجام پژوهش در شرایط نسبتاً کنترل‌شده و قابل مقایسه را فراهم ساخت. در این راستا اقدامات زیر صورت گرفت:

- اخذ رضایت‌نامه آگاهانه از والدین
- اطلاع‌رسانی شفاف به مدیر مدرسه و دانش‌آموزان
- تضمین محرمانگی اطلاعات فردی
- احترام به حق انصراف آزمودنی‌ها در هر زمان
- پرهیز از هرگونه آسیب جسمی یا روانی به آزمودنی‌ها

جدول ۱- ویژگی‌های جمعیت‌شناختی نمونه پژوهش

Table. 1 – Demographic Characteristics of the Research Sample

گروه	تعداد دانش‌آموز	میانگین سن (سال)
آزمایش	30	10.3
کنترل	30	10.5
جمع کل	60	-

ابزار گردآوری اطلاعات

در این پژوهش، فرآیند گردآوری داده‌ها به‌صورت ترکیبی از مطالعات کتابخانه‌ای و ابزارهای میدانی انجام شده است. در مرحله نخست، با بهره‌گیری از منابع علمی، کتاب‌ها، مقالات داخلی و خارجی، پایان‌نامه‌ها و اسناد مرتبط، اطلاعات نظری و پیشینه علمی لازم در زمینه آموزش اخلاق محیط زیستی، مسئولیت‌پذیری و نگرش به محیط زیست گردآوری شد. در مرحله بعد، برای گردآوری داده‌های میدانی و سنجش دقیق متغیرهای پژوهش، از پرسشنامه‌ها بهره گرفته شد. بدین منظور، دو پرسشنامه استاندارد شامل پرسشنامه مسئولیت‌پذیری محیط زیستی و پرسشنامه نگرش محیط زیستی، که پیش از این در مطالعات علمی معتبر مورد استفاده قرار گرفته و از روایی و پایایی قابل قبولی برخوردارند، انتخاب و به‌کار گرفته شدند.

• پرسشنامه مسئولیت‌پذیری محیط زیستی

برای سنجش میزان احساس مسئولیت دانش‌آموزان نسبت به محیط زیست، از پرسشنامه مسئولیت‌پذیری محیط زیستی کاشمن (۲۰۱۵) استفاده شد. این ابزار شامل ۲۰ سؤال بود که ابعاد گوناگون رفتار مسئولانه محیط زیستی نظیر مشارکت در فعالیتهای محیط زیستی، مصرف آگاهانه منابع، تفکیک و کاهش زباله، استفاده بهینه از انرژی و رعایت اصول پایداری در زندگی روزمره را مورد ارزیابی قرار می‌داد. دامنه نمرات این پرسشنامه بین ۲۰ تا ۱۰۰ متغیر بود؛ به‌طوری‌که نمرات بالاتر نشان‌دهنده میزان بالاتر مسئولیت‌پذیری نسبت به محیط زیست تلقی می‌شدند.

این پرسشنامه شامل چهار مؤلفه اصلی است:

- ✓ رفتارهای فردی در قبال محیط زیست
- ✓ علاقه‌مندی به آموزش‌های محیط‌زیستی و افزایش آگاهی

✓ مشارکت در فعالیتهای محیط‌زیستی گروهی

✓ باور به اثرگذاری فردی در حفاظت از محیط زیست

دلیل انتخاب این پرسشنامه، جامعیت و توانایی آن در پوشش ابعاد مختلف مسئولیت‌پذیری محیط‌زیستی و همچنین اعتبار روان‌سنجی بالا در نمونه‌های مختلف است که آن را به ابزاری مناسب برای ارزیابی رفتار مسئولانه دانش‌آموزان تبدیل کرده است.

• پرسشنامه نگرش به محیط زیست

برای ارزیابی نگرش دانش‌آموزان نسبت به محیط زیست، از پرسشنامه نگرش محیط‌زیستی دونو، بویس و استنلی (2018) استفاده شد. این ابزار دارای 20 سؤال بود که به بررسی علاقه‌مندی به محیط زیست، میزان نگرانی نسبت به مسائل محیط‌زیستی و تمایل به مشارکت در فعالیتهای مرتبط با آن می‌پرداخت. نمرات این پرسشنامه در بازه‌ای بین 20 تا 100 قرار داشت و نمرات بالاتر نشان‌دهنده نگرش مثبت‌تر نسبت به محیط زیست بود.

پرسشنامه مذکور شامل چهار مؤلفه اصلی بود:

✓ ارزش‌ذاتی طبیعت و حقوق محیط‌زیست

✓ نگرانی نسبت به پیامدهای تخریب محیط‌زیست

✓ باور به مسئولیت اجتماعی و فردی در حفاظت از محیط‌زیست

✓ حمایت از قوانین و اقدامات محافظت از محیط‌زیست

دلیل انتخاب این پرسشنامه، پوشش جامع نگرش‌های محیط‌زیستی و سازگاری آن با سطح درک و تجربه دانش‌آموزان پایه پنجم است؛ همچنین سادگی اجرا و قابلیت سنجش دقیق نگرش‌های محیط‌زیستی آن، این ابزار را برای پژوهش حاضر مناسب ساخته است. در هر دو پرسشنامه مورد استفاده در این پژوهش، از مقیاس لیکرت پنج درجه‌ای برای پاسخ‌گویی استفاده شده است (Sarmad et al., 2021). در این مقیاس، پاسخ‌دهندگان میزان موافقت یا مخالفت خود را با هر گویه در پنج سطح مشخص بیان می‌کنند که شامل گزینه‌های: کاملاً مخالفم، مخالفم، نظری ندارم، موافقم و کاملاً موافقم است.

جدول 2- شیوه نمره‌گذاری به روش لیکرت
Table. 2 – Likert-scale scoring method

نمره	گزینه پاسخ‌دهی
1	کاملاً مخالفم
2	مخالفم
3	نظری ندارم
4	موافقم
5	کاملاً موافقم

برای تفسیر نمرات کل حاصل از دو پرسشنامه مورد استفاده در این پژوهش، از دسته‌بندی سه‌گانه در جدول 3، به صورت تقریبی استفاده شده است:

جدول 3- تفسیر نمرات
Table. 3 – Interpretation of Scores

نمره کل پرسشنامه	سطح متغیر مربوطه
20-46	سطح پایین
47-73	سطح متوسط
74-100	سطح بالا

برای ارزیابی روایی محتوایی پرسشنامه‌ها، از نظرات دو متخصص در حوزه علوم تربیتی استفاده شد که پس از بررسی دقیق مفاهیم، گویه‌ها و ساختار، همخوانی محتوا با اهداف پژوهش را تأیید کردند. پایایی پرسشنامه‌ها با ضریب آلفای کرونباخ سنجیده شد که مقادیر ۰.۸۷ برای مسئولیت‌پذیری محیط زیستی و ۰.۸۳ برای نگرش به محیط زیست بدست آمد که هر دو مقدار نشان‌دهنده پایایی مطلوب و قابل قبول ابزارها هستند.

مراحل اجرای پژوهش

پس از تعیین نمونه‌ها و تقسیم آن‌ها به دو گروه آزمایش و کنترل، پیش‌آزمون‌های مربوط به متغیرهای وابسته پژوهش (مسئولیت‌پذیری و نگرش محیط زیستی) در هر دو گروه به‌طور هم‌زمان اجرا شد تا سطح اولیه این متغیرها پیش از مداخله مشخص گردد. در ادامه، مداخله آموزشی مبتنی بر آموزش اخلاق محیط زیستی به روش پروژه در طی ۸ هفته متوالی به صورت هفته‌ای یک جلسه‌ی ۴۵ دقیقه‌ای، برای گروه آزمایش اجرا شد. این جلسات شامل فعالیت‌های عملی، مشارکتی و پروژه‌محور بود و به‌گونه‌ای طراحی شده بود تا مسئولیت‌پذیری و نگرش مثبت نسبت به محیط زیست را در دانش‌آموزان تقویت نماید. در این مدت، گروه کنترل هیچ‌گونه آموزشی در زمینه اخلاق محیط زیستی دریافت نکرد. پس از اتمام دوره آموزشی، پس‌آزمون در هر دو گروه اجرا گردید تا تغییرات احتمالی در متغیرهای پژوهش مورد سنجش قرار گیرد. در پایان، برای تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از پیش‌آزمون و پس‌آزمون از نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

نتایج

به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها از روش‌های آمار توصیفی و استنباطی با نرم افزار spss استفاده شد. به منظور آزمون فرضیات تحقیق از آزمون کوواریانس و آزمون تی مستقل استفاده شد. همچنین برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کلموگروف اسمیرنوف استفاده شده است.

در جدول ۴ میانگین و انحراف معیار نمرات متغیر نگرش محیط زیستی و مسئولیت‌پذیری محیط زیستی به تفکیک گروه آزمایش و گواه به نمایش گذاشته شده است.

جدول ۴- میانگین و انحراف معیار نمرات متغیر نگرش محیط زیستی و مسئولیت‌پذیری محیط زیستی به تفکیک گروه آزمایش و گواه
Table 4 – The mean and standard deviation of the scores for the Environmental Attitude and Environmental Responsibility variables, disaggregated by the experimental and control groups.

متغیر	مراحل	گروه آزمایش		گروه کنترل	
		میانگین (M)	انحراف معیار (SD)	میانگین (M)	انحراف معیار (SD)
نگرش محیط زیستی	پیش آزمون	59/26	3/92	58/23	3/33
	پس آزمون	71/60	4/33	59/73	3/87
مسئولیت‌پذیری محیط زیستی	پیش آزمون	62/56	3/96	59/80	3/92
	پس آزمون	76/20	3/59	60/56	4/01

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، میانگین و انحراف معیار نمرات نگرش محیط زیستی در گروه آزمایش پیش‌آزمون (59.26 و 3.92) و پس‌آزمون (71.60 و 4.33) و در گروه کنترل پیش‌آزمون (58.23 و 3.33) و پس‌آزمون (59.73 و 3.87) است. در متغیر مسئولیت‌پذیری محیط زیستی، میانگین و انحراف معیار گروه آزمایش در پیش‌آزمون (62.56 و 3.96) و پس‌آزمون (76.20 و 3.59)

و در گروه کنترل پیش‌آزمون (59.80 و 3.92) و پس‌آزمون (60.56 و 4.01) است. این آمار توصیفی نشان‌دهنده افزایش قابل توجه نمرات در گروه آزمایش پس از مداخله است، در حالی که تغییرات در گروه کنترل محدود بوده است.

به منظور بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف استفاده شد. در جدول 5 نتایج حاصل از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف نمایش داده شده است.

جدول ۵- آزمون کلموگروف- اسمیرنوف جهت ارزیابی نرمال بودن توزیع نمرات متغیرهای تحقیق

Table 5 – The Kolmogorov-Smirnov test for assessing the normality of the distribution of scores for the research variables

متغیر	مراحل	آماره	سطح معناداری
نگرش محیط زیستی	پیش آزمون	0/103	0/075
	پس آزمون	0/110	0/066
مسئولیت پذیری محیط زیستی	پیش آزمون	0/089	0/200
	پس آزمون	0/102	0/064

همان‌طور که در جدول 5 مشاهده شد سطح معناداری در تمامی متغیرها بالاتر از سطح معناداری 0/05 است. بنابراین داده‌ها نرمال هستند.

برای بررسی مقایسه دو گروه کنترل و آزمایش در مرحله پس‌آزمون از آزمون تی مستقل (جدول 6) استفاده شده است.

جدول ۶- نتایج آزمون تی مستقل متغیرهای نگرش محیط زیستی و مسئولیت پذیری محیط زیستی در پس‌آزمون

Table 6 - The results of the independent samples t-test for the environmental attitude and environmental responsibility variables in the post-test

متغیر	مقدار واریانس	سطح معناداری	مقدار آماره تی	درجه آزادی	سطح معناداری
نگرش محیط زیستی	0/470	0/496	-11/175	58	0/001
مسئولیت پذیری محیط زیستی	0/237	0/629	-15/890	58	0/001

یکی از پیش فرض‌های آزمون تی مستقل برابری واریانس است. براساس جدول 6، در متغیر نگرش محیط زیستی مقدار واریانس 0/470 و سطح معناداری 0/496 و در متغیر مسئولیت پذیری محیط زیستی مقدار واریانس 0/237 و سطح معناداری 0/629 است که سطح معناداری بالاتر از مقدار سطح معناداری 0/05 است، بنابراین پیش فرض برابری واریانس رعایت شده است. در متغیر نگرش محیط زیستی مقدار تی -11/175 و سطح معناداری 0/001 و در متغیر مسئولیت پذیری محیط زیستی مقدار تی -15/890 و سطح معناداری 0/001 است در هر دو متغیر نگرش محیط زیستی و مسئولیت پذیری محیط زیستی سطح معناداری کمتر از 0/05 است، بنابراین در پس‌آزمون در این دو متغیر بین گروه کنترل و آزمایش تفاوت معناداری وجود دارد.

در ادامه از تحلیل کوواریانس برای مقایسه نمرات پس‌آزمون دو گروه (کنترل و آزمایش) با کنترل تأثیر نمرات پیش‌آزمون استفاده شد. در جدول 7 همگنی شیب‌های رگرسیون بررسی شده است.

جدول ۷- همگنی شیب‌های رگرسیون در متغیرهای نگرش محیط زیستی و مسئولیت پذیری محیط زیستی

Table 7 - Homogeneity of regression slopes in the variables of environmental attitude and environmental responsibility

متغیر	F	معناداری
نگرش محیط زیستی	2/817	0/112
مسئولیت پذیری محیط زیستی	0/697	0/502

با توجه به جدول فوق مقدار سطح معناداری بالاتر 0/05 است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت پیش فرض همگونی شیب رگرسیون رعایت شده است.

با استفاده آزمون لوین برابری واریانس‌ها، در دو گروه مورد بررسی قرار گرفت که در جدول 8 نتایج آزمون لوین را نشان داده شده است.

جدول ۸- آزمون برابری واریانس‌های لوین نمرات متغیر نگرش محیط زیستی و مسئولیت پذیری محیط زیستی

Table 8- Levene's Test for Equality of Variances for the Scores of the Environmental Attitude and Environmental Responsibility Variables

متغیر	F	df 1	df 2	معناداری
نگرش محیط زیستی	0/185	1	58	0/668
مسئولیت پذیری محیط زیستی	0/325	1	58	0/571

در جدول 8، نتایج نشان می‌دهد که آزمون F برای هیچ یک از متغیرها معنادار نیست و سطح معناداری برای متغیرهای ادراک درد و تحمل پریشانی از سطح معناداری 0/05 فراتر است ($p > 0.05$)، که حاکی از رعایت پیش فرض برابری واریانس‌ها بین گروه‌ها است. در ادامه، برای بررسی پیش فرض همگنی ماتریس کوواریانس گروه‌ها، از آزمون باکس (جدول 9) استفاده شده است.

جدول ۹- نتایج آزمون همگونی واریانس‌ها

Table 9- Results of the homogeneity of variances test

آزمون باکس	1/537
تحلیل واریانس	0/493
درجه آزادی 1	3
درجه آزادی 2	605520/00
سطح معناداری	0/687

همان‌طور که نتایج جدول 9 نشان می‌دهد ($p > 0/05$ و $F = 0/493$)، سطح معناداری بالاتر از 0/05 است و پیش فرض همگونی واریانس‌ها رعایت شده است. چهار آزمون متغیری در نرم افزارهای آماری به کار می‌روند که عبارتند از: آزمون پیلای، لامبدای ویکلز، اثر هتلینگ و بزرگترین ریشه وری است. با توجه به نتایج آزمون M باکس، برای ارزیابی اثر چند متغیری از آزمون اثر پیلای استفاده شد. نتایج آزمون‌های چند متغیری در جدول 10 آمده است.

جدول 10- نتایج تحلیل کوواریانس چند متغیری روی نمرات متغیرهای نگرش محیط زیستی و مسئولیت پذیری محیط زیستی

Table 10- Results of the multivariate analysis of covariance (MANCOVA) on the scores of environmental attitude and environmental responsibility variables

نام آزمون	مقدار	F	درجه آزادی	خطای درجه آزادی	سطح معناداری
اثر پیلای	0/831	135/113	2/00	55/00	0/001
لامبدای ویکلز	0/169	135/113	2/00	55/00	0/001
اثر هتلینگ	4/913	135/113	2/00	55/00	0/001
بزرگترین ریشه خطا	4/913	135/113	2/00	55/00	0/001

جدول فوق نتایج حاصل از تحلیل کوواریانس چند متغیره بر روی تفاضل نمرات نگرش محیط زیستی و مسئولیت پذیری محیط زیستی را در دو گروه نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول 10 مشاهده می‌شود که در تمام آزمون سطح معناداری کوچکتر از 0/05 است، بیانگر این است که بین گروه‌های آزمایش و کنترل، حداقل در یکی از متغیرهای وابسته با هم تفاوت معناداری دارند. برای پی بردن به این تفاوت تحلیل کوواریانس چند متغیره انجام گرفت که نتایج حاصل از آن در جدول شماره 11 درج شده است.

جدول 11- نتایج آزمون تحلیل کوواریانس چند متغیره نمرات متغیرها در گروه آزمایش و کنترل

Table 11- Multivariate Analysis of Covariance (MANCOVA) results for variable scores in the experimental and control groups

متغیر	مجموع مجذورات	درجه آزادی	میانگین مجذورات	F	سطح معناداری	مجذورات
نگرش محیط زیستی	1991/689	1	1991/689	118/099	0/001	0/678
مسئولیت پذیری محیط زیستی	3118/766	1	3118/766	210/132	0/001	0/790

نتایج مندرج در جدول 11 نشان می‌دهد که در متغیر نگرش محیط زیستی بین دو گروه آزمایش و کنترل تفاوت معناداری وجود دارد ($F = 118/099$ و $p < 0/05$). میزان تاثیر برابر با 0/678 است. یعنی حدود 67 درصد از تفاوت‌های فردی در نمره‌های پس آزمون متغیر نگرش محیط زیستی ناشی از اثربخشی آموزش اخلاق محیط زیستی به روش پروژه محور است. در متغیر مسئولیت پذیری محیط زیستی بین دو گروه آزمایش و کنترل تفاوت معناداری وجود دارد ($F = 210/132$ و $p < 0/05$). میزان تاثیر برابر با 0/790 است. یعنی حدود 79 درصد از تفاوت‌های فردی در نمره‌های پس آزمون متغیر مسئولیت پذیری ناشی از اثربخشی آموزش اخلاق محیط زیستی به روش پروژه محور است. بنابراین آموزش اخلاق محیط زیستی به روش پروژه محور بر نگرش محیط زیستی و مسئولیت پذیری محیط زیستی دانش آموزان پایه پنجم دبستان اثربخش است.

بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش، هدف بررسی اثربخشی آموزش اخلاق محیط زیستی به روش پروژه محور بر نگرش و مسئولیت‌پذیری محیط زیستی دانش‌آموزان پایه پنجم بود. نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها نشان داد که اجرای این نوع آموزش توانسته است تأثیر معناداری بر بهبود

نگرش و ارتقای سطح مسئولیت‌پذیری دانش‌آموزان در ارتباط با مسائل محیط‌زیست داشته باشد. شرکت‌کنندگان در گروه آزمایش پس از گذراندن جلسات آموزشی، دیدگاه‌های مثبت‌تری نسبت به ارزش طبیعت، پیامدهای تخریب محیط‌زیست و ضرورت ایفای نقش فعال در حفاظت از آن پیدا کردند. همچنین، تغییرات مشاهده‌شده حاکی از آن بود که آموزش پروژه‌محور سبب افزایش حساسیت دانش‌آموزان نسبت به مسائل محیطی و تقویت باور آنان به توانایی فردی برای ایجاد تغییرات مثبت در این حوزه شده است.

نتایج تحلیل کوواریانس چندمتغیره نشان داد که آموزش اخلاق محیط زیستی به روش پروژه‌محور به طور معناداری نگرش محیط زیستی ($\eta^2=0.678$, $F=118.099$) و مسئولیت‌پذیری محیط زیستی ($\eta^2=0.790$, $F=210.132$) را در گروه آزمایش بهبود بخشید ($0.001 < p$). میانگین نمرات نگرش محیط زیستی در گروه آزمایش از 59.26 در پیش‌آزمون به 71.60 در پس‌آزمون افزایش یافت، در حالی که در گروه کنترل تغییر ناچیزی (از 58.23 به 59.80) مشاهده شد. به طور مشابه، مسئولیت‌پذیری محیط زیستی در گروه آزمایش از 62.56 به 76.20 افزایش یافت، در مقابل تغییرات جزئی در گروه کنترل (از 59.73 به 60.56). این یافته‌ها حاکی از آن است که مداخله آموزشی حدود 67.8٪ و 79٪ از واریانس تغییرات در نگرش و مسئولیت‌پذیری را توجیه می‌کند.

این نتایج با مطالعات پیشین همخوانی دارد. برای مثال، ارتباط مثبت بین دانش محیط زیستی، نگرش و رفتار با توسعه اخلاق محیط زیستی در دانش‌آموزان، که Feili و همکاران (2022) گزارش کرده‌اند، با افزایش نگرش مثبت در گروه آزمایش پژوهش حاضر همسو است. همچنین، اثربخشی آموزش محیط زیستی بر نگرش و آگاهی دانش‌آموزان، همان‌طور که Asgaripoor و همکاران (2020) نشان داده‌اند، تأیید می‌کند که رویکردهای عملی مانند روش پروژه می‌تواند تغییرات پایدار ایجاد کند. از سوی دیگر، مطالعه Sandbrook و همکاران (2019) بر تنوع دیدگاه‌های حفاظتی در جنبش جهانی حفاظت تأکید دارد که با تمرکز پژوهش حاضر بر ادغام ارزش‌های ذاتی طبیعت در آموزش اخلاقی همخوانی دارد. Altassan (2023) نیز چارچوبی برای ادغام پایدار انرژی خورشیدی، تغییر رفتار و بازیافت در نهادهای آموزشی ارائه می‌دهد که با فعالیت‌های پروژه‌محور در این پژوهش برای تقویت رفتارهای مسئولانه محیط زیستی سازگار است. Afzal Khani (2020) اثرات آموزش محیط زیستی بر نگرش و رفتار دانش‌آموزان در گرمسار را بررسی کرده و نتایج مشابهی مبنی بر بهبود تعهد فردی و اجتماعی گزارش می‌کند. Soleimani و همکاران (2019) با رویکرد نظریه بنیانی، مدلی برای توسعه مدارس طبیعت در ایران پیشنهاد می‌کنند که با تأکید بر تجربیات عملی در پژوهش حاضر همراستا است. در نهایت، Suarlin (2023) ادغام آموزش محیط زیستی برای شکل‌گیری شخصیت‌های مراقب محیط زیست در مدارس را بررسی کرده که با نتایج پژوهش حاضر در تقویت نگرش و مسئولیت‌پذیری از طریق روش پروژه همخوانی دارد.

از منظر نظری، نتایج را می‌توان با رویکرد سازنده‌گرایی و یادگیری اجتماعی تبیین کرد. روش پروژه‌محور، با تأکید بر تجربیات عملی مانند پاکسازی محله و تفکیک زباله، دانش‌آموزان را از دریافت‌کنندگان منفعل به سازندگان فعال دانش تبدیل کرد و مؤلفه‌های شناختی، عاطفی و رفتاری نگرش را تقویت نمود. این فرآیند، همسو با نظریه یادگیری اجتماعی بندورا، خودکارآمدی را از طریق مشاهده نتایج اقدامات افزایش داد. همچنین، رویکرد بوم‌محور در طراحی پروژه‌ها، دانش‌آموزان را به دیدن خود به عنوان بخشی از اکوسیستم تشویق کرد و ارزش ذاتی طبیعت را نهادینه ساخت. در نتیجه، آموزش اخلاق محیط زیستی به روش پروژه‌محور نه تنها آگاهی را افزایش داد، بلکه تغییرات پایدار در نگرش و رفتار ایجاد کرد و دانش‌آموزان را به شهروندان مسئول تبدیل نمود. این یافته‌ها بر لزوم ادغام رویکردهای عملی در برنامه‌های آموزشی تأکید دارد. یکی از جنبه‌های مهم نتایج این پژوهش آن بود که دانش‌آموزان نه تنها در سطح شناختی، بلکه در سطح عاطفی و رفتاری نیز پیشرفت قابل‌توجهی نشان دادند. در جریان این آموزش، دانش‌آموزان از طریق فعالیت‌های عملی و مشارکتی، تجربه‌های واقعی از مسئولیت‌پذیری محیط زیستی به دست آوردند. این تجربه‌ها باعث شد که نگرش آنان از یک رویکرد صرفاً نظری به یک دیدگاه عملی و کاربردی تبدیل شود. به عبارت دیگر، آنان آموختند که حفاظت از محیط‌زیست تنها یک مفهوم ذهنی یا آموزشی نیست، بلکه رفتاری است که می‌توان و باید در زندگی روزمره به کار بست.

همچنین، یافته‌ها بیانگر آن است که روش پروژه محور با فراهم کردن فرصت برای فعالیت‌های گروهی و تشویق به همکاری، نقش مهمی در ایجاد حس تعلق و مسئولیت مشترک ایفا کرده است. در این فرایند، دانش‌آموزان یاد گرفتند که مسائل محیط زیستی تنها با تلاش فردی حل نمی‌شوند، بلکه نیازمند همیاری و مشارکت جمعی هستند. این موضوع به آنان کمک کرد تا علاوه بر توجه به وظایف فردی، به نقش و جایگاه خود در جامعه نیز آگاه شوند. در بعد نگرشی، آموزش ارائه شده توانست موجب شکل‌گیری درکی عمیق‌تر از اهمیت محیط‌زیست شود و ارزش‌های اخلاقی مرتبط با آن را در ذهن دانش‌آموزان نهادینه کند. این تحول نگرشی نه تنها در قالب افزایش آگاهی بروز یافت، بلکه در تقویت انگیزه برای اقدام و تغییر رفتار نیز مؤثر بود. به این ترتیب، می‌توان گفت که رویکرد پروژه محور با ایجاد پیوند میان دانش، احساس و عمل، زمینه را برای پرورش شهروندانی آگاه و مسئول فراهم می‌سازد.

به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که آموزش اخلاق محیط زیستی به روش پروژه محور توانسته است فراتر از یک آموزش تئوریک عمل کند و در عمل تغییراتی پایدار در نگرش و رفتار دانش‌آموزان ایجاد نماید. این یافته‌ها بیانگر آن است که چنین رویکردی می‌تواند به عنوان مدلی اثربخش برای آموزش محیط‌زیست در مدارس ابتدایی مورد استفاده قرار گیرد. این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که ترکیب تجربه‌های عملی با مفاهیم نظری، اثربخشی آموزش را دوچندان کرده و باعث می‌شود که دانش‌آموزان به طور فعال و داوطلبانه در فرآیند یادگیری و حفاظت از محیط‌زیست مشارکت داشته باشند. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که آموزش مبتنی بر پروژه نه تنها در ارتقای آگاهی محیط زیستی مؤثر است، بلکه به تقویت روحیه مسئولیت‌پذیری فردی و اجتماعی نیز منجر می‌شود. این امر گام مهمی در جهت تربیت نسل آینده‌ای است که قادر به درک چالش‌های محیط‌زیستی و ایفای نقش مؤثر در حفظ و بهبود شرایط محیط زیستی جامعه خواهد بود.

پیشنهادهات

براساس نتایج حاصل پیشنهادهای زیر ارائه می‌گردد:

- تلفیق مفاهیم محیط زیستی با محتوای درسی علوم و سایر دروس برای ایجاد نگرش مثبت و پایدار در دانش‌آموزان نسبت به اهمیت حفاظت از محیط زیست.
- استفاده از بازدیدهای میدانی (مانند بازدید از پارک‌ها، باغ‌موزه‌های طبیعی یا مراکز بازیافت) برای تقویت ارزش‌گذاری نسبت به طبیعت و افزایش حساسیت نسبت به پیامدهای تخریب محیط زیست.
- بهره‌گیری از روش‌های خلاقانه همچون داستان‌نویسی، نقاشی، نمایش یا بازی‌های آموزشی برای تقویت ابعاد عاطفی نگرش محیط زیستی در دانش‌آموزان.
- فراهم آوردن فرصت‌های مشارکت در برنامه‌های مدرسه‌ای یا اجتماعی (مانند روز درختکاری یا کمپین‌های جمع‌آوری زباله) به منظور تقویت باور به مسئولیت اجتماعی و احساس تعهد در قبال محیط زیست.
- طراحی و اجرای برنامه‌های آموزشی پروژه محور در مدارس ابتدایی برای تقویت رفتارهای فردی مسئولانه مانند صرفه‌جویی در مصرف آب و انرژی، رعایت بهداشت محیط مدرسه و مدیریت پسماند.
- برگزاری کارگاه‌ها و نمایشگاه‌های دانش‌آموزی درون مدرسه‌ای با محوریت پروژه‌های محیط زیستی (مانند ساخت کاردستی از مواد بازیافتی یا طراحی پوسترهای محیط زیستی) برای نهادینه‌سازی رفتارهای پایدار.
- جلب مشارکت والدین در فعالیت‌های پروژه‌های دانش‌آموزان تا انتقال ارزش‌ها و رفتارهای محیط زیستی به محیط خانواده نیز گسترش یابد و پایداری اثرات آموزشی تضمین شود.

Extended Abstract

Introduction: The escalating environmental crises, including pollution and climate change, pose significant threats to human survival, largely stemming from a shift in human attitudes toward nature as a consumable resource. Transforming the environmental attitudes of future generations through education is deemed the most effective strategy to address these challenges. Early education, particularly in schools, plays a pivotal role in fostering sustainable attitudes by embedding ethical values, respect, and responsibility toward nature in children and adolescents. This study focuses on evaluating the effectiveness of project-based learning as an innovative educational approach to enhance pro-environmental attitudes and responsibility among fifth-grade male students in District 3 of Isfahan, Iran.

Materials and methods: This applied research adopted a quasi-experimental design with a pre-test-post-test control group framework. The target population comprised all fifth-grade male students in District 3 of Isfahan's education system. Using a multi-stage cluster sampling method, one school was randomly selected, followed by the random assignment of two classes into experimental ($n=30$) and control ($n=30$) groups. Data were collected using validated questionnaires: the Environmental Responsibility Questionnaire by Kashman (2015) and the Environmental Attitude Questionnaire by Donovan, Boyce, and Stanley (2018), both employing a five-point Likert scale. The experimental group underwent an 8-week project-based learning intervention, consisting of weekly 45-minute sessions focused on environmental ethics, while the control group received no such training. Pre- and post-tests assessed changes in environmental attitudes and responsibility, analyzed using multivariate analysis of covariance (MANCOVA).

Results: The results indicated significant improvements in the experimental group. The mean environmental attitude score increased from 59.26 in the pre-test to 71.60 in the post-test, compared to a minor change from 58.23 to 59.80 in the control group ($F=118.099$, $p<0.001$, $\eta^2=0.678$). Similarly, the environmental responsibility score rose from 62.56 to 76.20 in the experimental group, versus a slight increase from 59.73 to 60.56 in the control group ($F=210.132$, $p<0.001$, $\eta^2=0.790$). These findings suggest that the intervention accounted for 67.8% and 79% of the variance in attitude and responsibility scores, respectively.

Discussion and Conclusion: The findings align with the notion that project-based learning, by integrating experiential and emotional elements, enhances the internalization of environmental ethics and fosters sustainable behaviors. The approach supports constructivist and social learning theories, enabling students to actively construct knowledge and develop self-efficacy through practical engagement. The study confirms that such methods can transform students into responsible citizens, bridging the gap between theoretical education and practical application. However, limitations include the focus on a specific grade, content domain, geographic area, and lack of longitudinal follow-up. Future research should explore long-term effects, diverse educational levels, and cultural variations. Practical recommendations include integrating environmental concepts into curricula, organizing field visits, and encouraging parental involvement in project activities to sustain educational impacts.

Keywords: Environmental education, project-based learning, environmental attitudes, responsibility, fifth-grade students, Iran.

References

- Feili, A., Alipour, S., Sabet, M. R., & SABET, A. (2022). The Relationship between Environmental Knowledge, Attitude and Behavior with the Development of Environmental Ethics. *Ethics in Science and Technology*; 16 (4) :81-89 [In Persian]
- Asgaripoor, A., Amiri, M. J., & Rahimi, S. (2020). Evaluation of Environmental Education Effectiveness on Environmental Attitude and Awareness of Students. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(4 (95)), 315-326. [In Persian]
- Sandbrook, C., Fisher, J. A., Holmes, G., Luque-Lora, R., & Keane, A. (2019). The global conservation movement is diverse but not divided. *Nature Sustainability*, 2(4), 316-323.
- Altassan, A. (2023). Sustainable integration of solar energy, behavior change, and recycling practices in educational institutions: a holistic framework for environmental conservation and quality education. *Sustainability*, 15(20), 15157.
- Afzal Khani, M. (2020). The Effect of Environmental Education on Students' Attitude and Behavior toward Environmental Protection in Garmsar. *Geography (Regional Planning)*, 9(37), 57-78.
- soleimani, F. , Soleimani, N. , Jamali, A. and Shabannejad Khas, R. (2019). A Model Representation with Grounded Theory approach for Nature Schools Development in Iran. *School Administration*, 7(3), 123-103. doi: 10.34785/J010.1398.252
- Suarlin, S. (2023). Integrating environmental education to form environmental care characters in schools. *Advances in Community Services Research*, 1(2), 44-53.
- Wilson, E. O. (2022). *The future of life*. Vintage.
- Vladova, I. (2023). Towards a more sustainable future: The importance of environmental education in developing attitudes towards environmental protection. In *SHS web of conferences* (Vol. 176, p. 01009). EDP Sciences.
- Abolhassani, N., Sayyadi, M. H., & Doosti, M. R. (2012). Investigating the Role of Education in Promoting Environmental Ethics and Culture. In *Proceedings of the Second Conference on Environmental Planning and Management*, Tehran, Iran.
- Darling-Hammond, L., Schachner, A. C., Wojcikiewicz, S. K., & Flook, L. (2024). Educating teachers to enact the science of learning and development. *Applied Developmental Science*, 28(1), 1-21.
- Hosseini Rad, M., & Rahmaty, Z. (2022). Students', environmental education: Efficacy of new and practical teaching methods. *Research In Biology Education*, 4(1 (10)), 51-64. SID. <https://sid.ir/paper/1061750/en>
- Krajcik, J., Schneider, B., Miller, E. A., Chen, I. C., Bradford, L., Baker, Q., ... & Peek-Brown, D. (2023). Assessing the effect of project-based learning on science learning in elementary schools. *American Educational Research Journal*, 60(1), 70-102.
- Qaedi, A., & Talebi, S. (2018). The relationship between subjective norms, behavioral control, attitudes, knowledge, and environmental values of students with their environmental behaviors. In *Proceedings of the Fifth National Conference on Modern Research in Humanities and Social Studies of Iran*, Tehran, Iran.
- Qajanti Far, B. R., Goldizadeh Jaran Moradi, A., & Parseh, M. S. (2025). The impact of educational programs on enhancing environmental awareness. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Educational Sciences, Counseling, Psychology, and Social Sciences, Hamadan, Iran*. <https://civilica.com/doc/2373915>
- Uzorka, A., Akiyode, O., & Isa, S. M. (2024). Strategies for engaging students in sustainability initiatives and fostering a sense of ownership and responsibility towards sustainable development. *Discover Sustainability*, 5(1), 320.
- Sarmad, Z., Bazargan, A., & Hejazi, E. (1400). *Research methods in behavioral sciences*. Tehran: Agah Publications.



Journal of Environmental
Management and Law

فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست

<https://sanad.iau.ir/en/Journal/jeml>

Risk assessment of exposure to air pollutants in large-scale outdoor sports spaces in Tehran

Rasoul Sadeghi¹, Hooman Bahmanpour^{2*}, Farham Aminsharei³

¹ MSc. on HSE, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

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

³ Department of Safety, Health and Environment Engineering, NA.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran

*Corresponding Author: hbahmanpour@iau.ac.ir

Original Paper

Abstract

Received: 2024.11.04

Accepted: 2025.04.30

Keywords:

Exposure risk
assessment,
carcinogenicity,
sports spaces,
nitrogen dioxide,
sulfur dioxide.

Identifying the effects and assessing the risk of exposure to air pollutants such as nitrogen dioxide (NO₂) and sulfur dioxide (SO₂) in sports spaces, especially outdoor sports spaces, is very important in order to reduce the effects of exposure and investigate the carcinogenic and non-carcinogenic risks of these pollutants. This article aims to identify the effects and assess the risk of exposure to these pollutants in large-scale outdoor sports spaces, specifically the Tehran Revolution Club. This research is of an applied type and the data collection method was library-based and direct data collection through the Tehran Air Quality Control Company database. The study period was determined for one year from June 2024 to June 2025. Data related to the concentration of the pollutants under study were obtained from stations in neighboring areas and adjusted using the mathematical averaging method. Then, based on the average measured values of nitrogen dioxide and sulfur dioxide in different seasons of the year, the average daily exposure dose values of these pollutants were calculated for the two age groups of children and adults and from the respiratory, digestive and dermal absorption routes. In the next step, based on the risk assessment formulas provided by the US Environmental Protection Agency (2014), the non-carcinogenic and carcinogenic risk index for these pollutants was obtained. The cumulative non-carcinogenic risk index of exposure to nitrogen dioxide was 2.13×10^{-5} for children and 2.29×10^{-9} for adults. Also, this index was calculated for sulfur dioxide and for children and 4.01×10^{-6} and 2.15×10^{-7} for adults. In the risk assessment for both age groups of children and adults, the amount of digestive exposure was higher than respiratory and dermal absorption. Due to the fact that the hazard index and the cumulative non-carcinogenic hazard index are smaller than one, there is no significant risk from exposure to nitrogen dioxide and sulfur dioxide. There was no carcinogenic or non-carcinogenic risk from exposure to sulfur dioxide and nitrogen dioxide pollutants at the study site.



Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the

ارزیابی ریسک مواجهه با آلاینده‌های هوا در فضاهای ورزشی بزرگ مقیاس روباز در شهر تهران

رسول صادقی¹، هومن بهمن‌پور^{2*}، فرهام امین‌شرعی³

1- کارشناس ارشد مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست (HSE)، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

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

3- استادیار مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست (HSE)، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hbahmanpour@iau.ac.ir

نوع مقاله:	چکیده
علمی-پژوهشی	شناسایی اثرات و ارزیابی ریسک مواجهه با آلاینده‌های هوا نظیر دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) و دی‌اکسید گوگرد (SO_2) در فضاهای ورزشی به‌ویژه فضاهای ورزشی روباز به جهت کاهش اثرات مواجهه و بررسی ریسک‌های سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی بودن این آلاینده‌ها، بسیار مهم است. این مقاله با هدف شناسایی اثرات و ارزیابی ریسک مواجهه با این آلاینده‌ها در فضاهای ورزشی بزرگ مقیاس روباز و اختصاصاً باشگاه انقلاب تهران انجام شده است. این تحقیق از نوع کاربردی بوده و روش گردآوری داده‌ها از نوع کتابخانه‌ای و برداشت مستقیم داده‌ها از طریق بانک داده شرکت کنترل کیفیت هوای تهران بوده است. بازه زمانی مورد مطالعه به مدت یک سال از خرداد ماه سال 1403 تا خرداد سال 1404 تعیین شد. داده‌های مربوط به غلظت آلاینده‌های مورد مطالعه، از ایستگاه‌های مناطق همجوار اخذ و با روش میانگین‌گیری ریاضی تطبیق داده شدند. سپس، براساس متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد در فصول مختلف سال، مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه این آلاینده‌ها برای دو گروه سنی کودکان و بزرگسالان و از مسیرهای تنفسی، گوارش و جذب پوستی محاسبه شد. در مرحله بعد براساس فرمول‌های ارزیابی ریسک ارائه شده توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (2014)، شاخص خطر غیرسرطان‌زایی و سرطان‌زایی برای این آلاینده‌ها بدست آمد. شاخص خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی مواجهه با دی‌اکسید نیتروژن برای کودکان $10^{-5} \times 2/13$ و برای بزرگسالان $10^{-6} \times 2/29$ بوده است. همچنین این شاخص برای دی‌اکسید گوگرد و در مورد کودکان $10^{-6} \times 4/01$ و برای بزرگسالان $10^{-7} \times 2/15$ محاسبه شد. در ارزیابی ریسک برای هر دو گروه سنی کودک و بزرگسال، میزان مواجهه گوارشی بیشتر از تنفسی و جذب پوستی بوده است. به علت کوچک‌تر بودن شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی از عدد یک، هیچ خطر مهمی در مواجهه با دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد، وجود ندارد. در سایت مطالعاتی هیچ‌گونه خطر سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی در مواجهه با آلاینده دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن وجود نداشته است.
تاریخچه مقاله:	
ارسال: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴	
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰	
کلمات کلیدی:	
ارزیابی ریسک مواجهه، سرطان‌زایی، فضاهای ورزشی، دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد.	

مقدمه

آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین عواملی است که کیفیت زندگی انسان را تحت تأثیر قرار می‌دهد و اثرات سوئی بر سلامت انسان می‌گذارد. این اثرات باعث تغییرات بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی در بدن می‌گردند که در نهایت به بیماری شدید و حتی مرگ منتهی می‌شود (Amesano et al., 2016). زندگی در هوای آلوده و انجام فعالیت‌های روزمره و فعالیت‌های ورزشی نگرانی‌های زیادی را برای افراد در معرض آلودگی هوا ایجاد کرده است (Fashi, 2023). در سال ۲۰۱۳ آلودگی هوا و ذرات معلق به عنوان ترکیبات سرطان‌زای درجه ۱ برای انسان طبقه‌بندی شده‌اند (International Agency for Research on Cancer, 2013). آلودگی هوا چهارمین عامل خطر برای مرگ منتسب در دنیا و همچنین هفتمین عامل خطر در ایران است. طبق بررسی‌های انجام شده توسط سازمان بهداشت جهانی، هر سال در اثر آلودگی هوا بیش از چهار میلیون نفر دچار مرگ زودرس می‌شوند (WHO, 2017). بر اساس گزارش بانک جهانی، خطراتی که آلودگی هوا بر سلامت می‌تواند داشته باشد در کشورهای در حال توسعه بیشترین میزان است (W.B.Reports, 2015). فعالیت‌های صنعتی مهم‌ترین علت انتشار آلاینده‌ها به محیط‌زیست هستند و این مسئله پیامدهای مختلفی را به زندگی انسان‌ها تحمیل می‌نماید. یکی از اصلی‌ترین پیامدها، مواجهه گروه‌های مختلف جامعه با انواع آلاینده‌های محیطی است که در دهه‌های اخیر به یکی از دغدغه‌های اصلی جوامع بشری تبدیل شده است. مواجهه انسان با آلاینده‌های محیطی اثرات بهداشتی متعددی را در بردارد. الگوی مواجهه افراد با آلاینده‌های محیطی بسیار متفاوت و وابسته به فرهنگ و عملکرد آن‌ها در جامعه است (Zare Jeddi et al., 2015).

امروزه ورزش در تأمین بهداشت و سلامتی جسمی و روحی انسان‌ها بسیار مؤثر است. بقرط ورزش را بخش تفکیک‌ناپذیر موضوع سلامت و تندرستی می‌دانند. یافته‌های علمی حاکی از آن است که انجام فعالیت‌های ورزشی در پیشگیری از انواع بیماری‌ها مؤثر است و هجوم بیماری‌های حاد در دوران پیری را به تأخیر می‌اندازد. بنابراین ورزش و فعالیت‌های بدنی هر روز اهمیت بیشتری می‌یابد و نقش مهمی در برقراری و حفظ سلامت افراد، ایجاد می‌کند (Hosseinpour et al., 2018). ورزشکاران به دلیل تحرک بالا، بیش از افراد عادی آلاینده‌ها را وارد بدن خود می‌کنند. به طوری که خستگی زود هنگام بسیاری از ورزشکاران، ناشی از ورود آلاینده‌ها به جای اکسیژن به دستگاه تنفسی آن‌ها است (Mohaghegh & Hajian, 2013; Florida-James et al., 2004). ورزشکاران به دلیل تحرک بالا، بیش از افراد عادی، آلاینده‌ها را وارد بدن خود می‌کنند و خستگی زود هنگام بسیاری از ورزشکاران ناشی از ورود آلاینده‌ها به جای اکسیژن به دستگاه تنفسی آن‌ها است (Lippi et al., 2008).

تهران شهری است که با مشکلات محیط‌زیستی آلودگی هوا روبه‌روست. از عوامل طبیعی مؤثر در ایجاد این مسئله می‌توان به احاطه شدن شهر با کوه‌ها، نبود بادهای مداوم با سرعت مناسب و بارش کم، اشاره کرد (Noorpoor & Sadri Jahanshahi, 2014). سالانه در شهر تهران بیش از ۴ هزار و ۴۰۰ نفر بر اثر آلودگی هوا جان خود را از دست می‌دهند. آمارها نشان می‌دهد که در روزهای تشدید آلودگی هوای تهران، شمار بیماران تنفسی «تا ۶۰ درصد» افزایش می‌یابد (Azizi, 2006). آلودگی هوا نه تنها موجب به خطر افتادن سلامتی و افزایش مرگ و میر بیماران شده، بلکه بر کارکرد ورزشی ورزشکاران نیز تأثیر سوء دارد. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که اثرات سوء آلاینده‌های هوا بر انسان با افزایش فعالیت فیزیکی، افزایش یافته و مواجهه با آلاینده‌های هوا در حین ورزش بر کارکرد ریوی و کارایی ورزشکاران تأثیر منفی دارد. با این وجود در خصوص تأثیرات بلندمدت آلودگی هوا بر کارایی ورزشکاران هنوز تحقیقی صورت نگرفته است و مطالعات صورت گرفته صرفاً بر اثرات حاد آلودگی هوا بر کارایی ورزشکاران تأکید دارد. از طرف دیگر با توجه به اهمیت فعالیت فیزیکی و نقش آن در تندرستی عموم افراد جامعه و فراگیر شدن ورزش در میان اقشار مختلف مردم و بیماران ساکن در شهرهای بزرگ، همواره این سؤال برای آنان مطرح بوده که در چه ساعتی از شبانه‌روز به انجام ورزش بپردازند تا کمتر تحت تأثیر اثرات سوء آلاینده‌های هوا قرار گیرند (Mohaghegh & Hajian, 2013).

علاوه بر این، واکنش‌های افراد مختلف به آلاینده‌ها بسته به سن، وضعیت سلامتی، سطح آمادگی بدنی و ژنتیک آن‌ها متفاوت است. به‌ویژه، کودکان و افراد مسن به‌طور معمول حساسیت بیشتری نسبت به آلودگی هوا دارند. هنوز مشخص نیست که چه مقدار از این تفاوت‌ها باید در ارزیابی ریسک سلامت در فضاهای ورزشی لحاظ شود. لذا مدل‌هایی که این تفاوت‌ها را به‌خوبی در ارزیابی‌های خود وارد کنند، محدود هستند. برخی از ورزشکاران و تماشاچیان به‌صورت مکرر در مجموعه‌های ورزشی بزرگ حضور می‌یابند و به‌طور پیوسته در معرض آلودگی هوا قرار می‌گیرند. اثرات بلندمدت مواجهه با آلاینده‌ها در این افراد و رابطه‌ی میان این مواجهه‌ی مکرر و بروز مشکلات جدی سلامتی به‌طور کامل شناخته نشده است. به‌ویژه برای افرادی که در طولانی‌مدت در معرض این شرایط قرار دارند، پیش‌بینی و ارزیابی دقیق خطرات بسیار مهم است. از آنجا که تمامی فعالیت‌های انسانی با ریسک همراه است، ارزیابی و تعیین میزان ریسک اقدامات و فعالیت‌ها می‌تواند به عنوان ابزاری در برنامه‌ریزی و مدیریت اقدامات آتی به کار آید (Hu et al., 2009). ارزیابی خطر سلامت، فرآیندی است که به کمک آن تأثیرات بالقوه آلاینده‌ها بر سلامت افراد تخمین زده می‌شود.

دی‌اکسید نیتروژن برای سلامت انسان نگران‌کننده است زیرا قابل حل بوده و می‌تواند توسط پوشش مخاطی حفره نازوفارنگس جذب شود، جایی که به اسید نیترو و نیتریک تبدیل می‌شود. خاصیت اکسیدکنندگی دی‌اکسید نیتروژن پس از مواجهه حاد با مقدار ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ قسمت در میلیارد (ppb) می‌تواند باعث بیماری‌های تنفسی مانند تحریک گلو، سرفه و تنگی نفس شود. مقاومت در برابر عفونت‌های تنفسی نیز می‌تواند در مواجهه با دی‌اکسید نیتروژن با مقدار کمتر از ۵۰۰ ppb کاهش یابد (Carlisle et al., 2001). دی‌اکسید نیتروژن اثر تحریک‌کننده‌ی شدیدی بر دستگاه تنفسی دارد و می‌تواند منجر به بروز آسم، بیماری‌های مجاری تنفسی، تحریک چشم، بینی و گلو و مجاری تنفسی و سرطان ریه شود (Bai et al., 2021). دی‌اکسید نیتروژن در بیماران آسمی و دچار بیماری‌های مزمن انسدادی ریه و کودکان کم سن و سال، سبب اشکال در عملکرد ریوی و افزایش میزان عفونت‌های تنفسی می‌شود. دی‌اکسید گوگرد گازی سوزاننده است که معمولاً در گذر از بینی حذف می‌شود. برای ایجاد اثرات سوء بر سلامتی انسان، لازم است تنفس دهانی وجود داشته باشد که در فعالیت‌های با شدت متوسط به طور غیر ارادی وجود دارد (Mohaghegh & Hajian, 2013). پارامترهای مواجهه، پارامترهای پایه‌ای هستند که رفتار تماس ساکنان و ویژگی‌های محیطی که در معرض آن قرار دارند را توصیف می‌کنند. این عوامل نقش مهمی در تعیین دقت ارزیابی ریسک سلامت محیطی دارند. اگر آلاینده‌ها بتوانند به‌صورت کمی در اجزای محیطی (هوا، آب، خاک و ...) اندازه‌گیری شوند، هرچه مقدار پارامتر مواجهه به ارزیابی واقعی میزان تماس ساکنان نزدیک‌تر باشد، نتایج ارزیابی مواجهه و ریسک سلامت محیطی، دقیق‌تر خواهد بود. ارزیابی ریسک سلامت، روشی برای سنجش ارتباط میان میزان آلودگی‌های محیط زیستی و سلامت انسان است. این روش با برآورد احتمال بروز اثرات منفی ناشی از تماس با آلاینده‌ها بر ساکنان، امکان ارزیابی تأثیر این تماس‌ها بر سلامت انسان را فراهم می‌سازد (Bai et al., 2021). ارزیابی ریسک محیط زیستی، فرآیند تحلیل کیفی پتانسیل‌های خطر و ضریب بالفعل شدن ریسک‌های بالقوه موجود در منطقه یا پروژه مورد نظر و همچنین حساسیت یا آسیب‌پذیری محیط پیرامونی است. هدف عمده از آنالیز و ارزیابی ریسک، تعیین میزان عدم قطعیت سیستم مورد مطالعه و هزینه ناشی از آن و ارائه راهکارهای کاهش آن و همچنین تجمع هزینه راهکار مربوطه است (Bahmanpouret al., 2020). ارزیابی خطر سلامت در واقع فرآیندی علمی برای شناسایی و تخمین اثرات بالقوه یک عامل شیمیایی، فیزیکی و یا حتی روانشناختی روی یک جمعیت مشخص انسانی، تحت شرایط معین و در یک دوره زمانی خاص است، که این یک روش منطقی برای تعیین اندازه کمی و کیفی خطرات و بررسی پیامدهای بالقوه ناشی از خطرات احتمالی بر روی جمعیت انسانی در معرض است (Shojaee Barjoe et al., 2019).

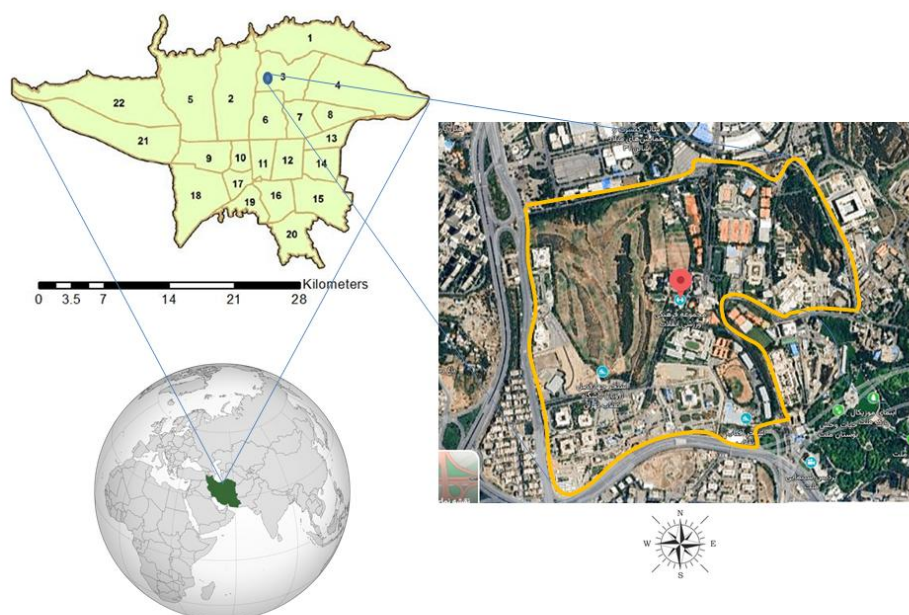
مجموعه‌های ورزشی و یا استادیوم‌های فوتبال بزرگ که در مجاورت مراکز شهری پرتردد احداث شده‌اند و در روزهای متعدد میزبان برگزاری مسابقات هستند نیز یکی دیگر از مراکز انتشار آلاینده‌های هوا به‌شمار می‌روند. در این میان، دو نکته مهم حائز اهمیت است:

اول آن که شرایط استاندارد به لحاظ ایمنی، محیط‌زیستی و بهداشتی برای حضور تماشاگران فراهم باشد، و دوم آن که، تعداد تماشاگران و طرفداران ورزشی زمینه‌ساز ایجاد مشکلات ثانویه نگردد (Kalooti et al., 2025).

مواد و روش‌ها

معرفی سایت مطالعاتی

در این تحقیق، فضاهای ورزشی بزرگ مقیاس روباز شهری مورد نظر بوده است. بدین منظور اختصاصاً باشگاه انقلاب تهران به عنوان سایت مطالعاتی انتخاب شده است (شکل 1). مجموعه ورزشی انقلاب در شمال غربی منطقه ۳ شهرداری تهران به وسعت ۸۱ هکتار و در محدوده جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی در بخش کوهپایه‌ای شهر تهران واقع شده است. از شمال به مجموعه نمایشگاه بین‌المللی، از ضلع شرقی، به صدا و سیما، از ضلع غربی، به خیابان سنول و از ضلع جنوبی، به بزرگراه آیت‌الله هاشمی رفسنجانی مرتبط است.



شکل 1- موقعیت جغرافیایی باشگاه انقلاب تهران

Fig. 1- Geographical location of Enghelab Sport Complex, Tehran

روش پژوهش

تحقیق حاضر به لحاظ هدف، از نوع کاربردی، به لحاظ زمان، از نوع مقطعی و به لحاظ روش گردآوری داده‌ها، از نوع ترکیبی (کتابخانه‌ای-میدانی) و به لحاظ روش تجزیه و تحلیل داده‌ها، از نوع تطبیقی - تحلیلی است. روش گردآوری داده‌ها در تحقیق حاضر، از نوع کتابخانه‌ای و استفاده از بانک داده شرکت کنترل کیفیت هوای تهران بوده است. بدین صورت که براساس موقعیت ایستگاه‌های سنجش مناطق پیرامونی باشگاه انقلاب تهران، اقدام به استخراج داده‌ها و میانگین‌گیری به روش ریاضی گردید. بازه زمانی مورد مطالعه یک سال بوده است (از خرداد ماه سال 1403 تا خرداد ماه سال 1404).

ارزیابی ریسک سلامت فرآیند چند مرحله است که براساس روش ارزیابی ریسک سلامت ارائه شده توسط آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده^۱ برای دو طبقه سنی کودک و بزرگسال انجام شده است.

میانگین دوز مواجهه روزانه آلاینده (ADD)

انسان‌ها از طریق سه مسیر اصلی در معرض آلاینده‌ها قرار می‌گیرند: استنشاق^۲، گوارش مستقیم^۳ و تماس پوستی^۴ که به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT}$$

$$ADD_{dermat} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT}$$

در روابط فوق پارامترهای ADD_{inh} ، ADD_{ing} و ADD_{dermat} به ترتیب مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه آلاینده برحسب میلی گرم بر کیلوگرم در روز از طریق استنشاق، گوارش و جذب پوستی است.

C: غلظت آلاینده شبیه سازی شده برحسب میلی گرم بر مترمکعب

BW: وزن متوسط بدن که برای کودکان ۱۵ کیلوگرم و برای بزرگسالان ۷۰ کیلوگرم در نظر گرفته می‌شود.

R_{inh} : نرخ استنشاق که برای کودکان برابر با ۷/۶ و برای بزرگسالان ۲۰ مترمکعب در روز در نظر گرفته می‌شود.

R_{ing} : نرخ گوارش که برای کودکان برابر با ۲۰۰ و برای بزرگسالان برابر با ۱۰۰ میلی گرم در روز است.

PEF: بیانگر فاکتور انتشار که برای دو طبقه سنی ۱۰۹×۱/۳۶ برحسب مترمکعب بر کیلوگرم است.

SA: ناحیه‌ای از پوست که در تماس با ذرات هوا برد است و مقدار این پارامتر برای کودکان برابر با ۲۸۰۰ سانتیمتر مربع و برای بزرگسالان، ۵۷۰۰ سانتی متر مربع است.

SL: فاکتور چسبندگی پوست که برای کودکان برابر با ۰/۲ میلی گرم بر متر مکعب و برای بزرگسالان برابر با ۰/۰۷ میلی گرم بر مترمکعب است.

EF: بیانگر فراوانی مواجهه و مقدار آن برابر با ۱۸۰ روز در سال برای هر دو طبقه سنی است.

ED: بیانگر زمان مواجهه که برای کودکان برابر با ۶ ساعت و برای بزرگسالان برابر با ۲۴ ساعت.

AT: بیانگر زمان میانگین که برای ریسک‌های سرطانی برابر با ۳۶۵×۷۰ روز و برای ریسک‌های غیرسرطانی ۳۶۵×ED روز، برای هر دو طبقه سنی است.

ABS: فاکتور جذب پوستی که برای هر دو طبقه سنی برابر با ۰/۰۱ (بدون واحد) در نظر گرفته می‌شود.

CF: فاکتور تبدیل که مقدار آن برابر ۱۰-۶×۱ میلی گرم بر کیلوگرم است.

شاخص خطر برای اثرات غیر سرطان‌زایی

پس از این که دوز مواجهه روزانه آلاینده محاسبه شد، شاخص خطر غیرسرطان‌زایی (HQ_i) براساس تقسیم دوز مواجهه روزانه از هر یک از مسیرها به یک دوز مرجع خاص (RfD) با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید.

¹ EPA

² Inhalation

³ Ingestion

⁴ Dermal

$$HQ_i = \frac{ADD_i}{RfD_i}$$

ADD_i : مقدار میانگین دوز مواجهه روزانه آلاینده از طریق هر یک از سه مسیر تنفس، گوارش و جذب پوستی (میلی گرم بر کیلوگرم در روز).

RfD_i : دوز مرجع که برآورد حداکثر خطرپذیری در جمعیت انسانی از طریق مواجهه روزانه با آلاینده در طول عمر است و بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم در روز در نظر گرفته می شود.

اگر میانگین جذب روزانه کمتر از جذب مرجع باشد، هیچ اثر نامطلوبی بر سلامتی نخواهد داشت، در غیر این صورت اگر مقدار جذب روزانه بالاتر از RfD_i باشد، احتمال دارد باعث اثر نامطلوب بر روی سلامت انسان شود.

اگر $HQ \leq 1$ باشد، با سلامت انسان ناسازگار نیست و اگر $HQ \geq 1$ باشد، اثر نامطلوب و نگران کننده ای بر سلامت انسان دارد. مقدار شاخص خطر تجمعی غیر سرطان زایی (HI) کل مسیرها برای هر دو گروه کودک و بزرگسال از رابطه زیر به دست می آید.

$$HI = \sum HQ_i$$

شاخص خطر تجمعی غیرسرطان زایی (HI) نمایانگر شدت اثرات نامطلوب کل مسیرهای مواجهه انسان با آلاینده است. اگر مقدار $HI \leq 1$ باشد، اعتقاد بر این است که هیچ خطر مهمی برای اثرات خطر تجمعی غیرسرطان زایی وجود ندارد و اگر $HI \geq 1$ باشد، به این معنی است که شانس زیادی برای اثرات خطر تجمعی غیرسرطان زایی و احتمال افزایش با افزایش مقدار HI وجود دارد.

ارزیابی خطرات سرطان زایی

ارزیابی خطر سرطان زایی هر یک از مسیرهای سه گانه مواجهه با آلاینده با استفاده از رابطه زیر انجام شده است.

$$\text{Carcinogenic Risk } CR = \sum ADD_i \times SF_i$$

در رابطه بالا، CR خطر سرطان زایی، ADD_i مقدار میانگین دوز مواجهه روزانه آلاینده از هر یک از مسیرهای مواجهه (میلی گرم بر کیلوگرم در روز) و SF_i فاکتور احتمال ابتلا به سرطان در هر واحد قرارگیری در معرض آلاینده (میلی گرم بر کیلوگرم در روز) است. خطر سرطان زایی به احتمال ابتلای یک فرد به هر نوع سرطان در اثر مواجهه مادام العمر با عوامل سرطان زا اشاره دارد. آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده (EPA) خطرات سرطان در بازه 6-10 (یعنی ۱ نفر از هر 1000/000 نفر) تا 4-10 (یعنی ۱ نفر از هر 10/000 نفر) را به طور کلی قابل قبول در نظر گرفته است. خطرات سرطان بالاتر از 4-10 ممکن است از نظر حفاظتی کافی تلقی نشوند و در بسیاری موارد نیازمند اقدامات اصلاحی باشند (Bixapathi et al., 2021; Mohammed, 2017).

نتایج

برای ارزیابی خطر سرطان زایی و غیرسرطان زایی بودن آلاینده ها بر اساس روش ارزیابی خطر سلامت ارائه شده توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا، ابتدا مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه با هر یک از آلاینده ها برای هر دو گروه سنی محاسبه شده و سپس با قرارگیری این مقادیر در فرمول های ارزیابی ریسک EPA، ارزیابی خطر سلامت صورت گرفت. نتایج حاصل از متوسط غلظت دی اکسید نیتروژن و میانگین غلظت آن در جدول 2 آمده است.

جدول 2- میانگین غلظت‌های متوسط NO₂ پراکنش یافته در فصول مختلفTable 2- Mean Concentrations of Dispersed NO₂ During Different Seasons

متوسط زمانی	متوسط غلظت (ppb)	میانگین غلظت متوسط (ppb)	C (mg/m ³)
پاییز و زمستان	۵۶/۸۵	۵۰/۲۵	۰/۰۹۴
بهار و تابستان	۴۳/۶۶		

محاسبات مربوط به نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی‌اکسید نیتروژن از همه مسیرها در کودکان برای ریسک‌های سرطان‌زایی به شرح زیر است:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} = \frac{0.094 \times 7.6 \times 180 \times 6}{15 \times 70 \times 365 \times 1.36 \times 10^9} = 1.48 \times 10^{-12}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.094 \times 200 \times 180 \times 6 \times 10^{-6}}{15 \times 70 \times 365} = 5.29 \times 10^{-8}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.094 \times 2800 \times 0.2 \times 0.001 \times 180 \times 6 \times 10^{-6}}{15 \times 70 \times 365} = 1.48 \times 10^{-10}$$

محاسبات مربوط به نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی‌اکسید نیتروژن از همه مسیرها در کودکان برای ریسک‌های غیرسرطان‌زایی به شرح زیر است:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} = \frac{0.094 \times 7.6 \times 180 \times 6}{15 \times 6 \times 365 \times 1.36 \times 10^9} = 1.72 \times 10^{-11}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.094 \times 200 \times 180 \times 6 \times 10^{-6}}{15 \times 6 \times 365} = 6.18 \times 10^{-7}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.094 \times 2800 \times 0.2 \times 0.001 \times 180 \times 6 \times 10^{-6}}{15 \times 6 \times 365} = 1.73 \times 10^{-9}$$

محاسبات مربوط به نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی‌اکسید نیتروژن از همه مسیرها در بزرگسالان برای ریسک‌های سرطان‌زایی به شرح زیر است:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} = \frac{0.094 \times 20 \times 180 \times 24}{70 \times 70 \times 365 \times 1.36 \times 10^9} = 3.33 \times 10^{-12}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.094 \times 100 \times 180 \times 24 \times 10^{-6}}{70 \times 70 \times 365} = 2.27 \times 10^{-8}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.094 \times 5700 \times 0.07 \times 0.001 \times 180 \times 24 \times 10^{-6}}{70 \times 70 \times 365} = 4.22 \times 10^{-10}$$

محاسبات مربوط به نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی‌اکسید نیتروژن از همه مسیرها در بزرگسالان برای ریسک‌های غیرسرطان‌زایی به شرح زیر است:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} = \frac{0.094 \times 20 \times 180 \times 24}{70 \times 24 \times 365 \times 1.36 \times 10^9} = 9.73 \times 10^{-12}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.094 \times 100 \times 180 \times 24 \times 10^{-6}}{70 \times 24 \times 365} = 6.62 \times 10^{-8}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.094 \times 5700 \times 0.07 \times 0.001 \times 180 \times 24 \times 10^{-6}}{70 \times 24 \times 365} = 1.23 \times 10^{-9}$$

نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی اکسید نیتروژن برحسب میلی گرم بر کیلوگرم در روز از طریق استنشاق، گوارش و جذب پوستی در جدول 3 ارائه شده است.

جدول 3- مقادیر میانگین دوز روزانه مواجهه (ADD) NO₂ در هر یک از مسیرهای گروه‌های مواجهه

Table 3- Mean Values of Average Daily Dose (ADD) of \$NO_2\$ for Each Route Across Exposure Groups

(mg/kg.day)			نوع ریسک	گروه‌های مواجهه / طبقه سنی
ADD _{dermal}	ADD _{ing}	ADD _{inh}		
۱/۴۸×۱۰ ^{-۱۰}	۵/۲۹×۱۰ ^{-۸}	۱/۴۸×۱۰ ^{-۱۲}	سرطانی	کودکان
۱/۷۳×۱۰ ^{-۹}	۶/۱۸×۱۰ ^{-۷}	۱/۷۲×۱۰ ^{-۱۱}	غیرسرطانی	
۴/۲۲×۱۰ ^{-۱۰}	۲/۲۷×۱۰ ^{-۸}	۳/۳۳×۱۰ ^{-۱۲}	سرطانی	بزرگسالان
۱/۲۳×۱۰ ^{-۹}	۶/۶۲×۱۰ ^{-۸}	۹/۷۳×۱۰ ^{-۱۲}	غیرسرطانی	

محاسبات مربوط به نتایج شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی از هر یک از مسیرهای مواجهه با دی اکسید نیتروژن برای کودکان به شرح زیر است:

$$HQ_i = \frac{ADD_i}{RfD_i}$$

$$HQ_{inh} = \frac{1.72 \times 10^{-11}}{0.029} = 5.93 \times 10^{-10}$$

$$HQ_{ing} = \frac{6.18 \times 10^{-7}}{0.029} = 2.13 \times 10^{-5}$$

$$HQ_{dermal} = \frac{1.73 \times 10^{-9}}{0.029} = 5.96 \times 10^{-8}$$

$$HI = \sum HQ_i = (5.93 \times 10^{-10}) + (2.13 \times 10^{-5}) + (5.96 \times 10^{-8}) = 2.13 \times 10^{-5}$$

محاسبات مربوط به نتایج شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی از هر یک از مسیرهای مواجهه با دی اکسید نیتروژن برای بزرگسالان به شرح زیر است:

$$HQ_i = \frac{ADD_i}{RfD_i}$$

$$HQ_{inh} = \frac{9.73 \times 10^{-12}}{0.029} = 3.35 \times 10^{-10}$$

$$HQ_{ing} = \frac{6.62 \times 10^{-8}}{0.029} = 2.28 \times 10^{-6}$$

$$HQ_{dermal} = \frac{1.23 \times 10^{-9}}{0.029} = 1.45 \times 10^{-8}$$

$$HI = \sum HQ_i = (3.35 \times 10^{-10}) + (2.28 \times 10^{-6}) + (1.45 \times 10^{-8}) = 2.29 \times 10^{-9}$$

نتایج ارزیابی خطر سلامت مواجهه با دی‌اکسید نیتروژن در گروه‌های مورد بررسی در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- مقادیر شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیرسرطانی و ریسک سرطانی مواجهه ۲۴ ساعته با NO_2
Table 4. Values of Non-Carcinogenic Hazard Index (HI), Cumulative Non-Carcinogenic Hazard Index (HIC), and Carcinogenic Risk from 24-Hour Exposure to NO_2

R _{total}	HI	HQ _{dermal}	HQ _{ingest}	HQ _{inhal}	گروه مواجهه
-	$2/13 \times 10^{-5}$	$5/96 \times 10^{-8}$	$2/13 \times 10^{-5}$	$5/93 \times 10^{-10}$	کودکان
-	$2/29 \times 10^{-6}$	$1/45 \times 10^{-8}$	$2/28 \times 10^{-6}$	$3/35 \times 10^{-10}$	بزرگسالان

نتایج حاصل از متوسط غلظت دی‌اکسید گوگرد و میانگین غلظت آن در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵- میانگین غلظت‌های متوسط SO_2 پراکنش یافته در فصول مختلف
Table 5- Mean Concentrations of Dispersed SO_2 Across Different Seasons

(mg/m ³) C	میانگین غلظت متوسط (ppb)	متوسط غلظت (ppb)	متوسط زمانی
۰/۰۱۴	۵/۳۳	۶/۴۵	پاییز و زمستان
		۴/۲۲	بهار و تابستان

محاسبات مربوط به نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی‌اکسید گوگرد از همه مسیرها در کودکان برای ریسک‌های سرطان‌زایی به شرح زیر است:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} = \frac{0.014 \times 7.6 \times 180 \times 6}{15 \times 70 \times 365 \times 1.36 \times 10^9} = 2.20 \times 10^{-13}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.014 \times 200 \times 180 \times 6 \times 10^{-6}}{15 \times 70 \times 365} = 7.89 \times 10^{-9}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.014 \times 2800 \times 0.2 \times 0.001 \times 180 \times 6 \times 10^{-6}}{15 \times 70 \times 365} = 2.20 \times 10^{-11}$$

محاسبات مربوط به نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی‌اکسید گوگرد از همه مسیرها در کودکان برای ریسک‌های غیرسرطان‌زایی به شرح زیر است:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} = \frac{0.014 \times 7.6 \times 180 \times 6}{15 \times 6 \times 365 \times 1.36 \times 10^9} = 2.57 \times 10^{-12}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.014 \times 200 \times 180 \times 6 \times 10^{-6}}{15 \times 6 \times 365} = 9.20 \times 10^{-8}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.014 \times 2800 \times 0.2 \times 0.001 \times 180 \times 6 \times 10^{-6}}{15 \times 6 \times 365} = 2.57 \times 10^{-10}$$

محاسبات مربوط به نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی اکسید گوگرد از همه مسیرها در بزرگسالان برای ریسک‌های سرطان‌زایی به شرح زیر است:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} = \frac{0.014 \times 20 \times 180 \times 24}{70 \times 70 \times 365 \times 1.36 \times 10^9} = 4.97 \times 10^{-13}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.014 \times 100 \times 180 \times 24 \times 10^{-6}}{70 \times 70 \times 365} = 1.69 \times 10^{-9}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.014 \times 5700 \times 0.07 \times 0.001 \times 180 \times 24 \times 10^{-6}}{70 \times 70 \times 365} = 1.34 \times 10^{-11}$$

محاسبات مربوط به نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی اکسید گوگرد از همه مسیرها در بزرگسالان برای ریسک‌های غیرسرطان‌زایی به شرح زیر است:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} = \frac{0.014 \times 20 \times 180 \times 24}{70 \times 24 \times 365 \times 1.36 \times 10^9} = 1.45 \times 10^{-12}$$

$$ADD_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.014 \times 100 \times 180 \times 24 \times 10^{-6}}{70 \times 24 \times 365} = 4.93 \times 10^{-9}$$

$$ADD_{dermal} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} = \frac{0.014 \times 5700 \times 0.07 \times 0.001 \times 180 \times 24 \times 10^{-6}}{70 \times 24 \times 365} = 3.93 \times 10^{-11}$$

نتایج مقادیر میانگین دوز مواجهه روزانه دی اکسید گوگرد برحسب میلی گرم بر کیلوگرم در روز از طریق استنشاق، گوارش و جذب پوستی در جدول 6 ارائه شده است.

جدول 6- مقادیر میانگین دوز روزانه مواجهه (ADD) SO₂ در هر یک از مسیرها برای گروه‌های مواجهه
Table 6- Mean values of the daily exposure dose (ADD) of SO₂ in each pathway for the exposed groups

(mg/kg.day)			نوع ریسک	گروه‌های مواجهه / طبقه سنی
ADD _{dermal}	ADD _{ing}	ADD _{inh}		
۲/۲۰×۱۰ ^{-۱۱}	۷/۸۹×۱۰ ^{-۹}	۲/۲۰×۱۰ ^{-۱۳}	سرطانی	کودکان
۲/۵۷×۱۰ ^{-۱۰}	۹/۲۰×۱۰ ^{-۸}	۲/۵۷×۱۰ ^{-۱۲}	غیرسرطانی	
۱/۳۴×۱۰ ^{-۱۱}	۱/۶۹×۱۰ ^{-۹}	۴/۹۷×۱۰ ^{-۱۳}	سرطانی	بزرگسالان
۳/۹۳×۱۰ ^{-۱۱}	۴/۹۳×۱۰ ^{-۹}	۱/۴۵×۱۰ ^{-۱۲}	غیرسرطانی	

محاسبات مربوط به نتایج شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی از هر یک از مسیرهای مواجهه با دی اکسید گوگرد برای کودکان به شرح زیر است:

$$HQ_i = \frac{ADD_i}{RfD_i}$$

$$HQ_{inh} = \frac{2.57 \times 10^{-12}}{0.023} = 1.11 \times 10^{-10}$$

$$HQ_{ing} = \frac{9.20 \times 10^{-8}}{0.023} = 4.00 \times 10^{-6}$$

$$HQ_{dermal} = \frac{2.57 \times 10^{-10}}{0.023} = 1.11 \times 10^{-8}$$

$$HI = \sum HQ_i = (1.11 \times 10^{-10}) + (4.00 \times 10^{-6}) + (1.11 \times 10^{-8}) = 4.01 \times 10^{-6}$$

محاسبات مربوط به نتایج شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیر سرطان‌زایی از هر یک از مسیرهای مواجهه با دی‌اکسید گوگرد برای بزرگسالان به شرح زیر است:

$$HQ_i = \frac{ADD_i}{RfD_i}$$

$$HQ_{inh} = \frac{1.45 \times 10^{-12}}{0.023} = 6.30 \times 10^{-11}$$

$$HQ_{ing} = \frac{4.93 \times 10^{-9}}{0.023} = 2.14 \times 10^{-7}$$

$$HQ_{dermal} = \frac{3.93 \times 10^{-11}}{0.023} = 1.70 \times 10^{-9}$$

$$HI = \sum HQ_i = (6.30 \times 10^{-11}) + (2.14 \times 10^{-7}) + (1.70 \times 10^{-9}) = 2.15 \times 10^{-7}$$

نتایج ارزیابی خطر سلامت مواجهه با دی‌اکسید گوگرد در گروه‌های مورد بررسی در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷- مقادیر شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیرسرطانی و ریسک سرطانی مواجهه ۲۴ ساعته با SO₂
Table 7- Hazard Quotient (HQ), Non-Carcinogenic Cumulative Hazard Index (HI), and Cancer Risk Values for 24-Hour SO₂ Exposure

R _{total}	HI	HQ _{dermal}	HQ _{ingest}	HQ _{inh}	گروه مواجهه
-	4/01×۱۰ ⁻⁶	1/11×۱۰ ⁻⁸	4/00×۱۰ ⁻⁶	1/11×۱۰ ⁻¹⁰	کودکان
-	2/15×۱۰ ⁻⁷	1/70×۱۰ ⁻⁹	2/14×۱۰ ⁻⁷	6/30×۱۰ ⁻¹¹	بزرگسالان

با توجه به نتایج، در هر دو گروه سنی، میزان میانگین دوز مواجهه روزانه گوارشی با دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد بیشتر از تنفسی و جذب پوستی است. به علت کوچک‌تر بودن شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیرسرطانی از عدد یک، هیچ خطر مهمی برای سلامت وجود ندارد. همچنین اثر این آلاینده‌ها جزء ریسک‌های سرطانی محسوب نمی‌شود.

بحث و نتیجه گیری

در سراسر جهان بیش از یک چهارم بزرگسالان به صورت فیزیکی غیرفعال هستند، به این معنا که حداقل سطح توصیه شده ۱۵۰ دقیقه فعالیت فیزیکی با شدت متوسط یا ۷۵ دقیقه فعالیت شدید در هفته را انجام نمی‌دهند، به طوری که بزرگسالان در کشورهای با درآمد بالا نسبت به کشورهای کم‌درآمد و متوسط فعالیت کمتری دارند. در عین حال، ۹۰ درصد جمعیت جهان در محیط‌هایی زندگی می‌کنند که از مقادیر راهنمای سازمان بهداشت جهانی برای کیفیت هوای محیط فراتر رفته است و کشورهای کم‌درآمد و متوسط بیشترین بار سلامت را متحمل می‌شوند. در سطح جهانی، سازمان بهداشت جهانی تخمین زده است که آلودگی هوای محیطی در سال ۲۰۱۶ باعث مرگ ۴/۲ میلیون نفر شده است، در حالی که عدم فعالیت بدنی در همان سال باعث مرگ ۳/۲ میلیون نفر شده است. هم آلودگی هوا و هم عدم فعالیت بدنی به طور علی و مثبت با مرگ و میر زودرس ناشی از بیماری‌های غیرواگیر مرتبط هستند.

فعالیت بدنی اثرات مفید فوری دارد که به مرور زمان تجمع می‌یابند و در درازمدت خطر ابتلا و مرگ ناشی از بیماری‌های قلبی-عروقی و تنفسی، دیابت نوع ۲، برخی انواع سرطان‌ها و همچنین خطر مرگ و میر کلی را کاهش می‌دهد (Tainio et al., 2021). از اینرو، انجام فعالیت‌های ورزشی به عنوان یک نیاز و ضرورت مطرح است. اما این امر با آلودگی هوای کلانشهرها و مناطق صنعتی دارای تضاد است که همیشه ابهام بزرگی را برای ورزشکاران و مدیران و مربیان ورزشی ایجاد نموده است.

ورزشکاران و تماشاچیان در مجموعه‌های ورزشی بزرگ، به‌ویژه فضاهای باز، در معرض مستقیم آلودگی‌های هوا قرار دارند. این آلودگی‌ها می‌توانند شامل ذرات معلق، دی‌اکسید نیتروژن، منواکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد، ازن و دیگر آلاینده‌های مضر باشند که به واسطه ترافیک، فعالیت‌های صنعتی و حتی برخی فعالیت‌های ورزشی تولید می‌شوند (Bahmanpour, 2015). مواجهه مکرر با این آلاینده‌ها، به‌ویژه در هنگام فعالیت‌های ورزشی سنگین، موجب تشدید مشکلات تنفسی و قلبی - عروقی و افزایش خطرات سلامتی در بلند مدت می‌شود. با توجه به این که فعالیت‌های بدنی میزان جذب آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد، مدلسازی پراکنش آلاینده‌ها و ارزیابی خطر سلامت، کمک می‌کند تا مجموعه‌های ورزشی ایمن‌تری طراحی شوند و از بروز مشکلات سلامتی پیشگیری شود (Reche et al., 2020).

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که اثرات سوء آلاینده‌های هوا بر انسان با افزایش فعالیت فیزیکی افزایش یافته و مواجهه با آلاینده‌های هوا در هنگام ورزش بر کارکرد ریوی و کارایی ورزشکاران تاثیر منفی دارد (Lippi et al., 2008; Bai et al., 2021; Bono et al., 2010; Campbell et al., 2005). دلیل این امر، افزایش ضربان قلب و تعداد دفعات دم و بازدم به هنگام ورزش کردن است که سبب می‌شود بدن به اکسیژن بیشتری نیاز پیدا کند، این در حالی است که به جای دریافت اکسیژن، آلاینده‌ها با حجم بیشتری وارد ریه ورزشکاران می‌شود (Hasting, 2010; Swain et al., 2014). تأثیر آلاینده‌های هوا بر کاهش کارایی ورزشکاران اثبات شده است (Bahmanpour et al., 2020; Kalooti et al., 2025).

نتایج ارزیابی ریسک مواجهه نشان داد در ارزیابی مخاطرات مواجهه در هر دو گروه سنی، میزان مواجهه گوارشی با هر دو آلاینده دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد، بیشتر از مواجهه تنفسی و جذب پوستی بوده است که این نتایج با نتایج Nameni و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیق ارزیابی ریسک محیط زیستی مجموعه‌های ورزشی مبنی بر این که بررسی و تحلیل لایه‌های اطلاعاتی و نقشه‌های ترسیمی نشانگر آن است که اکثر مجموعه‌های ورزشی موجود در منطقه مطالعاتی به نحوی با آلاینده‌ها در تماس هستند و این که این بستگی به نوع آلاینده دارد، هم‌خوانی داشته است. با افزایش تنفس در حین دویدن، مقدار ضریب خطر برای استنشاق افزایش یافته، اما تماس پوستی و گوارشی ثابت باقی مانده است (Ulutaş, 2023).

نتایج بدست آمده از محاسبه مخاطرات غیرسرطانی برای دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد بدین صورت بوده که به علت کوچک‌تر بودن شاخص خطر و شاخص خطر تجمعی غیرسرطانی از عدد یک، هیچ خطر مهمی برای سلامت وجود ندارد. این نتایج با نتایج Bai و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیق آلودگی هوا و ارزیابی ریسک سلامت در شمال شرق چین مبنی بر این که مخاطرات غیرسرطانی آلاینده‌ها همگی در محدوده قابل قبول قرار دارند، هم‌خوانی داشته است. همچنین با نتایج Ulutaş (۲۰۲۳) در تحقیق ارزیابی سطح آلودگی در یک زمین ورزشی مبنی بر اینکه مقدار شاخص خطر تجمعی برای هر دو سناریو کمتر از ۱ بوده و خطری برای سلامتی ایجاد نکرده نیز هم‌خوانی داشته است. همچنین براساس نتایج تحقیق Bixapathi و همکاران (۲۰۲۱)، در تحقیق ارزیابی ریسک سلامت چهار آلاینده مهم هوای محیطی مبنی بر این که مقادیر شاخص خطر (HQ) محاسبه شده برای مواجهه‌های غیرسرطانی به‌طور قابل توجهی کمتر از سطح مجاز ۱ بودند و این که سطح کلی شاخص خطر (HI) مواجهه‌ها، که با جمع کردن مقادیر HQ هر آلاینده تعیین شده بود، الگوی مشابهی داشته و کمتر از ۱ گزارش شده نیز مطابقت دارد.

مقادیر HQ در مناطق شهری، صنعتی و مناطق پس‌زمینه در استان رایونگ کمتر از ۱ بوده است، که نشان‌دهنده عدم وجود خطر است. بالاترین مقادیر HQ برای کودکان و بزرگسالان در فصل زمستان مشاهده شد، در حالی که سطوح HQ برای بزرگسالان در فصول بارانی، زمستان و تابستان بالاتر از کودکان بود. علاوه بر این، مقادیر HQ مربوط به NO₂ برای بزرگسالان در فصل زمستان ۱/۰۹ و تابستان ۱/۱۲ بالاتر از ۱ بوده است که نشان‌دهنده اثرات منفی بر سلامت انسان است. این محل در نزدیکی بازار تاپما و تقاطع بزرگراه واقع شده که دارای تراکم بالای ترافیک است (Sillapapiromsuk et al., 2022).

آلودگی هوا یکی از شایع‌ترین و بارزترین تهدیدهای محیط‌زیستی برای ورزش به‌شمار می‌رود که به شکل‌های گوناگونی جلوه‌گر می‌شود. تحقیقات نشان داده است که آلودگی هوا ممکن است بر برخی زیرمجموعه‌های جمعیت بیشتر از سایرین تأثیرگذار باشد. از

این منظر، ورزشکارانی که در هوای آزاد به تمرین یا مسابقه می‌پردازند ممکن است بیشتر در معرض آلاینده‌های هوا قرار بگیرند و دوز مؤثر^۱ بسیار بیشتری را نسبت به افراد عادی یا ورزشکارانی که عمدتاً در داخل سالن به تمرین یا مسابقه می‌پردازند، تجربه کنند. علاوه بر میزان تهویه بیشتر در انجام فعالیت ورزشی، اولین تفاوت آشکار شامل زمان صرف شده در هوای آزاد توسط ورزشکاران است، که اغلب نیز همزمان با زمان‌های اوج سطوح آلودگی است. در محیط‌های شهری، افراد پیاده‌رو، دوندگان و دوچرخه‌سواران همچنین ممکن است در نزدیکی جاده‌های اصلی، جایی که ممکن است مقدار آلاینده‌ها بسیار بالاتر از میانگین سطوح گزارش شده باشد، به انجام فعالیت ورزشی مبادرت ورزند. انجام مطالعات ارزیابی ریسک، کمک شایانی برای مدیران و مربیان و ورزشکاران است تا بتوانند نسبت به جنبه‌های مجهول ناشی از آلودگی‌های محیطی و پیامدهای بهداشتی آن‌ها آگاهی پیدا نمایند تا با اتخاذ تصمیم‌های درست، سلامت خود را تضمین نمایند.

Extended Abstract

Introduction: Air pollution is one of the most critical factors affecting human quality of life and has adverse effects on human health. Air pollution not only jeopardizes the health and increases the mortality of patients but also negatively impacts the athletic performance of sportspeople. Several studies have shown that the adverse effects of air pollutants on humans are amplified by increased physical activity, and exposure to air pollutants during exercise negatively affects pulmonary function and athletic efficiency. According to modern health guidelines, today it is extremely important to identify the effects and assess the risk of exposure to air pollutants in sports environments, particularly in open-air sports facilities, in order to mitigate exposure effects and investigate the carcinogenic and non-carcinogenic risks posed by these pollutants. This article aims to identify the effects and assess the risk of exposure to nitrogen dioxide (NO₂) and sulfur dioxide (SO₂) pollutants in large-scale outdoor sports environments, specifically the Enghelab Sport Complex in Tehran.

Materials and methods: This research is applied in nature. The data collection method included both library research and direct data retrieval from the database of the Tehran Air Quality Control Company. The study period was set for one year, from May/June 2024 (Khordad 1403) to May/June 2025 (Khordad 1404). Data concerning the concentration of the studied pollutants were obtained from stations in adjacent areas and were adjusted using the mathematical averaging method. Subsequently, based on the average measured values of nitrogen dioxide and sulfur dioxide across different seasons, the mean daily exposure doses of these pollutants were calculated for two age groups—children and adults—via the respiratory, ingestion, and dermal absorption routes. In the next stage, the non-carcinogenic and carcinogenic hazard indices for these pollutants were determined based on the risk assessment formulas provided by the United States Environmental Protection Agency.

Results: The cumulative non-carcinogenic hazard index for NO₂ exposure was 2.13×10^{-5} for children and 2.29×10^{-6} for adults. Similarly, this index for SO₂ was calculated to be 4.01×10^{-6} for children and 2.15×10^{-7} for adults. The results of the exposure risk assessment indicated that, in both age groups, the ingestion exposure dose for both NO₂ and SO₂ was higher than the respiratory and dermal absorption exposure doses. Due to the non-carcinogenic hazard index and cumulative hazard index being less than one, there is no significant health risk associated with NO₂ and SO₂ exposure.

Discussion and Conclusion: There was no carcinogenic or non-carcinogenic risk observed from exposure to SO₂ and NO₂ pollutants at the study site. Considering that the International Olympic Committee guidelines, since 2006, have proposed replacing conventional ventilation systems with air filtration systems, this measure is recommended as a solution for all indoor multi-purpose sports facilities. It is suggested that the complex management install a public monitor at the entrance to raise user awareness and provide general information, allowing athletes real-time access to air quality index values and related analyses.

Keywords: Air Pollution, Health Risk Assessment, Sports Environment, Nitrogen Dioxide, Hazard Index.

¹ ED

References

- Amesano, M., Revel, G. M., & Seri, F. (2016). A tool for the optimal sensor placement to optimize temperature monitoring in large sports spaces. *Automation in Construction*, 68, 223-234.
- Azizi, G. (2006). Simulation of air pollution in Tehran. *Journal of Physical Geography Research*, 68. [In Persian]
- Bahmanpour, H., Naghibi, S.H., & Abdi, H. (2020). Environmental Risk of Carbon Monoxide Pollutant in Tehran Outdoor Sports Spaces and Recreation Sites. *Geographical research*, 35(2), 155-165. [In Persian]
- Bahmanpour, H. (2015). *Sport and the environment: For athletes and sports managers*. Office of Environment and Sustainable Development, Ministry of Sport and Youth, 97. [In Persian]
- Bai, L., Li, C., Yu, C. W., & He, Z. (2021). Air pollution and health risk assessment in Northeastern China: A case study of Jilin Province. *Indoor and Built Environment*, 30(10), 1857-1874.
- Bono, R., Degan, R., Pazzi, M., Romanazzi, V., & Rovere, R. (2010). Benzene and formaldehyde in air of two winter Olympic venues of "Torino 2006". *Environment international*, 36(3), 269-275.
- Bixapathi, B., Reddy, V. V., Rao, M. S., & Raghavendra, T. (2021). Health risk assessment of four important ambient air pollutants in Hyderabad. *Nat. Volatiles & Essent. Oils*, 8(5), 9925-9935.
- Campbell, M. E., Li, Q., Gingrich, S. E., Macfarlane, R. G., & Cheng, S. (2005). Should people be physically active outdoors on smog alert days?. *Canadian journal of public health*, 96(1), 24-28.
- Carlisle, A. J., & Sharp, N. C. C. (2001). Exercise and outdoor ambient air pollution. *British journal of sports medicine*, 35(4), 214-222.
- Fashi, Mohamad. (2023). Air Pollution, Exercise, and Inflammation. *Journal Of Gorgan University of Medical Sciences*, 24(4), 1- 9. [In Persian]
- Florida-James, G., Donaldson, K., & Stone, V. (2004). Athens 2004: the pollution climate and athletic performance. *Journal of sports sciences*, 22(10), 967-980.
- Hasting, Gerome. (2010). *Exercise prescription and medical considerations*. ACSM Resource Manual for Guidelines for Exercise testing and prescription. 6th ed. Philadelphia: Lippincott Williams.
- Hosseinpour, E., Bagheri, G., Ali dost Ghahfarokhi, E., Amiri, M., & Jalali Farahani, M. (2018). Designing Safety model in Sports (Using Grounded Theory); *Iran Occupational Health Journal*, 15(4):34-49 [In Persian]
- Hu, A. H., Hsu, C. W., Kuo, T. C., & Wu, W. C. (2009). Risk evaluation of green components to hazardous substance using FMEA and FAHP. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 7142-7147.
- International Agency for Research on Cancer. (2013). Latest world cancer statistics Global cancer burden rises to 14.1 million new cases in 2012: Marked increase in breast cancers must be addressed. *World Health Organization*, 12.
- Kalooti, M., Fahimi-Nejad, A., Morsal, B., & Bahmanpour, H. (2025). Modeling of Carbon Monoxide Pollutant Emissions Caused by Sports Events in Cities under Multiple Scenarios (Case Study: Azadi Stadium in Tehran). *JRSM*; 15 (29):204-228 [In Persian]
- Lippi, G., Guidi, G. C., & Maffulli, N. (2008). Air pollution and sports performance in Beijing. *International journal of sports medicine*, 29(08), 696-698.
- Mohaghegh, S., & Hajian, M. (2013). Review Article: Exercise and Air Pollution. *Journal Of Medical Council of I.R.I.*, 31(3), 237-249. [In Persian]
- Mohammed, A. M. (2017). *Estimation of PM₁₀ Health Impacts on Human within Urban Areas of Makkah city, KSA*.

- Nameni, A., Tayebi-Sani, S. M., Fahimi-Nejad, A., & Morsal, B. (2019). Environmental risk assessment of sports complexes in relation to air pollutants (Case study: Northeast Tehran). *New Perspectives in Human Geography*, 11(2), 163–179. [In Persian]
- Noorpoor, A., & Sadri Jahanshahi, A. (2014). Evaluation of Health Risk Assessment by Heavy Metals in the Ambient Air of Tehran. *Journal of Environmental Studies*, 39(4), 181-192. [In Persian]
- Reche, C., Viana, M., Van Drooge, B. L., Fernández, F. J., Escribano, M., Castaño-Vinyals, G., & Bermon, S. (2020). Athletes' exposure to air pollution during World Athletics Relays: A pilot study. *Science of the Total Environment*, 717, 137161.
- Shojaee Barjoe, S., Azimzadeh, H.R., Kuchakzadeh, M.R., Mosleh Arani, A., & Sodaiezhadeh, H. (2019). Dispersion and Health Risk Assessment of PM₁₀ Emitted from the Stacks of a Ceramic and Tile industry in Ardakan, Yazd, Iran, Using the AERMOD Model. *Iranian South Medical Journal (ISMJ)*, 22(5), 317-332. [In Persian]
- Sillapapiromsuk, S., Koontoop, G., & Bootdee, S. (2022). Health risk assessment of ambient nitrogen dioxide concentrations in urban and industrial area in Rayong Province, Thailand. *Trends in Sciences*, 19(11), 4476-4476.
- Swain, D. P., Brawner, C. A., & American College of Sports Medicine. (2014). *ACSM's resource manual for guidelines for exercise testing and prescription*. Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins.
- Tainio, M., Andersen, Z. J., Nieuwenhuijsen, M. J., Hu, L., De Nazelle, A., An, R., & de Sá, T. H. (2021). Air pollution, physical activity and health: A mapping review of the evidence. *Environment international*, 147, 105954.
- Ulutaş, K. (2023). Assessment of the pollution level, microscopic structure, and health risk of heavy metals in surface dusts in a sports field. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(5), 529-536.
- W.B.Reports.(2015). Air Pollution Cost in Global. www.worldbank.org/en/.../air-pollution-deaths-cost-global-economy.
- WHO. (2017). Air Quality and Health. 11 (2), 164-179. <https://www.who.int/>.
- Zare Jeddi, M., Yunesian, M., Ahmad Khaniha, R., Kashani, H., & Rastkari, N. (2015). Semi-Quantitative and Quantitative Health Risk Assessment of Gas Station Workers Exposure to Benzene. *Iranian Journal of Health and Environment*, 8(3), 391-400. [In Persian].

دوره ۳، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴



Title	Contents	Page
1- Development of an Integrated CA-LR-Markov-Fuzzy Model for Optimal Site Selection of Sustainable Urban Development: An Environmental Criteria-Based Approach in Gilan Province (Meisam Jafari, Delaram Sikarudi1, Sahar Ghiyas).....	Error! Bookmark not defined.	
2- A Study of Legal and Managerial Approaches to Combating the Air Pollution Crisis in Metropolitan Areas (Samaneh Mohammadsaleimani, Zahra Johari).....		20
3- Foresight of the Drivers for Enhancing and Developing Pro-Environmental Behaviors of Generation Z Human Resources in the Iranian Department of Environment (Hossein Hamzavi, Seyedeh Marzieh Hosseini, Banafsheh fotovat, Hossein Abedi).....		33
4- Investigating the effect of educational interventions and safety climate factors on improving risk perception of hazardous situations of working at height and working in confined spaces among workers employed in grain storage silos (Farzin Sayyad Ghorbani Shirin, Sanaz Hosseini)		55
5- The Effectiveness of Project-Based Environmental Ethics Education on Responsibility and Attitudes Toward the Environment Among Fifth-Grade Male Students in District 3 of Isfahan (Malihe Shirazi, Nasrollah Ghashghaeizadeh)		69
6- Risk assessment of exposure to air pollutants in large-scale outdoor sports spaces in Tehran (Rasoul Sadeghi, Hooman Bahmanpour, Farham Aminsharei)		83