



رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط

دوفصلنامه پژوهشی پژوهشکده تحقیق و توسعه علوم انسانی «سمت»

دوره ۲، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۴

سر دبیر: دکتر افشین متقی دستنایی

هیئت تحریریه:

دکتر محمد تقی رضویان/استاد دانشگاه شهید بهشتی

دکتر فضلیه دادورخانی/دانشیار دانشگاه تهران

دکتر پروانه شاه حسینی/دانشیار پژوهشکده تحقیق و توسعه علوم انسانی «سمت»

دکتر ابراهیم رضائی/دانشیار پژوهشکده تحقیق و توسعه علوم انسانی «سمت»

دکتر بهرام ملک محمدی/دانشیار دانشگاه تهران

دکتر اسماعیل صالحی/استاد دانشگاه تهران

دکتر نفیسه مرصوصی/استاد دانشگاه پیام نور مرکز تهران

دکتر زهرا حجازی زاده/استاد دانشگاه خوارزمی

دکتر محمد آرمند/دانشیار پژوهشکده تحقیق و توسعه علوم انسانی «سمت»

دکتر احمد غیاثوند/دانشیار دانشگاه علامه طباطبائی

مدیر داخلی: دکتر سهیلا عباسپور گماری

ویراستار: دکتر زهرا زمانی

کارشناس: مهشید محرمخانی

حروف نگار و صفحه آرا: مهشید محرمخانی

طراح جلد: معصومه السادات رسول زاده

صاحب امتیاز: سازمان مطالعه و تدوین (سمت)



فهرست مطالب

عنوان	صفحه
بررسی اثرات صنعت نفت بر بوم‌شناسی سیمای سرزمین در جزیره شهر خارگ رضا کاکاوند، حسین اینانلو	۱۸۰-۱۸۱
پیاده‌سازی مولفه‌های منظر شفاف‌بخش در فضاهای باز مجتمع‌های مسکونی جهت افزایش پایداری اجتماعی ... آزاده رضایی، محمدرضا پورزرگر، هادی صادقی، سید مسعود بنی‌هاشمی	۱۹-۳۰
معرفی شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای و مروری بر مفاهیم مرتبط با آن زهره دهقان منشادی، اسماعیل صالحی	۳۱-۴۰
برآورد میزان سطوح نفوذناپذیر شهری با بکارگیری فناوری‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی؛ ... مهسا عظیم‌پور، شهرزاد فریادی، زهره دهقان منشادی	۴۱-۵۸
رشد هوشمند و پایدار شهرها با استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی و مدیریت شهری فرهاد خسروانی، یوسف رفیعی، حسین نصیری	۵۹-۷۰
ارزیابی عملکرد فضای سبز شهر سزد براساس تحلیل ساختار سیمای سرزمین صدیقه شربت‌دار، پرستو پریور، حمیدرضا عظیم‌زاده، احد ستوده، آفاق تابنده ساروی	۷۱-۸۴
پایش پراکنش مکانی و زمانی گاز دی‌اکسید گوگرد جو با به‌کارگیری سری زمانی محصول ماهواره سنتیل - 5P ... نادیا عباس‌زاده طهرانی، کیمیا خمسه، سیده ندا رسولی، میلاد جامع‌لی‌پور	۸۵-۹۸
کاربرد هوش مصنوعی و سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی محیط‌زیست شهری سیده بهاره حسینی، الهام یوسفی رویات	۹۹-۱۱۰
معیارهای مؤثر بر ارزیابی تاب‌آوری شهری در برابر تغییرات اقلیمی با روش تحلیل سلسله‌مراتبی فرانک لک‌زاده، احد ستوده، پرستو پریور، آفاق تابنده ساروی	۱۱۱-۱۲۰
ارزش‌گذاری اقتصادی خدمت اکوسیستمی ارتقاء کیفیت هوا توسط درختان شهری ریحانه رسول‌زاده، نغمه مبرقی دینان، حسن اسماعیل‌زاده، یوسف رشیدی	۱۲۱-۱۴۲
بررسی تغییرات پوشش اراضی با استفاده از دو نرم‌افزار متلب و سیستم اطلاعات جغرافیایی؛ مطالعه موردی شهر تهران محمد مهدی خلیلی، بهرام ملک محمدی، زهره دهقان منشادی	۱۴۳-۱۵۸
ارزیابی اثرات آتش‌سوزی بر آلودگی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی - فراتحلیلی بر مطالعات موجود بابک امیدوار، رامین سماواتی، مهسا محمدرضا بیگ	۱۵۹-۱۸۱



پیاده‌سازی مولفه‌های منظر شفابخش در فضاهای باز مجتمع‌های مسکونی جهت افزایش پایداری اجتماعی در دوران پسا کرونا (نمونه مطالعاتی: شهرک مسکونی اکباتان)

آزاده رضایی^۱✉، محمدرضا پورزرگر^۲، هادی صادقی^۳، سید مسعود بنی‌هاشمی^۴

۱. دانشجوی دکتری معماری، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.

نویسنده مسئول: rezaeiii_a1992@yahoo.com

۲. استادیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.

۳. دانشجوی دکتری، گروه معماری، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، زنجان، ایران.

۴. کارشناسی ارشد معماری، گروه معماری، دانشگاه غیرانتفاعی علم و هنر یزد، یزد، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌ها: دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۵ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳	با گسترش و شیوع ویروس کرونا، سیاست‌های مختلفی از سوی مسئولین از جمله قرنطینه خانگی و رعایت فاصله اجتماعی اعمال شد که در دراز مدت منجر به آسیب‌های اجتماعی متعدد از جمله تنزل کیفی پایداری اجتماعی گردید. بر اساس تحقیقات صورت گرفته باغ‌های شفابخش باعث افزایش سلامت روحی و جسمی کاربران آن گردیده، لذا بایستی به کاربری این مهم در طراحی فضاهای باز جمعی توجه گردد. این مسئله در کلانشهر تهران با توجه به تراکم جمعیت بالا ملموس است و از آنجایی که شهرک اکباتان پرتراکم‌ترین شهرک مسکونی در استان تهران می‌باشد، پیاده‌سازی راهکارهایی به منظور بهبود پایداری اجتماعی اهمیت بسزایی دارد. هدف این پژوهش امکان‌سنجی کاربری مولفه‌های منظرشفابخش در فضای باز مجتمع‌های مسکونی به منظور افزایش پایداری اجتماعی است. این پژوهش از نوع تحقیقات آمیخته، از منظر هدف کاربردی و از منظر روش‌شناسی توصیفی-تحلیلی و پیمایشی می‌باشد. گردآوری اطلاعات از طریق بررسی‌های کتابخانه‌ای و میدانی و حجم نمونه مورد بررسی ۵۰ نفر از متخصصین می‌باشد. روش تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از آزمون تی‌تست، فریدمن، تحلیل عاملی و روش مدل‌سازی معادلات ساختاری است. بر اساس یافته‌ها بعد «مشارکت» با میانگین رتبه‌ای ۲/۳۵ بیش‌ترین تاثیر را به منظور افزایش پایداری اجتماعی از طریق کاربری مولفه‌های منظرشفابخش در فضای باز مجتمع‌های مسکونی ایفا می‌کند که بر اساس نتایج پژوهش، جهت تحقق این بعد راهبردهایی چون افزایش دسترسی و نفوذپذیری به فضا از طریق بهره‌گیری از گونه‌های متنوع گیاهی و نیز تنوع فضاهای جمعی در عین بهره‌گیری از عناصر طبیعی (گل و گیاه، آب و ...) راهگشا خواهد بود.
واژگان کلیدی: منظر شفابخش فضای باز مجتمع مسکونی اکباتان پایداری اجتماعی کووید-۱۹	

استناد: رضایی، آزاده، پورزرگر، محمدرضا، صادقی، هادی، بنی‌هاشمی، سید مسعود (۱۴۰۴). پیاده‌سازی مولفه‌های منظر شفابخش در فضاهای باز مجتمع‌های مسکونی جهت افزایش پایداری اجتماعی در دوران پسا کرونا (نمونه مطالعاتی: شهرک مسکونی اکباتان). *رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط*، ۲(۲)، ۱۸۱-۱۸۲.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2041254.1056>

© ۱۴۰۴ (۲۰۲۶) نویسندگان مقاله، نشریه رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط، ناشر: سازمان مطالعه و تدوین کتب دانشگاهی در علوم انسانی (سمت).



open Implementing healing landscape components in residential complexes spaces in order to increase social sustainability in the post-corona era (Case study: Ekbatan residential complex)

Azadeh Rezaei¹ ✉, Mohammadreza Pourzargar², Hadi Sadeghi³, Seyed Masoud BaniHashemi⁴

1. PhD student in Architecture, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran. Corresponding author: rezaeiii_a1992@yahoo.com
2. Assistant professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran.
3. PhD Student, Department of Architecture, Technical and Vocational University, Zanjan, Iran.
4. Master of Architecture, Department of Architecture, Yazd Non-Profit University of Science and Art, Yazd, Iran.

Article Info

History

Received: October 17, 2025
Accepted: February 22, 2025

Keywords

Healing landscape
Ekabatan Residential complex
open space
Social sustainability
Covid-19

Abstract

Within the coronavirus spread, societies experienced harmful emotions. Therefore, various policies were implemented, including home quarantine and social distancing, which in long time led to numerous social harms, including decline in social sustainability. According to research, healing Landscapes increased the mental and physical their users health, so attention should be paid to the application of this factor in the public open spaces design. This issue is quite tangible in the Tehran metropolis due to high population density, and since Ekbatan complex is the most densely populated residential complex in Tehran, implementing solutions to improve social sustainability is vital. The research goal is to determine the feasibility of using healing landscape components in residential complexes open space in order to increase social sustainability. This research is a mixed research type, applied in terms of purpose and descriptive-analytical and survey in terms of methodology. Data collection is through library studies and field surveys and the sample size is 50 experts. The method of data analysis is using t-test, Friedman, factor analysis and structural equation modeling method. Based on the research findings, the "participation" dimension, with an average rank of 2/35, has the greatest impact on increasing social sustainability through the application of healing landscape components in residential complexes open space. According to the research results, strategies such as increasing access and permeability to space through using diverse plant species and the diversity of collective spaces while utilizing natural elements (flowers and plants, water, etc.) will be helpful in implementing this dimension.

Citation: Rezaei, A., Pourzargar, M., Sadeghi, H., & Banihashemi, M. (2025). Implementing healing landscape components in residential complexes open spaces in order to increase social sustainability in the post-corona era (Case study: Ekbatan residential complex). *Innovative Approaches in Human–Environment Studies*, 2(2), 1-18.
<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2041254.1056>

© 2025 Authors, Innovative Approaches in Human–Environment Studies.

Publisher: Organization for Researching and Composing University Textbooks in the Humanities (SAMT)

مقدمه

گونه جدید ویروس کرونا در دسامبر ۲۰۱۹ در چین به عنوان علت ذات الریه کشنده شناخته شد. این ویروس به سرعت در سراسر جهان گسترش یافت که در پاسخ به این وضعیت رو به وخامت، سازمان بهداشت جهانی (WHO) در ۱۱ مارس ۲۰۲۰ وضعیتی «همه گیر» را اعلام کرد. کووید-۱۹ به طور فزاینده‌ای یک بیماری سیستمیک شناخته شده است که بسیار فراتر از دستگاه تنفسی تأثیر می‌گذارد (گوپتا و همکاران^۱، ۲۰۲۰:۱۰۱۹). اگرچه بسیاری از تغییرات رفتاری مانند انتقال اطلاعات، دوری از جمعیت‌های انسانی مانند قرنطینه خانگی اجتناب از جمعیت و مشارکت در درمان‌های ضد ویروسی تا اندازه‌ای در کشورهای مختلف اثراتی مثبت داشته است، این تغییرات با وجود اثرگذاری بر سلامت جسمی، عموماً نتوانسته‌اند پیامدهای روانی را از بین ببرند و حتی برخی راهکارها مانند قرنطینه بلندمدت، پیامدهای روانی آسیب‌زایی مانند استرس پس از سانحه، سردرگمی و عصبانیت، ناامیدی، فرسودگی، شکست‌های مالی و برچسب خوردن برای افراد به بار آورده‌اند (جیانگ و همکاران^۲، ۲۰۱۹:۱۷۵۹). چرا که به لحاظ تحقیقات تجربی، آنچه جان آدمیان را در شرایط بحران حفظ می‌کند، پیوستگی اجتماعی آنهاست، نه فاصله آن‌ها از یکدیگر. در بسیاری از سطوح عملیاتی، هدف پایداری اجتماعی در جهت ایجاد فرصت‌های برابر برای انسان‌ها و عدالت در استفاده از بستر کالبدی در عین برابری جنسیتی می‌باشد. در مقیاس معماری، پایداری اجتماعی، طراحی محیطی را مورد بحث قرار می‌دهد که سطح ارتباط و وابستگی میان فرد و بستر کالبدی (محیط مصنوع) را به بیشتری حد دود برساند (کیاسی و کریمی آذری، ۱۴۰۲:۵۵۸). با این حال اهمیت تعاملات، پیوستگی و پایداری اجتماعی در فضاهای مسکونی نسبت به سایر کاربری‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. چرا که وجود نداشتن تعامل اجتماعی در مجتمع‌های مسکونی به تنهاتر شدن افراد و انزوای آنان منجر شده است و این مسأله پیامدهای جبران ناپذیر و ناهنجاری‌های اجتماعی را به دنبال خواهد داشت. تردیدی نیست که کم‌رنگ شدن ارتباط دوستانه همسایگی به عنوان تضعیف سنت مطلوب و تخریب یک نهاد اجتماعی با کارکردهای مثبت و مفید متعدد برای جامعه بشری و به خصوص در کشور ما ضایعه جبران ناپذیری خواهد بود (فتحی، ۱۳۹۱:۶۵). لذا مسئله تنزل کیفی و کمی تعاملات و پایداری اجتماعی در پی آسیب‌های روانی، استرس و اضطراب‌های عوام ناشی از حضور در جمع در فضاهای مجتمع‌های مسکونی در دوران کووید-۱۹ مشهود است. مروری بر نظریات روانشناسان محیط در بخش تأثیر متقابل انسان و محیط نشان می‌دهد که اغلب پژوهشگران و رفتارشناسان علاوه بر معرفی ویژگی‌های این نظریات همواره بر تأثیرات محیط بر سلامت (شفای) جسم و روان انسان تأکید کرده‌اند از این رو رویکردی تحت عنوان شفابخشی را می‌توان به عنوان راهکاری موثر و سودمند در این زمینه مطرح نموده و طراحی محیط‌هایی شامل رویکرد شفابخشی را به علت داشتن عناصر، ویژگی‌ها و کیفیات خاص، موجب کاهش تنش و افزایش سطح سلامت افراد قلمداد کرد. به ویژه در این عرصه، در نظرگیری منطقی با رویکرد شفابخشی تحت عنوان منظر شفابخش، راهکاری حایز اهمیت در جهت کاهش یا رفع مسائل مربوطه به نظر می‌رسد. ایده باغ‌های شفابخش بین منظر و سلامت ارتباطی قوی می‌یابد (کوپر و بارنرز^۳، ۱۹۹۹:۱۸). افراد مختلفی در رابطه با اهمیت ارتباط انسان با محیط طبیعی و کاربست باغ‌های شفابخش نظریات متعددی ارائه داده‌اند. در تحقیقی توسط اشرودر^۴ انجام شد، مشخص گردید مناظر طبیعی دارای آب و گیاه در مقایسه با محیط‌های شهری بدون فضای سبز و طبیعت باعث ایجاد آرامش و استرس کمتری در بینندگان می‌شود (توکل و ماجدی، ۱۳۹۲).

1. Gupta et al
2. Jiang et al
3. Cooper & Barnes
4. Schroder

در یک جمع بندی مسئله اصلی مورد بحث در این پژوهش، افزایش اضطراب و فشارهای روانی مردم به منظور حضور در فضاهای جمعی در دوران کرونا و تداوم این بحران در دوران پساکرونا می باشد که منجر به کاهش حضورپذیری و تعاملات اجتماعی و در ادامه آن تنزل کیفی پایداری اجتماعی در تمامی کاربری ها از جمله فضاهای عمومی جمعی گردیده است. در واقع کاهش تعاملات اجتماعی در جامعه، معضلاتی را در سطوح مختلف فردی و جمعی به همراه می آورد که از آن جمله می توان به کاهش سلامت ذهنی و جسمی و کاهش امید به زندگی در افراد اشاره کرد. پیشرفت این مسائل باعث کاهش رضایت از زندگی و از بین رفتن انسجام اجتماعی می شود. این افزایش اضطراب حضور در فضاهای جمعی در شهرک های مسکونی با تراکم جمعیت بالا نسبت به سایر ساختمان های مسکونی ملموس است. شهرک اکباتان به عنوان وسیع ترین و پرجمعیت ترین شهرک مسکونی در کلانشهر تهران و با توجه به موقعیت استراتژیک و خاص آن، نقش بسزایی در تسهیل فعالیت های کاربران آن، برقراری تعاملات اجتماعی و ایجاد آرامش و افزایش رضایتمندی، جهت حضور تمام گروه های سنی و جنسی ایفا می نمایند و عدم توجه به شیوه های مطلوب مشارکت پذیری در سطح فردی و جمعی، که در دوران پساکرونا در پی ترس از حضور در اجتماع در میان افراد شاهد آن هستیم، منجر به افزایش جرم خیزی، بزهکاری و کاهش امنیت می شود و در دراز مدت کاهش پایداری اجتماعی را در پی خواهد داشت. لذا ارتباط هرچه بیشتر با طبیعت از طریق طراحی یاغ های شفافبخش باعث بهبود حس تعلق به مکان، حضورپذیری و افزایش تعاملات و پایداری اجتماعی می گردد. بر این اساس هدف اصلی این پژوهش بررسی و امکان سنجی کاربری مولفه های منظرشفابخش در فضای باز مجتمع های مسکونی به منظور افزایش پایداری و تعاملات اجتماعی میان ساکنین در دوران پساکرونا می باشد. به منظور تحقق هدف اصلی این پژوهش بایستی به سوالات زیر پاسخ داده شود:

۱. چه ارتباطی میان شفابخشی فضاهای باز و پایداری اجتماعی وجود دارد؟
۲. محدودیت ها و فرصت های موجود در فضای باز شهرک اکباتان به منظور کاربری منظر شفابخش در دوران پساکرونا چیست؟
۳. چه راهبردهایی را می توان بر اساس مولفه های منظرشفابخش به جهت افزایش پایداری اجتماعی در فضاهای باز مسکونی ارائه نمود؟

پیشینه و مبانی نظری تحقیق

ویروس منحوس کرونا در جهان امروز از یک اپیدمی محلی در ووهان چین در شرق به صورت یک پاندمی جهانگیر تا غرب عالم امتداد پیدا کرد. از زمانی که کرونا و واژه کووید - ۱۹ در ذهن ها جا باز کرد، زندگی فردی و اجتماعی انسان دستخوش تغییرات عدیده ای شد طوری که مردم برای ادامه زندگی با چالش هایی مواجه شدند و تمامی ابعاد زندگی شان تحت تأثیر قرار گرفت. کرونا ویروس ها خانواده بزرگی از ویروس ها هستند که می توانند عامل بروز بیماری هایی مانند یک سرماخوردگی ساده تا بیماری های شدیدتری چون سندرم نارسایی تنفسی خاورمیانه یا اصطلاحاً مرس یا حتی شدیدتر سارس شوند. بحران کرونا رویدادی اضطرابی است که وضعیتی خطرناک و ناپایدار برای جوامع ایجاد کرده و باعث به وجود آمدن وضعیتی شده است که برای مقابله با آن، به اقدامات اساسی و جدید نیاز است. سبک زندگی بسیاری از مردم در رده های سنی در ایام پساکرونا بی تفاوتی بوده است؛ به نحوی که تغییرات حادث شده در دوران نوین پساکرونا بی، باعث تجربه سبک های جدیدی از زندگی در میان مردم شده است (تاج بخش، ۱۳۹۹: ۳۴۲)، که یکی از اساسی ترین تغییرات بر نحوه تعاملات اجتماعی مشهود است. توجه به انسان در مبانی توسعه پایدار، بیش از آن که در حقوق عمومی برای بهره برداری از نتایج توسعه

خلاصه شود، با هدف اجتماعات انسانی در راستای دستیابی به توسعه پایدار مرتبط است (شفیعا و شفیع، ۱۴۷: ۱۳۹۳). جان لنگ در تعریف توسعه پایدار اجتماعی بر خواست مردم برای زندگی در یک مکان معین اشاره داشته و بر توانایی در جهت استمرار چنین روندی هم در حال و هم در آینده، تأکید می کند (لنگ، ۸۷: ۱۳۹۵). هریک از ابعاد پایداری اجتماعی، می تواند به عنوان یکی از مهم ترین و کلیدی ترین ابزار در برنامه ریزی ها و سیاست گذاری های شهری محسوب شود. بر اساس دیدگاه نظریه پردازان متعدد سه مولفه اصلی؛ (۱) مشارکت (پیوستگی و مشارکت اجتماعی)، (۲) امنیت (امنیت اجتماعی و اعتماد اجتماعی)، (۳) کیفیت زندگی (بعد عینی و ذهنی) از جمله مهم ترین ابعاد پایداری اجتماعی می باشند (نسترن و همکاران، ۱۵۸: ۱۳۹۲). با این حال نمی توان از اهمیت شفابخشی فضای جمعی در جهت کاهش اضطراب و اجتماع پذیری چشم پوشی نمود. شفابخشی خاصیتی است که طی آن سلامت روان تامین شده و به کاهش استرس و افزایش تجدید قوا می انجامد. همچنین اصطلاحی است که به طور مکرر برای مناظری به کار رفته که آسایش را ارتقا داده و به حفظ سلامت کمک می کند و آنالیز آنچه که روی بازدید کننده تاثیر می گذارد از اهداف آن است. باغ های شفابخش باعث ارتقاء سلامت بیماران عاطفی و جسمی می شود. در واقع این باغ ها با برقراری ارتباط با حواس پنجگانه انسان باعث شفابخشی می شود. مهمترین حسی که باغ های شفابخش به اشخاص می بخشد احساس آرامش و حیات است و می توان گفت راز موفقیت این باغ ها در کشش ذاتی انسان به سوی طبیعت است (علی عباس زاده رضائی و همکاران، ۱۹: ۱۴۰۱). (شکل ۱-)



شکل ۱ بهره گیری از عناصر باغ شفابخش در فضای سبز با الگوی باغ ایرانی

به گفته کوپر و بارنز دو اصل کلی در منظر شفابخش مورد توجه قرار میگیرد که عبارتند از: (۱) مشاهده مناظر طبیعی و ارتباط با طبیعت؛ (۲) پاسخ محیط به تعاملات اجتماعی و نیازهای فردی. آنان معتقدند اصول طراحی مناظر شفابخش در راستاء ایجاد اهدافی به کار گرفته میشوند که عبارتند از: خلق حس امنیت در فضا، ایجاد خوانایی در منظر، فرصت هایی برای انتخاب (به دنبال خلوت شخصی یا ملحق شدن به گروه های جمعی بودن (حمایت اجتماعی))، ایجاد زمینه مناسب برای آرامش ذهنی، فراهم کردن زمینه های ارتباط، انس و آشنایی با طبیعت (کوپر و بارنرز، ۲۱: ۱۹۹۹). با این حال نظریه پردازان متعددی، تحقیقات بسیاری را در ارتباط با مولفه های باغ و منظر شفابخش انجام داده اند که تعدادی از مهم ترین آن ها به شرح زیر دسته بندی گردیده اند: (جدول ۱-)

جدول ۱ پیشینه دیدگاه نظریه پردازان در ارتباط با مولفه های منظر شفابخش (استخراج نگارندگان)

دیدگاه	نظریه پرداز
ضرورت ایجاد منظر شفابخش از طریق راهبردهایی چون خوانایی، خلق حس امنیت، خلق ویژگی های مثبت و واضح در طراحی و ایجاد فرصت هایی برای انتخاب اجتماع یا خلوت و همچنین به حداقل رسانیدن ابهام	(سی جر ^۱ ، ۲۰۱۴) (کوپر و بارنرز، ۱۹۹۹)
سهولت حرکت کاربر درفضا، قابلیت درک راحت در ایجاد منظر شفابخش ضروری است	(رالینگ ^۲ ، ۲۰۱۲)
موجودیت عناصر طبیعی و لزوم بهره گیری از آنها و همچنین حضور آب در میان گونه های گیاهی مختلف	(شکل ^۳ ، ۲۰۱۲)
انسجام اجتماعی، امنیت، تحرک و فعالیت های بدنی و ایجاد خوانایی	(کوپر و بارنرز، ۱۹۹۹) (فرنس و همکاران ^۴ ، ۲۰۰۵)
موسیقی، بوی خوش، صدا، نور و روشنی، رنگ	(کلینبرگ ^۵ ، ۲۰۱۲)

در یک نگاه کلی می توان مولفه های ذکر شده در پژوهش های پیشین را در دو دسته عناصر منظر محسوس و نامحسوس یا ذهنی قرار داد. عناصر نامحسوس یا ذهنی منظر، اشاره به مفاهیمی دارند که عینیت نداشته و تنها از طریق ذهن قابل درک می باشند. نقش انگیزی و خوانایی، امنیت، پاکیزگی، معنا، تنش و دسترسی، از جمله عوامل ذهنی عنوان شده می باشند. در مقابل آن عناصر محسوس، آن دسته از عناصرند که توسط حواس پنجگانه انسان ادراک شده و به صورت مستقیم یا غیر مستقیم بر مولفه های شفابخشی تاثیر گذارند (رزم آرا و تقی پور، ۱۳۹۹: ۱۳۴).

همانگونه که پیش تر ذکر گردید، بی توجهی به عوامل اجتماعی در خلال فرآیند توسعه پایدار جوامع و شهرها، اثربخشی برنامه های توسعه ای را با مشکل رو به رو می کند. در همین راستا اتحادیه اروپا^۶ در لیسبون و در سال ۲۰۰۰ مباحث اجتماعی را جز جدایی ناپذیر از توسعه پایدار مطرح نمود (سامولسون و همکاران^۷، ۲۰۰۴). مفهوم پایداری اجتماعی در تقابل و انتقاد برخی نظریه پردازان و صاحب نظران نسبت به رویکرد مدرنیسم شکل گرفت، این نظریات ابتدا از حوزه فلسفه شروع به شکل گیری کرد و سپس در سیری مورو به شهرسازی و معماری وارد شد (غفوریان و همکاران، ۱۳۹۶: ۳۲). چوگول^۸ (۲۰۰۸) از جمله نظریه پردازان حوزه پایداری، اذعان می دارد که از جمله اصول مرتبط با توسعه پایدار به لحاظ اجتماعی تاکید بر تعاملات اجتماعی، مشارکت، احساس تعلق، روابط بین فردی بین ساکنین و همسایه ها، فعالیت جمعی، حمایت متقابل، ایمنی و دسترسی تسهیلات می باشد (زارع و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۰۴). با این حال با بررسی های انجام شده، یکی از پیامدهای اجتماعی همه گیری ویروس کرونا ترس از حضور در جامعه و کاهش تعاملات و پایداری اجتماعی میان مردم است که به منظور کاهش بار روانی و استرس های ناشی اجتماع پذیری در فضاهای شهری دیدگاه های متعددی از سوی نظریه پردازان ارائه گردیده است؛ ویلبرت ام. گسler^۹ (۱۹۹۱)، با تبیین مفهوم «منظر شفابخش» تلاشی پیگیر برای احیای مفهوم سلامت به عنوان کیفیتی کمتر طبی و بیشتر مرتبط با تجربه های زندگی روزمره می نماید و به علت عدم کفایت نوآوری های پزشکی عصر حاضر برای درمان، گرایش دوباره به مناظر درمان گر را امری ضروری تلقی می کند. در همین راستا «پالکا»^{۱۰} باغ های درمانی را به عنوان «مکان سلامتی که به وسیله فراهم آوردن ترمیم، مراقبه شفای ذهن و روح، جسم؛ تندرستی و فرآیند شفا را ارتقاء می بخشد» تعریف می کند. از نظر

1. Say Jer
2. Rawling
3. Shackell
4. France et al
5. Klinberg
6. European Council (EC)
7. Samuelsson et al
8. Choguill
9. Gesler
10. Palca

پالکا دو اصل مهم در این تعریف عبارت‌اند از: فواید درمانی بودن در منظر (تعامل فیزیکی مستقیم با محیط) و آثار درمانی ارتباط ذهنی- روانی با منظر طبیعی (به وسیله تجربیات حسی). (سعیدیان و همکاران، ۱۳۹۴). شناسایی مولفه‌های تاثیرگذار بر پایداری اجتماعی و بررسی ارتباط آن با مولفه‌های منظر شفابخش با بررسی دیدگاه صاحب نظران و مبانی نظری صورت گرفته است که به شرح زیر قابل ارائه است:

جدول ۲ روابط میان متغیرهای تحقیق (نگارندگان)

پایداری اجتماعی	مولفه‌های منظر شفابخش و راهبردهای طراحی	منبع
مشارکت	افزایش حس تعلق به مکان افزایش و تنوع فضاهای جمعی در عین بهره‌گیری از عناصر طبیعی سهولت حرکت کاربر درفضا قابلیت نفوذپذیری و دسترسی مطلوب به فضا از طریق بهره‌گیری از گونه‌های گیاهی	(رزم‌آرا و تقی‌پور، ۱۳۹۹: ۱۳۶) (سعیدیان و همکاران، ۱۳۹۴) (Rawling, 2012)
کیفیت	بهره‌گیری از عنصر آب و گونه‌های مختلف گیاهی به منظور ارتقا سرزندگی و نشاط کاربران کاهش صدای نامطلوب محیطی به کمک نظام آواها یکپارچگی بصری عناصر گیاهی از داخل به خارج از ساختمان یکپارچگی طراحی فضای باز مجتمع مسکونی با ویژگی‌های بومی/محلی	(زارع و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۰۷) (Shackell, 2012) (غفوریان و همکاران، ۱۳۹۶: ۳۶)
امنیت	به حداقل رساندن ابهام در طراحی (خوانایی فضا) تعیین قلمروها (حریم‌ها) با بهره‌گیری از گونه‌های مختلف گیاهی رعایت سلسله مراتب دسترسی از فضای عمومی تا خصوصی امکان انتخاب و ایجاد تعادل میان خلوت‌گزینی و تعامل	(رزم‌آرا و تقی‌پور، ۱۳۹۹: ۱۳۵). (say jer, 2014). (Cooper & Barnes, 1999)

مروری بر پیشینه تحقیقاتی

پژوهش‌های متعددی در ارتباط با اهمیت منظر و باغ‌های شفابخش و تاثیر درمانی این فضاها بر کاربران آن از طریق بهبود تعاملات اجتماعی صورت گرفته است. هاشمین و بمانیان در سال ۱۴۰۱ در پژوهشی تحت عنوان «تحلیل تطبیقی باغ‌های شفابخش با باغ‌های ایرانی» به این مهم نائل گردیدند که بیشترین درصد انطباق باغ ایرانی با شاخص‌های یک باغ شفابخش مربوط به شاخص تحریک حسی و امکان دسترسی به طبیعت و تعامل با آن است و لازم است طراحان برای افزایش اثربخشی و کارایی باغ ایرانی با کارکرد شفابخشی، راهکارهایی نوآورانه در جهت بهبود عرصه‌های خصوصی و نیز ایجاد تنوع فضایی بیشتر برای انتخاب، در اختیار کاربر قرار دهند. علی‌عباس‌زاده و همکاران در سال ۱۴۰۱ در پژوهشی تحت عنوان «مشارکت بیماران روحی در فرآیند طراحی باغ‌های شفابخش به منظور بالابردن پایداری اجتماعی در مراکز درمانی» به این مهم دست یافتند که از میان رویکردهای مشارکت، رویکرد تاویلی به عنوان رویکرد اصلی در طراحی معرفی شد. در تمامی این رویکردها نوع مشارکت بیماران به دلیل خاص بودن آنها و محدودیت‌های شخصی افراد، به صورت غیر مستقیم در طرح مطرح است. گلچین و همکاران در سال ۱۴۰۰ در پژوهشی تحت عنوان «بررسی اهمیت طراحی باغ‌های شفابخش در محوطه دانشگاه‌ها در راستای ارتقاء مطلوبیت فضایی: نمونه موردی دانشگاه سیستان و بلوچستان» به این نتیجه رسیدند طراحی و احداث بوستان‌های شفابخش در محوطه دانشگاه‌ها می‌تواند از طریق ارتقاء کیفیت بصری و مطلوب نمودن کیفیت فضاهای محوطه دانشگاه سیستان و بلوچستان باعث ایجاد تاثیرات مثبت بر سلامت روح و روان کاربران شود. از این رو طراحی و احداث اینگونه باغ‌ها در محوطه دانشگاه‌ها توصیه می‌شود.

طاهری و شبانی در سال ۱۳۹۵ در پژوهشی تحت عنوان «اصول مفهومی و کاربردی طراحی باغ‌های شفابخش برای جانبازان با تمرکز بر تئوریهای کاهش استرس - مطالعه مروری» استفاده از باغ‌های شفابخش ویژه جانبازان، تاثیرات مثبتی بر سلامت جانبازان از طریق کاهش فشار خون، کاهش ضربان قلب، کاهش افسردگی و غیره دارد. بیشترین کارایی باغ‌های شفابخش برای جانبازان زمانی است که طراحی این باغ‌ها مبتنی بر کاهش استرس باشد. ونگ^۱ در سال ۲۰۲۳ در پژوهشی تحت عنوان «دستورالعمل طراحی باغ‌های شفابخش در بیمارستان عمومی» به تشویق و توسعه طراحی باغ‌های شفا به عنوان ابزار پزشکی پیشگیرانه در محیط‌های مراقبت‌های بهداشتی می‌پردازد. این تحقیق با ارائه یک روش جامع و یک نمونه مطالعه موردی، در تلاش است تا پذیرش و استفاده گسترده‌تر از باغ‌های شفابخش را در محیط‌های مراقبت‌های بهداشتی تحریک کند. عمر^۲ و همکاران در سال ۲۰۲۱ در پژوهشی تحت عنوان «نقش باغ‌های شفابخش در پایداری اجتماعی برای باغ‌های عمومی» به این مهم دست یافتند که باغ‌های شفابخش از طریق استفاده از مواد طبیعی، کشت گیاهان محلی، سازگار با اقلیم محلی، و افزایش تعامل اجتماعی و حسی با منظر، به طور مؤثری به دستیابی به پایداری چشم‌انداز برای باغ عمومی کمک می‌کنند. پژوهش‌های مذکور نشان از اهمیت باغ‌ها و مناظر شفابخش و نیز تاثیرگذاری آنها جهت بهبود سلامت روحی و جسمی کاربران آن است. در پژوهش‌های پیشین تمرکز بیشتر پژوهشگران بر کاربری این باغ‌ها در مراکز درمانی بوده و به طراحی این باغ‌ها در فضاهای باز مجتمع‌های مسکونی به منظور افزایش حضورپذیری، تعامل و نهایتاً پایداری اجتماعی توجه لازم مبذول نگردیده است. لذا جنبه نوآوری این پژوهش از این حیث قابل ارائه است.

روش تحقیق

این پژوهش از نوع تحقیقات آمیخته (کمی و کیفی) بوده و از نظر هدف کاربردی است. به منظور نیل به هدف اصلی و پاسخ به پرسش‌های پژوهش، از روش تحقیق توصیفی-تحلیلی و پیمایشی بهره گرفته شد. در بخش اول (کیفی) پژوهش به صورت توصیفی و نظری به بررسی و جمع‌آوری مبانی نظری پیرامون عوامل تاثیرگذار بر پایداری اجتماعی و مولفه‌های باغ شفابخش پرداخته شد و بر اساس آن چارچوب نظری تحقیق ارائه گردید. در ادامه به منظور بررسی وضع موجود در نمونه مطالعاتی (شهرک اکباتان) از منظر پایداری اجتماعی در دوران کرونا و پساکرونا و امکان سنجی بهره‌گیری از مولفه‌های باغ شفابخش از تکنیک سوات بهره گرفته شد. در ادامه و در بخش دوم (کمی) پژوهش بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای صورت گرفته و نیز مشاهدات میدانی در شهرک اکباتان، پرسشنامه بسته به منظور ارائه راهبردهای تخصصی در اختیار جامعه آماری متخصص قرار داده شد. به منظور بررسی روایی متغیرهای تحقیق، از نرم افزار pls استفاده شد و بر اساس بررسی‌های انجام شده مولفه‌ها از روایی همگرا و واگرایی مطلوب برخوردار بودند.

حجم نمونه این پژوهش شامل ۵۰ نفر از شهرسازان، برنامه ریزان شهری متخصص در حوزه طراحی فضاهای باز شهری و نیز اساتید دانشگاهی متخصص در حوزه علوم روانشناختی محیط می باشد. نحوه انتخاب حجم نمونه به صورت هدفمند است چرا که این تکنیک امکان تعمیم پذیری بیشتری را با توجه به حس اعتماد مشارکت کننده به دست می‌دهد. روش تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از پرسشنامه‌ها با استفاده از آزمون تی تست، فریدمن، تحلیل عاملی و روش مدلسازی معادلات ساختاری می‌باشد که در این بخش از پژوهش از دو نرم افزار Smartpls3 و Spss22 استفاده می‌شود. نقشه هوایی و پراکنندگی فضاهای باز در شهرک اکباتان مطابق با شکل ۲ قابل ارائه است:



شکل ۲ نقشه هوایی و پراکندگی فضای سبز شهرک اکباتان

محدوده مورد مطالعه

«شهرک اکباتان» به عنوان یکی از بزرگترین شهرک های خاورمیانه، در شمال جاده ی مخصوص کرج و در کیلومتر ۵ میدان آزادی تهران واقع بوده و بر اساس نظام تقسیمات کالبدی شهرداری تهران، بخشی از ناحیه ۶ منطقه ۵ محسوب میشود. ناحیه ای به نسبت گسسته از ساختار کل منطقه که تنها، موقعیت جغرافیایی آن سبب تجمع آن با سایر نواحی منطقه شده است. در این میان شهرک اکباتان به عنوان یکی از نخستین تجربیات نظام شهرسازی ایران در زمینه بلند مرتبه سازی و به واسطه ی موقعیت مکانی آن که در یکی از مبادی ورودی پایتخت واقع شده، نه تنها در سطح منطقه، بلکه در سطح شهر نیز واجد جایگاه و اهمیت خاصی است (استرابی آشتیانی و همکاران، ۱۳۹۹: ۴۰). پژوهشگران با حضور در فضای سبز شهرک مسکونی اکباتان و مشاهدات میدانی به بررسی وضع موجود در فضای باز شهرک به منظور کاربست مولفه های منظر شفابخش پرداختند که به شرح زیر قابل ارائه می باشد: (جدول-۳)

جدول ۳ ارزیابی عوامل داخلی و خارجی تاثیر گذار بر کاربست مولفه های منظر شفابخش (مشاهدات نگارندگان)

شاخص ها	عوامل داخلی		عوامل خارجی	
	نقاط ضعف	نقاط قوت	فرصت	تهدید
مشارکت	- حضور نماد و نشانه های اندک در فضای باز شهرک - سامان دهی منفرد و ردیفی فضاهای نشستن افراد - تعدد فضاهای باز و درهم تنیده در فضای باز شهرک اکباتان	- مشارکت و پیوندهای اجتماعی مطلوب در پارک - تعدد و توالی فضاها - سادگی طراحی فضای باز مجموعه و عدم ابهام در طراحی	- حس تعلق به مکان بالا در میان ساکنین - امکان دسترسی های متعدد به فضاهای باز - وجود فضاهای متعدد برای نشستن و استراحت - تنوع پوشش های گیاهی	- تراکم فضایی و عملکردی بالا در شهرک اکباتان - عدم هماهنگی الگوی طراحی فضای باز با بستر فرهنگی و بومی شهرک - عدم همگونی اجتماعی در شهرک اکباتان



ادامه جدول ۳ ارزیابی عوامل داخلی و خارجی تاثیر گذار بر کاربست مولفه های منظر شفافبخش (مشاهدات نگارندگان)

شاخص ها	عوامل داخلی		عوامل خارجی	
	نقاط ضعف	نقاط قوت	فرصت	تهدید
کیفیت 	-حضور کم عنصر آب در مجموعه -رعایت نسبتا نامطلوب بهداشت در فضاهای خدماتی	-تنوع پوشش گیاهی در فضای باز شهرک -وجود عناصر زیباشناسانه محیط	-وجود فضاهای سبز و بایر متعدد در شهرک به منظور توسعه عناصر منظر شفافبخش -دسترسی و تسهیلات مطلوب برای کاربران شهرک	-آلودگی هوا -تداخل صوتی منفی (وجود بزرگراه، مدرسه، خیابان)
امنیت  	-عدم رعایت مطلوب سلسله مراتب دسترسی -عدم امکان نظارت بر تمامی فضاهای باز -عدم بهره گیری از چیدمان انعطاف پذیر در فضای باز مجموعه به منظور تنظیم خلوت/اجتماع پذیری کاربران	-خوانایی نسبتا مطلوب کاربران از محیط -رعایت مقیاس ها و تناسبات انسانی -حریم بصری نسبتا مطلوب کاربران فضای باز شهرک -روشنایی و ایمنی مسیرهای حرکتی	-وجود روابط بین فردی میان ساکنین و همسایه ها و اعتماد جمعی -مشارکت و پایایی جمعی در فضای باز و بسته شهرک -حس تعلق به مکان و رضایتمندی بالای ساکنین نسبت به محل سکونت خود	-وجود فضاهای بلا استفاده -وجود فضاهای کور -عدم امکان کنترل بر ورود و خروج -سایه اندازی بلوک های ساختمانی و عدم امکان استفاده حداکثری از نور طبیعی در فضای باز

یافته های پژوهش

در ابتدا بایستی ضرایب گویه ها و پایایی مقیاس های انتخابی برای اندازه گیری متغیرهای مکنون بررسی شود. طبق جدول ۴ میزان بارهای عاملی و ضرایب معناداری بین گویه های هر سازه تعیین شده است که ضریب t بالای ۱/۹۶ نشان از ارتباط معناداری بین گویه ها و مؤلفه ها وجود دارد. پایایی آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی بالاتر از ۰/۷ نشانگر پایایی قابل قبولی است (داوری و رضازاده، ۱۳۹۳: ۱۰۶) که در این پژوهش همه گویه ها پایایی مطلوبی دارند (جدول ۴-)

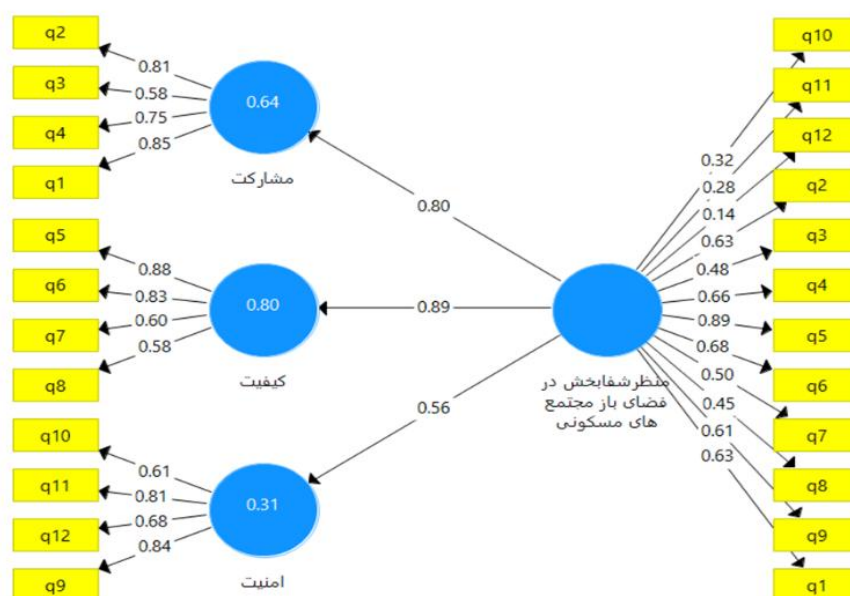
جدول ۴ ضرایب گویه ها و ضرایب پایایی های متغیرها

متغیر	ابعاد	گویه	متغیرهای آشکار		متغیرهای پنهان	
			بار عاملی	ضریب معناداری	آلفا	پایایی ترکیبی
منظر شفافبخش در فضای باز مجتمع های مسکونی	مشارکت	قابلیت نفوذپذیری و دسترسی مطلوب به فضا از طریق بهره گیری از گونه های گیاهی	۸۵/۰	۸۷/۶	۷۴/۰	۸۴/۰
		افزایش و تنوع فضاهای جمعی در عین بهره گیری از عناصر طبیعی	۸۱/۰	۲۰/۶		
		سهولت حرکت کاربر در فضا	۵۸/۰	۴۴/۳		
		افزایش حس تعلق به مکان	۷۵/۰	۲۷/۷		

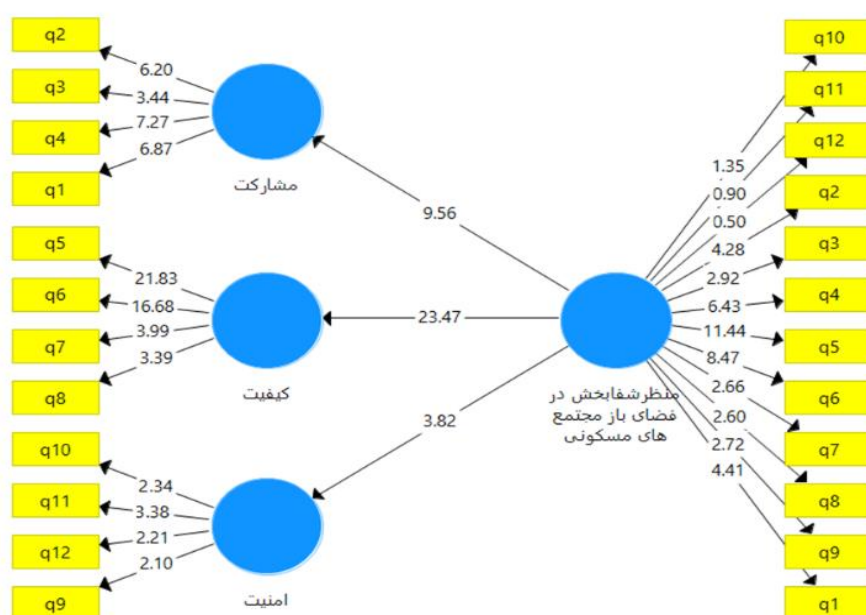
ادامهٔ جدول ۴ ضرایب گویه‌ها و ضرایب پایایی‌های متغیرها

متغیر	ابعاد	گویه	متغیرهای آشکار		متغیرهای پنهان	
			بار عاملی	ضریب معناداری	آلفا کرانباخ	پایایی ترکیبی
منظرشفابخش در فضای باز مجتمع های مسکونی	کیفیت	بهره گیری از عنصر آب و گونه های مختلف گیاهی به منظور ارتقا سرزندگی و نشاط کاربران	۸۸/۰	۸۳/۲۱	۷۱/۰	۸۲/۰
		کاهش صدای نامطلوب محیطی به کمک نظام آواها	۸۳/۰	۶۸/۱۶		
		یکپارچگی بصری عناصر گیاهی از داخل به خارج از ساختمان	۶۰/۰	۹۹/۳		
		یکپارچگی طراحی فضای باز مجتمع مسکونی با ویژگی های بومی/محلی	۵۸/۰	۳۹/۳		
امنیت		به حداقل رساندن ابهام در طراحی (خوانایی فضا)	۸۴/۰	۱۰/۲	۷۷/۰	۸۳/۰
		تعیین قلمروها(حریم ها) با بهره گیری از گونه های مختلف گیاهی	۶۱/۰	۳۴/۲		
		رعایت سلسله مراتب دسترسی از فضای عمومی تا خصوصی	۸۱/۰	۳۸/۳		
		امکان انتخاب و ایجاد تعادل میان خلوت گزینی و تعامل	۶۸/۰	۲۱/۲		
مجموع	۷۸/۰ ۸۳/۰					

پس از انجام تحلیل عاملی تأییدی مرتبه اول و استخراج گویه‌های حائز بار عاملی معنادار، نسبت به بررسی پایایی و روایی گویه‌ها اقدام گردید. در این راستا، با استفاده از مدل ساختاری روابط بین سازه‌ها به لحاظ علی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی معنی‌داری ضرایب مسیر از روش بازنمونه‌گیری در حالت ۱۰۰۰ نمونه که در روش حداقل مربعات جزئی توصیه شده (داوری و رضازاده، ۱۳۹۳؛ ۱۰۱) استفاده شد. نتایج در نمودارهای ۱ و ۲ نشان می‌دهد که مدل از اعتبار خوبی برخوردار است.



نمودار ۱ بار عاملی و ضریب تعیین مدل اندازه‌گیری



نمودار ۲ ضرایب معناداری آزمون t مدل اندازه گیری

بررسی روایی و اگرای متغیرهای پژوهش

طبق نتایج حاصل در جدول ۵ میزان همبستگی بین شاخص‌های یک سازه با آن سازه و میزان همبستگی بین شاخص‌های یک سازه با سازه‌های دیگر مقایسه می‌گردد. مقدار همبستگی میان شاخص‌ها با سازه‌های مربوط به خود (اعداد رنگی ماتریس) از همبستگی میان آن‌ها و سایر سازه بیشتر است که این مطلب گواه مناسب بودن روایی و اگرای بارهای عاملی متقابل^۱ است (طباطبائی و جهانگرد، ۱۳۹۵؛ ۹۷).

جدول ۵ روایی و اگرا به روش بارهای عاملی متقابل

گوپه ها	مشارکت	کیفیت	امنیت
۱q	۸۵/۰	۳۶/۰	۱۶/۰
۲q	۸۱/۰	۴۴/۰	۰۶/۰
۳q	۵۸/۰	۴۰/۰	۰۱/۰
۴q	۷۵/۰	۵۰/۰	۱۴/۰
۵q	۷۶/۰	۸۸/۰	۲۷/۰
۶q	۳۹/۰	۸۳/۰	۲۶/۰
۷q	۱۳/۰	۶۰/۰	۴۳/۰
۸q	۱۶/۰	۵۸/۰	۲۶/۰
۹q	۲۱/۰	۵۲/۰	۸۴/۰
۱۰q	۱۰/۰	۱۹/۰	۶۱/۰
۱۱q	۰۳/۰-	۱۰/۰	۸۱/۰
۱۲q	۱۴/۰-	۰۱/۰	۶۸/۰

بررسی شاخص نیکوی برازش

کیفیت مدل ساختاری توسط شاخص قدرت پیش بینی Q^2 نیز محاسبه شد، هدف این شاخص بررسی توانایی مدل ساختاری در پیش بینی کردن به روش چشم پوشی ۱ می‌باشد. که براساس این ملاک مدل باید نشانگرهای متغیرهای مکنون درون را انعکاسی را پیش بینی کند. مقادیر مثبت و بالای صفر نشان می‌دهند که مقادیر مشاهده شده خوب بازسازی شده‌اند و می‌توان گفت مدل ساختاری از کیفیت مناسبی برخوردار است (طباطبائی و جهانگرد، ۱۳۹۵؛ ۹۸). شاخص نیکوی برازش طبق فرمول زیر محاسبه می‌شود. سه مقدار ۰/۰۱، ۰/۲۵ و ۰/۳۶ را بعنوان مقادیر ضعیف، متوسط و قوی معرفی نمودند که با محاسبه‌ی که از مدل انجام شد. (جدول-۶)

$$\sqrt{0.52 \times 0.58} = 0.55 = \sqrt{\text{روایی همگرا} \times \text{محدود ضریب تعیین}}$$

جدول ۶ شاخص‌های کیفیت مدل ساختاری متغیرهای درون‌زا

نیکوی برازش	قدرت پیش بینی Q^2			ضریب تعیین	روایی همگرا	متغیرهای مکنون وابسته
	$Q^2 = 1 - SSE/SSO$	SSE	SSO			
۰/۵۵	۳۳/۰	۷۷/۱۳۳	۰/۲۰۰	۶۴/۰	۵۷/۰	مشارکت
	۳۹/۰	۲۷/۱۲۲	۰/۲۰۰	۸۰/۰	۵۴/۰	کیفیت
	۱۱/۰	۵۳/۱۷۷	۰/۲۰۰	۳۱/۰	۵۵/۰	امنیت
	-	۰/۶۰۰	۰/۶۰۰	-	۴۱/۰	منظر شفابخش در فضای باز مجتمع‌های مسکونی

آزمون t متغیرهای تحقیق

برای بررسی وضعیت متغیرهای مورد مطالعه از آزمون t یک نمونه‌ای استفاده شد. نتایج حاصل از این آزمون در جدول زیر آورده شده است. برای امتیازدهی، میانگین مجموع نمرات سؤالات هر مؤلفه به عنوان مبنا در نظر گرفته شد و با توجه به طیف پنج درجه‌ای لیکرت نقطه برش طیف میانی پرسشنامه، دو بود که در پژوهش حاضر معیار مقایسه میانگین بدین صورت بود که میانگین تجربی (۳/۱-۱) در سطح نامطلوب و (۳/۱-۵) در سطح مطلوب ارزیابی شد؛ در واقع این طیف، بر اساس میزان عددی طیف لیکرت که در پرسشنامه پژوهش ارائه گردیده تنظیم شده است. بنابراین میانگین ملاکی در سطح مطلوب برابر با ۳/۱ می‌باشد (جدول-۷)

جدول ۷ آزمون t وضعیت گویه‌های منظر شفابخش در فضای باز مجتمع‌های مسکونی

ابعاد	متن گویه	میانگین ملاکی = ۳/۱ df=۴۹					آزمون فریدمن	
		میانگین تجربی	تفاوت میانگین	T	معناداری	میانگین رتبه	رتبه	
تجربه	قابلیت نفوذپذیری و دسترسی مطلوب به فضا از طریق بهره‌گیری از گونه‌های گیاهی	۵۸/۴	۴۸/۱	۱۹/۴۵	۰۰/۰	۴۵/۳	۱	
	افزایش و تنوع فضاهای جمعی در عین بهره‌گیری از عناصر طبیعی	۱۶/۴	۰۶/۱	۱۰/۱۵	۰۰/۰	۷۹/۲	۲	
	سهولت حرکت کاربر در فضا	۲۴/۳	۱۴/۰	۱۴/۱	۲۶/۰	۷۳/۱	۴	
	افزایش حس تعلق به مکان	۵۴/۳	۴۴/۰	۹۵/۳	۰۰/۰	۰۳/۲	۳	
	مجموع	۸۸/۳	۷۸/۰	۱۴/۴۳	۰۰/۰	خی دو = ۶۶/۶۲	معناداری ۰/۰۰ =	

ادامه جدول ۷ آزمون t وضعیت گویه‌های منظرشفا بخش در فضای باز مجتمع‌های مسکونی

ابعاد	متن گویه	میانگین ملاکی = ۳/۱ df=۴۹					آزمون فریدمن	
		میانگین تجربی	تفاوت میانگین	T	معناداری	میانگین رتبه	رتبه	
بهره‌گیری	بهره‌گیری از عنصر آب و گونه‌های مختلف گیاهی به منظور ارتقا سرزندگی و نشاط کاربران	۶۸/۳	۵۸/۰	۶	۰۰/۰	۵۲/۲	۲	
	کاهش صدای نامطلوب محیطی به کمک نظام آواها	۴۴/۴	۳۴/۱	۴/۱۴	۰۰/۰	۵۳/۳	۱	
	یکپارچگی بصری عناصر گیاهی از داخل به خارج از ساختمان	۳۸/۳	۲۸/۰	۶۳/۲	۰۱/۰	۲۱/۲	۳	
	یکپارچگی طراحی فضای باز مجتمع مسکونی با ویژگی‌های بومی/محلی	۸۴/۲	۲۶/۰-	۱۲/۲-	۰۴/۰	۷۴/۱	۴	
	مجموع	۵۹/۳	۴۹/۰	۳۶/۹	۰۰/۰	خی دو = ۱۹/۶۳	معناداری ۰/۰۰ =	
تعمیم	به حداقل رساندن ابهام در طراحی (خوانایی فضا)	۰۲/۴	۹۲/۰	۱۱/۹	۰۰/۰	۸۴/۲	۲	
	تعیین قلمروها (حریم‌ها) با بهره‌گیری از گونه‌های مختلف گیاهی	۵۲/۴	۴۲/۱	۱۷/۳۱	۰۰/۰	۵۳/۳	۱	
	رعایت سلسله مراتب دسترسی از فضای عمومی تا خصوصی	۸۸/۲	۲۲/۰-	۸۹/۱-	۰۷/۰	۵۸/۱	۴	
	امکان انتخاب و ایجاد تعادل میان خلوت‌گزینی و تعامل	۳۲/۳	۲۲/۰	۱۰/۲	۰۴/۰	۰۵/۲	۳	
	مجموع	۶۹/۳	۵۹/۰	۱۲/۵۲	۰۰/۰	خی دو = ۳۶/۷۸	معناداری ۰/۰۰ =	
		۷۲/۳	۶۲/۰	۲۲/۵۴	۰۰/۰	-	-	

نتایج حاصل از آزمون t یک نمونه‌ای از بعد مشارکت نشان می‌دهد که گویه‌های «قابلیت نفوذپذیری و دسترسی مطلوب به فضا از طریق بهره‌گیری از گونه‌های گیاهی»، «افزایش و تنوع فضاهای جمعی در عین بهره‌گیری از عناصر طبیعی» و «افزایش حس تعلق به مکان» در سطح مطلوب ($p < ۰/۰۵$) و میانگین ملاکی بالاتر از ۳/۱ قرار گرفته است. در جدول ۷ با استفاده از آزمون فریدمن اولویت گویه‌های بعد مشارکت به ترتیب اهمیت گزارش شد؛ بنابراین اهمیت گویه «قابلیت نفوذپذیری و دسترسی مطلوب به فضا از طریق بهره‌گیری از گونه‌های گیاهی» و گویه «سهولت حرکت کاربر در فضا» به ترتیب به عنوان رتبه نخست و آخر را به خود اختصاص گرفت. معناداری ضریب خی دو آزمون فریدمن نشان از وجود اهمیت و اولویت در سطح گویه‌های بعد مشارکت دارد.

همچنین نتایج حاصل از آزمون t یک نمونه‌ای از بعد کیفیت نشان می‌دهد که گویه‌های «بهره‌گیری از عنصر آب و گونه‌های مختلف گیاهی به منظور ارتقا سرزندگی و نشاط کاربران»، «کاهش صدای نامطلوب محیطی به کمک نظام آواها» و «یکپارچگی بصری عناصر گیاهی از داخل به خارج از ساختمان» در سطح مطلوب ($p < ۰/۰۵$) و میانگین ملاکی بالاتر از ۳/۱ قرار گرفته است. در جدول ۷ با استفاده از آزمون فریدمن اولویت گویه‌های بعد کیفیت به ترتیب اهمیت گزارش شد؛ بنابراین اهمیت گویه «کاهش صدای نامطلوب محیطی به کمک نظام آواها» و گویه «یکپارچگی طراحی فضای باز مجتمع مسکونی با ویژگی‌های بومی/محلی» به ترتیب به عنوان رتبه نخست و آخر را به خود اختصاص گرفت. معناداری ضریب خی دو آزمون فریدمن نشان از وجود اهمیت و اولویت در سطح گویه‌های بعد کیفیت دارد.

همچنین نتایج حاصل از آزمون t یک نمونه‌ای از بعد امنیت نشان می‌دهد که گویه‌های «به حداقل رساندن ابهام در طراحی (خوانایی فضا)»، «تعیین قلمروها (حریم‌ها) با بهره‌گیری از گونه‌های مختلف گیاهی» و «امکان انتخاب و ایجاد تعادل میان خلوت گزینی و تعامل» در سطح مطلوب ($p < 0/05$) و میانگین ملاکی بالاتر از ۳/۱ قرار گرفته است. در جدول ۷ با استفاده از آزمون فریدمن اولویت گویه‌های بعد امنیت به ترتیب اهمیت گزارش شد؛ بنابراین اهمیت گویه «تعیین قلمروها (حریم‌ها) با بهره‌گیری از گونه‌های مختلف گیاهی» و گویه «رعایت سلسله مراتب دسترسی از فضای عمومی تا خصوصی» به ترتیب به‌عنوان رتبه نخست و آخر را به خود اختصاص گرفت. معناداری ضریب خی دو آزمون فریدمن نشان از وجود اهمیت و اولویت در سطح گویه‌های بعد امنیت دارد.

جدول ۸ آزمون t وضعیت ابعاد منظر شفابخش در فضای باز مجتمع‌های مسکونی

متغیر	ابعاد	میانگین ملاکی = ۳/۶۷ $df=49$				آزمون فریدمن	
		میانگین تجربی	تفاوت میانگین	T	معناداری	میانگین رتبه	رتبه
منظر شفابخش در فضای باز	مشارکت	۸۸/۳	۷۸/۰	۴۳/۱۴	۰۰/۰	۳۵/۲	۱
	کیفیت	۵۹/۳	۴۹/۰	۳۶/۹	۰۰/۰	۶۴/۱	۳
	امنیت	۶۹/۳	۵۹/۰	۵۲/۱۲	۰۰/۰	۰۱/۲	۲
مجتمع‌های مسکونی	مجموع	۷۲/۳	۶۲/۰	۵۴/۲۲	۰۰/۰	خی دو = ۹۳/۱۳	معناداری = ۰۰/۰

نتایج حاصل از آزمون t یک نمونه‌ای ابعاد منظر شفابخش در فضای باز مجتمع‌های مسکونی نشان می‌دهد که همه ابعاد مشارکت، کیفیت و امنیت در سطح مطلوب ($p < 0/05$) و میانگین ملاکی بالاتر از ۳/۱ قرار گرفته است. در نهایت متغیر منظر شفابخش در فضای باز مجتمع‌های مسکونی در سطح مطلوب ($p < 0/05$) و میانگین ملاکی بالاتر از ۳/۱ قرار گرفته است.

با استفاده از آزمون فریدمن اولویت ابعاد منظر شفابخش در فضای باز مجتمع‌های مسکونی به ترتیب اهمیت گزارش شد؛ بنابراین اهمیت بعد «مشارکت» و بعد «کیفیت» به ترتیب به‌عنوان رتبه نخست و آخر را به خود اختصاص گرفت. معناداری ضریب خی دو آزمون فریدمن نشان از وجود اهمیت و اولویت در سطح ابعاد منظر شفابخش در فضای باز مجتمع‌های مسکونی دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر مؤلفه‌های منظر شفابخش بر نحوه ارتقا پایداری اجتماعی در فضاهای باز مجتمع‌های مسکونی در دوران پسا کرونا در شهرک مسکونی اکباتان واقع در منطقه ۵ شهر تهران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق که به مدد تلفیق دو روش کیفی و کمی بدست آمده است، نشان می‌دهد که سه بعد مشارکت، کیفیت و امنیت تاثیر متفاوتی بر افزایش پایداری اجتماعی در دوران پسا کرونا ایفا می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که بعد «مشارکت» با میانگین رتبه ای ۲/۳۵ بیشترین تاثیر را به منظور افزایش پایداری اجتماعی از طریق کاربست مؤلفه‌های منظر شفابخش در فضای باز مجتمع‌های مسکونی ایفا می‌کند. در ادامه بعد «امنیت» با میانگین رتبه ای ۲/۰۱ و بعد «کیفیت» با میانگین رتبه ای ۱/۶۴ به ترتیب بعد از بعد «مشارکت» بیشترین تاثیر بر پایداری اجتماعی در فضاهای باز مجتمع‌های مسکونی در دوران پسا کرونا ایفا می‌کند.

همچنین با بررسی شاخص‌های مستخرج از بعد «مشارکت» قابلیت نفوذپذیری و دسترسی مطلوب به فضا از طریق بهره‌گیری از گونه‌های گیاهی با میانگین رتبه ۳/۴۵، افزایش و تنوع فضاهای جمعی در عین بهره‌گیری از عناصر طبیعی با میانگین رتبه ۲/۷۹ به ترتیب تاثیرگذارترین شاخص‌های بعد «مشارکت» می‌باشند. در ادامه با بررسی شاخص‌های مستخرج از بعد «امنیت» تعیین قلمروها (حریم‌ها) با بهره‌گیری از گونه‌های مختلف گیاهی با میانگین رتبه‌ای ۳/۵۳، به حداقل رساندن ابهام در طراحی (خوانایی فضا) با میانگین رتبه‌ای ۲/۸۴ به ترتیب تاثیرگذارترین شاخص‌های بعد «امنیت» می‌باشند. در نهایت با بررسی شاخص‌های مستخرج از بعد «کیفیت» کاهش صدای نامطلوب محیطی به کمک نظام آواها با میانگین رتبه‌ای ۳/۵۳ و شاخص بهره‌گیری از عنصر آب و گونه‌های مختلف گیاهی به منظور ارتقا سرزندگی و نشاط کاربران با میانگین رتبه‌ای ۲/۵۲ به ترتیب تاثیرگذارترین شاخص‌های بعد «کیفیت» می‌باشند.

در یک جمع‌بندی بر اساس یافته‌ها و نتایج تحقیق، «مشارکت پذیری فضاهای جمعی» بیشترین تاثیر را بر افزایش پایداری اجتماعی در دوران پساکرونا ایفا می‌کند. با توجه به آنکه در این پژوهش تمرکز بر کاربرست مولفه‌های منظر شفافبخش در فضاهای باز مجتمع‌های مسکونی بوده است به منظور نیل و تحقق این بعد راهبردهایی چون افزایش دسترسی و نفوذپذیری به فضا از طریق بهره‌گیری از گونه‌های متنوع گیاهی و نیز افزایش و تنوع فضاهای جمعی در عین بهره‌گیری از عناصر طبیعی (گل و گیاه، آب و ...) راهگشا خواهد بود چرا که منجر به افزایش حس تعلق به مکان و دلبستگی هرچه بیشتر کاربران به محیط طبیعی گردیده که در ادامه آن باعث افزایش تعاملات و پایداری اجتماعی می‌گردد. از طرفی نمی‌توان اهمیت امنیت (روانی، اجتماعی، اقتصادی و ...) و ارتقا حس امنیت ساکنین نیز بر اجتماع پذیری در فضاهای جمعی در دوران پساکرونا در میان عوام نادیده گرفت. در واقع می‌توان افزایش احساس امنیت کاربران را به عنوان راهبردی مکمل در جهت تحقق بعد «مشارکت پذیری در فضاهای جمعی» در نظر گرفت. با توجه به هدف و مسئله اصلی پژوهش، افزایش حس امنیت بایستی در جهت بهره‌گیری از مولفه‌های منظر شفافبخش صورت پذیرد. که در این راستا می‌توان از راهبردهایی چون تعیین قلمروها (حریم‌ها) با بهره‌گیری از گونه‌های مختلف گیاهی و افزایش خوانش محیط توسط کاربران از طریق به حداقل رساندن ابهام در طراحی فضاهای باز جمعی بهره جست.

در نهایت بایستی اذعان نمود که همواره «ارتقا کیفیت فضایی» بر میزان دعوت کنندگی، اجتماع پذیری و مشارکت پذیری کاربران فضاها منجر به افزایش پایداری و تعاملات اجتماعی می‌گردد. در این راستا افزایش کیفیت فضایی از طریق مولفه‌های منظر شفافبخش به کمک راهبردهایی چون کاهش صدای نامطلوب محیطی به کمک نظام آواها و بهره‌گیری از عنصر آب و گونه‌های مختلف گیاهی به منظور ارتقا سرزندگی و نشاط کاربران کاربردی می‌باشد.

براساس بررسی‌های صورت گرفته، نتایج این پژوهش با پژوهش‌های عبداللّهی و همکاران (۱۳۹۵)، نیلی و همکاران (۱۳۹۱)، جانی‌پور و همکاران (۱۴۰۰)، بابایی و همکاران (۱۳۹۸)، توکلیان و شاهچراغی (۱۳۹۷) در زمینه بهره‌گیری از گونه‌های متنوع گیاهی و نیز افزایش و تنوع فضاهای جمعی در عین بهره‌گیری از عناصر طبیعی (گل و گیاه، آب و ...) همسو می‌باشد. همچنین نتایج این پژوهش با پژوهش‌های مطلبی و وجدان‌زاده (۱۳۹۵)، هاشمین و بمانیان (۱۴۰۱)، طاهری و همکاران (۱۴۰۲)، رحیمی مهر (۱۴۰۱) از منظر تبیین ابعاد و مولفه‌های منظر شفافبخش و بررسی میزان تاثیرپذیری هریک همسو می‌باشد. نکته حائز اهمیت از بررسی‌های صورت گرفته، شیوه همسویی و تطابق نتایج این پژوهش با پژوهش رزم آرا و تقی‌پور (۱۳۹۵) می‌باشد. ابعاد ادراکی - معنایی در باغ ایرانی و ابعاد فعالیتی - عملکردی در پارک شهری اثربخشی مطلوبی در بهبود کیفیت شفافبخشی منظر دارند. که این دو بعد هم راستا با یافته‌های این پژوهش در اثر بخشی ابعاد مشارکت و امنیت دارند. لذا کاربرست راهکارهایی به منظور افزایش مشارکت پذیری در جهت افزایش احساس امنیت کارا می‌باشد.

با توجه به نتایج پژوهش، پیشنهاداتی جهت بهبود تعاملات و پایداری اجتماعی در فضای باز شهرک مسکونی اکباتان بر اساس مؤلفه‌های منظر شفابخش ارائه می‌گردد:

۱. ایجاد فضاهای مکث و تجمع‌های کوچک مقیاس (خلوت جمعی) و همچنین تعبیه و طراحی فضاهایی برای خلوت‌گزینی افراد (خلوت فردی)
۲. موسیقی درمانی با ایجاد آواهای و صداهاى دلنشین طبیعت و توجه به بهبود منظر صوتی کاربران
۳. ارتباط مستقیم با طبیعت و حضور پویای آب در فضای سبز شهرک از جمله مسیر پیاده و فضای بازی کودکان
۴. استفاده از رنگ‌ها و نورپردازی‌های متنوع جهت تحریک حس بینایی در عناصر و مسیرها
۵. خوانایی و به حداقل رساندن ابهام در مسیر حرکت پیاده و فضاهای جمعی
۶. توجه به تناسبات و مقیاس‌های انسانی و عدم وجود اغتشاشات بصری در طراحی فضای سبز

تعارض منافع:

نویسندگان اعلام می‌دارند که در انجام این پژوهش هیچ گونه تعارض منافع برای ایشان وجود نداشته است.

فهرست منابع

- استرابی آشتیانی، حمیده، اعتصام، ایرج، ماجدی، حمید، (۱۳۹۹). سیاستهای فرهنگی - هویتی پروژه‌های معماری با تأکید بر شهرک اکباتان تهران. *هنر اسلامی*. ۱۶(۳۸). صص ۳۷-۴۷.
- تاج بخش، غلامرضا. (۱۳۹۹). واکاوی سبک نوین زندگی عصر پسا کرونای. *مطالعات راهبردی سیاستگذاری عمومی*. ۱۰(۳۵). صص ۳۴۰-۳۶۰.
- توکلی، نیکو؛ و ماجدی، حمید. (۱۳۹۲). عملکرد محیط‌های سبز و طبیعی در ارتقاء سلامت روحی - روانی انسان. *هویت شهر*. ۷(۱۳). صص ۲۳-۳۲
- داوری، علی؛ رضازاده، آرش. (۱۳۹۳). *مدل سازی معادلات ساختاری با نرم افزار PLS*. تهران: سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی.
- رزم آرا، مینا و تقی پور، ملیحه. (۱۳۹۹). ارزیابی نحوه اثربخشی مؤلفه‌های شفابخشی منظر در باغ ایرانی و پارک‌های شهری با نگاهی به گفتمان جنسیتی نمونه موردی: باغ ارم و پارک آزادی شیراز. *معماری و شهرسازی پایدار*. ۸(۲)، ۱۵۰-۱۳۱.
- زارع، الهام، فرامرزى اصل، مهسا، و عباسی پارام، الناز. (۱۳۹۹). بررسی نقش مشارکت اجتماعات محلی در توسعه پایدار اجتماعی شهرها (مطالعه موردی: محله سنگلج تهران). *معماری و شهرسازی پایدار*. ۸(۱)، صص ۱۰۱-۱۱۷.
- سعیدیان، نجمه؛ معمارضیا، کاظم؛ ذاکری، سیدمحمدحسین؛ و حبیبی، امین. (۱۳۹۴). تبیین میزان تطابق الگوی منظر باغ ایرانی و باغ‌های چهارگانه درمانی. *پژوهش‌های منظر شهر*. ۲(۴). صص ۸۱-۹۲.
- شفیعا، محمدعلی و شفیع، سعید. (۱۳۹۱). بررسی رابطه توسعه پایدار اجتماعی و سرمایه اجتماعی، نمونه موردی: ساکنان محله غیر رسمی شمیران نو، جامعه‌شناسی کاربردی، ۲۳(۲)، صص ۱۳۹-۱۶۴.
- طباطبائی، سیدسجاد و جهانگرد، حمیده (۱۳۹۵). تحلیل ساختاری خودکارآمدی تصمیم‌گیری شغلی بر اطمینان تصمیم‌گیری شغلی با میانجی‌گری ابعاد فرصت‌یابی حرفه‌ای. *فصلنامه علمی پژوهشی پژوهش‌نامه تربیتی*. ۱۱(۴۷)، صص ۸۵-۱۱۲.
- علی عباس زاده رضایی، آرزو، مدقالچی، لیلا، و حق پرست، فرزین. (۱۴۰۱). مشارکت بیماران روحی در فرآیند طراحی باغ‌های شفابخش به منظور بالابردن پایداری اجتماعی در مراکز درمانی. *هویت شهر*. ۱۶(۵۰)، صص ۱۷-۲۶.
- غفوریان، میترا، افشین مهر، وحید، نوروزی زاده، زهرا. (۱۳۹۶). بازشناسی مؤلفه‌های پایداری اجتماعی مؤثر بر افزایش تعاملات اجتماعی در مجموعه‌های مسکونی (مطالعه موردی: محله اباذر، تهران). *هویت شهر*. ۱۱(۲)، صص ۳۱-۴۲.
- فتحی، سروش. (۱۳۹۱). تحلیلی بر روابط اجتماعی در فضای شهری پایدار، *مطالعات توسعه اجتماعی ایران*، ش ۴، صص ۶۴-۶۷.
- کیاسی، شروین و کریمی آذری، امیررضا. (۱۴۰۲). بررسی مؤلفه‌های کالبدی پایداری اجتماعی در فضاهای مسکونی و تبیین راهکارهای طراحی با تأکید بر پیاده‌مداری (نمونه: مجتمع لاکانشهر رشت). *مهندسی جغرافیایی سرزمین*. ۷(۳)، صص ۵۵۵-۵۶۸.
- گلچین، پیمان، کافی، محسن، و سارانی، نیلوفر. (۱۴۰۰). بررسی اهمیت طراحی باغ‌های شفابخش در محوطه دانشگاه‌ها در راستای ارتقاء مطلوبیت فضایی: نمونه موردی دانشگاه سیستان و بلوچستان. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*. ۲۳(۱۰ (پیاپی ۱۱۳))، صص ۱۰۳-۱۱۸.

- لنگ، جان. (۱۳۹۵). *آفرینش نظریه معماری: نقش علوم رفتاری در طراحی محیط*. (علیرضا عینی فر، مترجم). تهران: موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران
- نسترن، مهین، قاسمی، وحید، هادی زاده زرگر، صادق. (۱۳۹۲). ارزیابی شاخص‌های پایداری اجتماعی با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه- (ANP) جامعه شناسی کاربردی. ۲۴(۳). صص ۱۵۵-۱۷۷.
- هاشمین، سیدابوالفضل، و بمانیان، محمدرضا. (۱۴۰۱). تحلیل تطبیقی باغ‌های شفابخش با باغ‌های ایرانی. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۴(۱ پیاپی ۱۱۶)، صص ۱۷۳-۱۸۳.

- Cooper Marcus, Clare. Barnes, Marni (1999). *Healing Gardens: Therapeutic Benefits and Design Recommendation*. New York, NY: Wiley series, 1st Edition
- Gupta, A., Madhavan, M. V., Sehgal, K., Nair, N., Mahajan, S., Sehrawat, T. S., ... & Landry, D. W. (2020). Extrapulmonary manifestations of COVID-19. *Nature Medicine*, 26(7), 1017-1032.
- Jiang, W., Hou, G., Li, J., Peng, C., Wang, S., Liu, S., ... & Liu, H. (2019). Prevalence of H7N9 subtype avian influenza viruses in poultry in China, 2013–2018. *Transboundary and Emerging Diseases*, 66(4), 1758-1761.
- Klinenberg, E. (2018). *“Palaces for the People”, How social Infrastructure can Help fight Inequality Polarization and the Decline of Civic Life*, Crown publishing Group.
- Omar F. Alkai et al 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 923 012012DOI 10.1088/1755-1315/923/1/012012
- Rawlings, R., (2012), *Healing gardens*, Willow Creek Press.
- Samuelsson, B. C. Azar, et al. (2004) "From Here to Sustainability—Is the Lisbon/Göteborg agenda delivering?"
- Sõukand, R. and R. Kalle, (2010). Herbal Landscape: The Perception of Landscape As a Source of Medicinal Plants. *Trames: A Journal of the Humanities & Social Sciences*, 14(3).
- Say Jer, O. and Ibrahim, F. , (2014) , "Enhancement of Space Environment Via Healing Garden," *American Transactions on Engineering & Applied Sciences*, pp. 281-298.
- Shackell, A. and R. Walter, (2012). *Greenspace Design for Health and Well-being: Practice Guide*. Forestry Commission.
- Wang Q , (2023). Design guidelines for healing gardens in the general hospital. *Frontiers in Public Health*. 11 <https://www.frontiersin.org/journals/public-health/articles/10.3389/fpubh.2023.1288586>
- World Health Organization. (2005). WHO Checklist for Influenza Pandemic Preparedness Planning (No. WHO/CDS/CSR/GIP/2005.4). World Health Organization.



معرفی شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای و مروری بر مفاهیم مرتبط با آن

زهره دهقان منشادی^۱، اسماعیل صالحی^۲

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. نویسنده مسئول: dehghan.zahra@ut.ac.ir

۲. استاد، گروه برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌ها: دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۳	تأثیرات اقتصادی-اجتماعی بر شهرها در طول همه‌گیری کووید-۱۹، منجر به افزایش نابرابری و رکورد بیکاری در سراسر جهان گشت. زندگی در شرایطی که فاصله‌گذاری اجتماعی، جداسازی و قرنطینه برای کنترل این همه‌گیری اعمال شده بود و چالش‌های مرتبط با آن مانند تأثیر بر زنجیره تأمین و دسترسی ساکنان به مواد غذایی، خدمات بهداشتی و فضاهای سبز و باز، منجر به نیاز به بازاندیشی بنیادی در مورد ساختار شهرها و ظهور رویکردی به نام شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای شد. این مفهوم که دیدگاه جدیدی از شهرسازی بر مبنای زمان را ارائه می‌کند، به مفاهیم موجود درباره شهرهای هوشمند، بافت‌های شهری فشرده و متراکم و ساختن شهرهای ایمن، انعطاف‌پذیر، پایدار و عادلانه می‌افزاید. درواقع، ایده اصلی این شهر بر این اساس است که مردم باید بتوانند زندگی در محله‌هایی را تجربه کنند که در آن امکانات و خدماتی نظیر فروشگاه‌های مواد غذایی، مدارس، مغازه‌ها، رستوران‌ها و مراکز پزشکی با ۱۵ دقیقه پیاده‌روی یا دوچرخه‌سواری قابل دسترسی باشد. پژوهش حاضر به معرفی این مفهوم و مفاهیم مرتبط با آن، خاستگاه، هدف و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده می‌پردازد.

استناد: دهقان منشادی، زهره، صالحی، اسماعیل (۱۴۰۴). معرفی شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای و مروری بر مفاهیم مرتبط با آن. *رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط*، ۲(۲)، ۱۹-۳۰.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045411.1058>

© ۱۴۰۴ (۲۰۲۶) نویسندگان مقاله، نشریه رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط، ناشر: سازمان مطالعه و تدوین کتب دانشگاهی در علوم اسلامی و انسانی (سمت).



Introduction of 15-minute cities and an overview of related concepts

Zahra Dehghan Manshadi ¹✉, Esmail Salehi ²

1. PhD student, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

Corresponding author: dehghan.zahra@ut.ac.ir

2. Professor, Department of Environmental Planning and Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

Article Info

History

Received: November 11, 2025

Accepted: January 23, 2026

Keywords

15-minute city

Chrono-urbanism

COVID-19

Neighborhood

Abstract

The COVID-19 epidemic resulted in increased inequality and unprecedented levels of unemployment worldwide, significantly affecting cities' socio-economic structure. As a result of the social isolation, quarantine, and other measures used to control the epidemic, as well as the problems that came with it, such as supply chain disruptions and limited access to food, healthcare, and green spaces, the structure of cities has been rethought, and the idea of "15-minute cities" has become very important. This concept introduces an innovative perspective on Chrono-urbanism, complementing previous ideas on smart cities, compact and dense urban environments, and the creation of secure, resilient, sustainable, and equitable cities. The fundamental concept of this city revolves around the notion that individuals should have the opportunity to reside in neighborhoods where essential amenities and services, such as supermarkets, educational institutions, shopping centers, dining establishments, and healthcare facilities, are conveniently accessible within a 15-minute walking or cycling distance. This study presents the notion and its associated concepts, including their genesis, purpose, and recommendations for future research.

Citation: Dehghan Manshadi, Z., & Salehi, E. (2025). Introduction of 15-minute cities and an overview of related concepts. *Innovative Approaches in Human–Environment Studies*, 2(2), 19-30.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045411.1058>

© 2025 Authors, Innovative Approaches in Human–Environment Studies.

Publisher: The Organization for Researching and Composing University Textbooks in the Islamic Science and Humanities (SAMT)

مقدمه

سکونتگاه‌های انسانی در گذشته به صورت فشرده و محله محور ساخته می‌شدند. در این سکونتگاه‌ها، خدمات به طور مناسبی توزیع شده و ساکنان می‌توانستند نیازهای روزانه خود را در مقیاس محلی برآورده کنند (Bibri et al., ۲۰۲۰). به تدریج با متداول شدن استفاده از خودرو و دسترسی سریع به مکان‌های دور، ساختار شهرها متحول گشت و در نتیجه، نیاز به محله‌های مستقل کاهش یافت (Anik & Habib, ۲۰۲۳). چنین شکل شهری و دگرگونی‌های ساختاری منجر به گسترش افقی شهر، افزایش میزان سفر، مصرف بیشتر مصالح ساختمانی و زیرساختی، از بین رفتن تنوع زیستی، ازدیاد ترافیک و آلودگی هوا شد. علاوه بر چالش‌های مرتبط با شکل شهر، مسائل اجتماعی-اقتصادی، فقر، بی‌عدالتی، نژادپرستی و گرانی مسکن نیز مطرح شد (Jones, -Hall & Tewdwr, ۲۰۱۹; Sharifi et al., ۲۰۲۳). این مسائل، برنامه ریزان و سیاست‌گذاران شهری را بر آن داشت تا در شکل و ساختار شهرها تجدیدنظر کنند و برای احیای شهرسازی پیشین و دفاع از طرح‌های شهری پایدارتر تلاش کنند. جنبش‌های برنامه‌ریزی، مانند شهرسازی پست‌مدرن نمونه‌ای از این تلاش‌ها هستند که در اواخر قرن بیستم برای رسیدگی به مشکلات شهری معاصر و ترویج برنامه‌ریزی و طراحی شهری پایدار ظهور کردند (Madsen, ۲۰۲۳). برای حفاظت از محیط‌زیست و ارتقای رفاه ساکنان، این جنبش‌ها در مقیاس محله و به عبارت دیگر، فعالیت‌های غیرمتمرکز برای کاهش استفاده از خودرو و ترویج استفاده از حمل‌ونقل عمومی تأکید داشتند (Pozoukidou & Chatziyiannaki, ۲۰۲۱). پس از همه‌گیری کووید-۱۹، محدودیت‌های تردد در شهر و اقدامات قرنطینه‌ای که توسط دولت‌های محلی برای مهار انتقال و ویروس تحمیل شده بود نیز چالش‌های بسیاری به همراه داشت و نیاز به تغییراتی در ساختار شهرها را برجسته کرد. تقسیم‌بندی‌های صورت گرفته در این دوران در بسیاری از شهرها بر زنجیره تأمین و دسترسی ساکنان به مواد غذایی، خدمات بهداشتی و فضاهای سبز و باز تأثیر منفی گذاشت (Murgante et al., ۲۰۲۴).

بنابراین پس از همه‌گیری، به دنبال یافتن راه‌حلی برای تغییرات ساختاری شهرها و افزایش دسترسی به خدمات اولیه شهری، بهبود کیفیت محیط‌زیستی، کاهش وابستگی به خودرو، حمایت از شیوه‌های حمل‌ونقل پایدار و استفاده‌های چندوجهی از فضاهای عمومی، ایده شهر ۱۵ دقیقه‌ای مطرح شد. ایده اصلی این شهر بر این اساس است که مردم باید بتوانند زندگی در محله‌هایی را تجربه کنند که در آن امکانات و خدماتی نظیر فروشگاه‌های مواد غذایی، مدارس، مغازه‌ها، رستوران‌ها و مراکز پزشکی با ۱۵ دقیقه پیاده‌روی یا دوچرخه‌سواری قابل دسترسی باشد (Moreno et al., ۲۰۲۱). این مفهوم در سال ۲۰۱۵ به عنوان چشم‌اندازی برای تبدیل شهر پاریس به شهری پایدار و زیست پذیر معرفی شد و سپس در طیف وسیعی از شهرهای دیگر برای ترویج زندگی شهری پایدار مورد توجه قرار گرفت (Pozoukidou & Chatziyiannaki, ۲۰۲۱). از نظر مفهومی نمی‌توان شهر ۱۵ دقیقه‌ای را مفهوم جدیدی دانست، بلکه می‌توان آن را به رویکردهای مردم محور در برنامه‌ریزی شهری ربط داد. در واقع ایده اصلی این شهر با مفاهیم و دیدگاه‌های مرتبط در برنامه‌ریزی شهری معاصر، مانند قابلیت دسترسی پایدار^۱ (Bertolini et al., ۲۰۰۵)، شهرسازی جدید^۲ (Urbanism, ۲۰۰۰)، و توسعه فشرده^۳ (Stevens, ۲۰۱۷) همسو می‌باشد. شهر ۱۵ دقیقه‌ای می‌تواند به عنوان یک عنصر حیاتی از رویکرد حمل‌ونقل پایدار نیز باشد که بر اهمیت تغییرات کاربری زمین در جهت فشرده‌سازی و متراکم کردن بافت شهری و کاهش وابستگی به خودروها تأکید می‌کند (Li et al., ۲۰۲۱). از سوی دیگر، مقیاس محله از گذشته در تئوری و عمل برنامه‌ریزی حائز اهمیت بوده است (Kallus & Law, ۲۰۰۰; Yone, ۲۰۰۰; Patricios, ۲۰۰۲) و در این راستا شهر ۱۵ دقیقه‌ای نیز به مدلی پرکاربرد جهت سازمان‌دهی فضایی و

عملکردی در مقیاس محله تبدیل شد. در گذر زمان، موفقیت‌ها و شکست‌ها در فرآیند ایجاد شهرهای پایدار نشان می‌دهد که محله‌ها باید فضایی باشند که در آن ساکنان نیازهای اساسی خود را برآورده کرده و با یکدیگر ارتباط متقابل برقرار می‌کنند. همچنین با پیشرفت تئوری برنامه‌ریزی، شناخت مسائل پیچیده اجتماعی اکولوژیکی شهر و عدم قطعیت‌های موجود مشخص شد برنامه‌ریزان باید از مقیاس محله به عنوان حامل داده‌های اجتماعی شروع کرده تا با شرکت در فرایندی پایین به بالا به شناخت بهتری از جامعه برسند (Kohon, ۲۰۱۸; Son et al., ۲۰۲۳). در راستای اهمیت شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای این پژوهش سعی دارد به مرور مفاهیم مرتبط با آن، اصول و معیارهای به کارگیری آن در سطح محلات و نمونه‌های عملی در جهان پرداخته و پیشنهادهایی نیز برای پژوهش‌های آتی مطرح کند.

ادبیات پژوهش

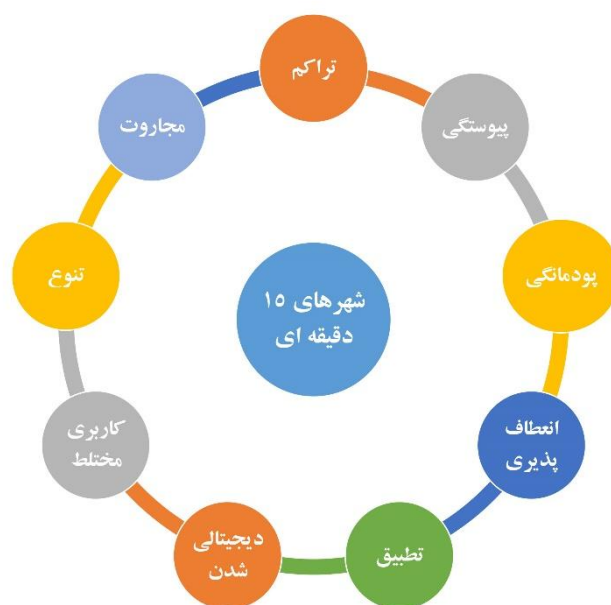
علیرغم اینکه شهر ۱۵ دقیقه‌ای مفهومی نسبتاً نوپا است، به سرعت در ادبیات دانشگاهی مورد توجه قرار گرفته و مطالعات متعددی تلاش کرده‌اند تا این مفهوم را به صورت تجربی عملیاتی کنند. به عنوان مثال، Weng et al. (2019) به بررسی محدودیت‌های پیاده‌روی در بافت محله‌های ۱۵ دقیقه‌ای در شانگهای چین پرداختند. در این پژوهش معیارهایی مانند دسترسی به خدمات، ارزیابی نیازهای پیاده‌روی گروه‌های مختلف عابر پیاده (به عنوان مثال، کل جمعیت، کودکان، بزرگسالان و سالمندان) و شرایط ترافیک در نظر گرفته شد. آن‌ها نتیجه گرفتند محله‌های ۱۵ دقیقه‌ای با قابلیت مناسب برای پیاده‌روی عمدتاً در مناطق مرکزی متمرکز شده‌اند و جوامعی که قابلیت پیاده‌روی ضعیفی دارند در مناطق روستایی پراکنده شده‌اند. در پژوهشی که Guzman et al. (2021) انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که افراد کم‌درآمد از نظر اجتماعی بیشتر از سایر افراد جامعه در معرض آلودگی هستند و مجبورند برای تأمین معاش خود به طور روزانه مسافت بیشتری از محل زندگی را طی کنند که اثرات نامطلوب اقتصادی نیز برای آن‌ها دارد. با وجود اینکه بوگوتا توانسته در ارتباط با دسترسی به خدمات دیگر به اهداف شهر ۱۵ دقیقه‌ای نزدیک شود در ارتباط با دسترسی به محل کار، نابرابری‌های مشخصی میان افراد مختلف جامعه وجود دارد. یافته‌های این مقاله یادآور این نکته است که علاوه بر برنامه‌ریزی در زمینه حمل و نقل شهری، رفتار سفر و دسترسی مناسب، آمایش سرزمین نیز نقش تعیین کننده‌ای در رفع نابرابری‌های اجتماعی و فضایی در یک شهر دارد. (Knap et al. (2023) نیز به بررسی اوترخت هلند از نظر معیارهای شهر ۱۵ دقیقه‌ای پرداختند و دریافتند که این شهر زیرساخت مناسبی برای دوچرخه‌سواری داشته و حتی افراد کم‌درآمد جامعه نیز می‌توانند از مزایای آن بهره‌مند شوند. بنابراین دوچرخه‌سواری در اوترخت می‌تواند راه حل مؤثری برای کاهش نابرابری‌های اجتماعی مرتبط با حمل و نقل باشد. (Birkenfeld et al. (2023) با بررسی رفتار سفر شهروندان در مونترال و با استفاده از داده‌های مکانی به شناسایی خانواده‌هایی با سبک زندگی ۱۵ یا ۳۰ دقیقه‌ای پرداختند. یافته‌ها نشان می‌دهد که پارادایم‌های شهر ۱۵ و ۳۰ دقیقه‌ای اهدافی را ارائه می‌کنند که در بافت یک شهر بزرگ آمریکای شمالی به سختی قابل دسترسی هستند. تعداد بسیار کمی از خانواده‌ها می‌توانند تمام سفرهای روزانه خود را در نزدیکی خانه انجام دهند، حتی اگر ساختار محیط ساخته شده برای دستیابی به این هدف به طور اساسی تغییر کرده باشد. بنابراین مدل شهر x دقیقه‌ای، نمی‌تواند برای همه شهرها کاربردی باشد.

اصول شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای

شهر ۱۵ دقیقه‌ای بر مفهوم «شهرسازی کرونو»^۱ استوار است که بیان می‌کند کیفیت زندگی شهری به زمان سپری شده برای حمل و نقل بستگی دارد. اولین بار، کارلوس مورنو^۲ اصطلاح شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای را مطرح کرد. او

1. Chrono urbanism
2. Carlos Moreno

طرفدار شهرهایی بود که مردم، قابلیت دسترسی به همه ضروریات اساسی زندگی خود را با ۱۵ دقیقه پیاده‌روی یا دوچرخه‌سواری دارند (Gower & Grodach, ۲۰۲۲). مورنو دسترسی به مواردی مانند محل زندگی، کار، تجارت، مراقبت‌های بهداشتی، آموزش و سرگرمی را به عنوان شش عملکرد اساسی و اجتماعی شهری برای حفظ کیفیت زندگی برمی‌شمارد. تلاش در این راستا منجر به تعامل و مشارکت بیشتر ساکنان و در نهایت انسجام پیوندهای اجتماعی خواهد شد (Olivari et al., ۲۰۲۳). برای این منظور نیاز به بازسازی سیمای سرزمین شهری است. با توجه به مطالب فوق که از مفهوم شهر ۱۵ دقیقه‌ای مورنو گرفته شده است، شکل ۱ چارچوب پیشنهادی «شهر ۱۵ دقیقه‌ای» را نشان می‌دهد. این ابعاد پس از مشاهده چالش‌هایی که شهرهای مختلف در سراسر جهان در طول کووید-۱۹ متحمل شده و اقدامات بهداشتی و پروتکل‌های متعاقب آن باهدف کاهش شیوع همه‌گیری شناسایی شدند (Z. Allam et al., ۲۰۲۲). شرح هر یک از ابعاد در ادامه آورده شده است.



شکل ۱ اصول شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای (al et Moreno, ۲۰۲۱)

تراکم

تراکم بالا و فشردگی بافت شهری رویکردی است که برنامه‌ریزان باید برای اجرای بعد دیگر شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای یعنی مجاورت کاربری اراضی به کارگیرند. بافت‌های شهری با تراکم کم و ساختارهای پراکنده مشابه آنچه در شهرهای آمریکای شمالی و استرالیا یافت می‌شود، منجر به وابستگی زیاد به خودروها خواهد شد و برای اجرای این مفهوم مناسب نیستند. پیاده‌سازی مدل شهر ۱۵ دقیقه‌ای در شهرهای کوچک‌تر تا متوسط و درعین حال متراکم، مانند شهرهای اروپا، در مقایسه با شهرهای بزرگ‌تر اما پراکنده، مانند شهرهای ایالات متحده، آسان‌تر است (Z. Allam et al., ۲۰۲۲).

Salingeros (2006) تأکید می‌کند که با تراکم بهینه می‌توان فضای موجود را به گونه‌ای برنامه‌ریزی کرد که تمام موارد ضروری بدون نیاز به صرف زمان و انرژی زیاد برای ساکنان در دسترس باشد. علاوه بر این، تراکم بهینه، امکان ایجاد راه‌حل‌هایی در مقیاس محلی به منظور تولید انرژی، تأمین غذا و استفاده چندگانه از فضاهای موجود را فراهم می‌کند. برای مثال، استفاده از زمین‌های بازی مدارس به عنوان پارک از این موارد است. بعد تراکم در شهرهای ۱۵ دقیقه-

ای امروزه امکان ایجاد زیرساخت‌های عمومی مانند خطوط دوچرخه و مسیرهای پیاده‌روی را نیز فراهم آورده که نیاز به خودرو را به حداقل می‌رساند و از این رو دستیابی به عملکردهای اجتماعی متصور شده توسط Moreno et al. (2021) را نیز افزایش می‌دهد (al et Allam, ۲۰۲۰).

مجاورت

این بعد از شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای به در دسترس بودن محل کار، درمانگاه و مراکز پزشکی، آموزشی، تفریحی و تجارت اشاره دارد. مفهوم مجاورت، ابعاد مکانی و زمانی را در برمی‌گیرد. به عبارت دیگر، اجرای آن می‌تواند به بهبود شرایط دسترسی به امکانات اولیه در مقیاس منطقه و استفاده چندوجهی از زیرساخت‌های اساسی کمک کند. در نتیجه می‌تواند در ارتقای سطح زیست پذیری و پایداری شهری و کیفیت زندگی شهروندان نیز مؤثر باشد (Murgante et al., ۲۰۲۴).

تنوع و کاربری مختلط

عنصر تنوع در پیشرفت مفهوم شهر ۱۵ دقیقه‌ای دو جنبه اساسی دارد: (۱) نیاز به شکل دادن محله‌هایی با کاربری مختلط که در ارائه ترکیبی از خدمات مسکونی، تجاری و تفریحی نقش دارند (۲) تنوع فرهنگی و همزیستی افراد با نژاد و ملیت‌های متفاوت. در واقع یکی از ابعاد شهر ۱۵ دقیقه‌ای این است که شامل محله‌هایی است برای همه انسان‌ها بدون توجه به طبقه اجتماعی و اقتصادی، نژاد، ملیت یا عوامل دیگر قابل دسترسی است. این منجر به بافت‌های شهری می‌شود که با یک بستر اجتماعی، فرهنگی و اقتصادی متنوع مشخص می‌شود. از این رو می‌تواند در افزایش تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری فردی هم مؤثر باشد (Di Marino et al., ۲۰۲۳; Khavarian-Garmsir, Sharifi, & Sadeghi, ۲۰۲۳). در پیروی از مدل شهر ۱۵ دقیقه‌ای، شکل‌گیری محله‌هایی با کاربری مختلط در دستیابی به تراکم بهینه و نزدیکی به امکانات ضروری و درعین حال توسعه و ایجاد خیابان‌هایی باقابلیت پیاده‌روی و مسیرهای دوچرخه‌سواری، بسیار مهم است (Eldér, ۲۰۲۴).

دیجیتالی شدن

دیجیتالی شدن می‌تواند با جمع‌آوری داده‌ها از طریق شبکه‌های اینترنت اشیاء مؤلفه‌های دیگر این شهر را هم بهبود بخشد زیرا منجر به تصمیمات آگاهانه‌تر، سریع‌تر و امکان خودکارسازی فرآیندهای مختلف شهری شده و فرصت‌های بیشتری در جهت رسیدن به پایداری و افزایش نرخ تولید فراهم خواهد کرد (Zaheer Allam et al., ۲۰۲۲). می‌توان این گونه استنباط کرد که این مؤلفه با مفهوم شهرهای هوشمند مطابقت دارد. در مفهوم شهر هوشمند نیز عواملی مانند فراگیر بودن، مشارکت شهروندان و ارائه سریع خدمات از طریق پلتفرم‌های مختلف مطرح شده است که Moreno et al. (2021) نیز آن را در مورد شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای به کاربرد. به عنوان مثال، از طریق ابزارها و راه‌حل‌های دیجیتال، می‌توان اطمینان حاصل کرد که تجربه دوچرخه‌سواری با تأکید بر راه‌حل‌هایی مانند اشتراک گذاری دوچرخه و استقرار حسگرها برای اطمینان از ایمنی و امنیت دوچرخه‌سواران افزایش می‌یابد (Boot et al., ۲۰۲۴). دیجیتالی شدن تعاملات بین شهروندان و مؤسسات را تسهیل می‌کند، در نتیجه مشارکت و رضایت را افزایش می‌دهد (Sharifi et al., ۲۰۲۱).

تطبیق و انعطاف پذیری

رویارویی با عدم قطعیت و پیچیدگی در سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی مانند شهرها، اهمیت ابعاد تطبیق و انعطاف‌پذیری را بالا می‌برد. شهرهایی با ظرفیت تطبیق‌پذیری بالا در برابر اختلالات، آسیب‌پذیری کمتری دارند. در این

شهرها برنامه‌ریزان با مطالعه روند اختلالات و شناسایی نقاط قوت و ضعف و تشخیص میزان و ابعاد شکنندگی به توسعه دانش مربوطه پرداخته و گزینه‌ها را برای ایجاد یک سیستم شهری ایمن و سالم اولویت‌بندی می‌کنند (Talubo et al., ۲۰۲۲). در مثال شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای، با مطالعه تغییرات اقلیمی و همه‌گیری کووید-۱۹، ایده یک طراحی شهری پایدار مطرح شد که به میزان کمتری در برابر عدم قطعیت‌های مشابه در آینده آسیب‌پذیر است. همه‌گیری‌های اخیر و غیرقابل پیش‌بینی بودن آثار تغییرات اقلیمی بر لزوم آمادگی شهرها برای تغییرات احتمالی و حتی ناگهانی تأکید دارد (Pisano, ۲۰۲۰).

پودمانگی

این اصل مربوط به تقسیم سیستم شهر به واحدهای اجتماعی مستقل اما به هم پیوسته است. این بعد از شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای به دلیل مستقل و غیرمتمرکز بودن خدمات شهری در هنگام وقوع اختلال و امکان انتشار آن اهمیت دارد (Khavarian-Garmsir, Sharifi, Hajian Hossein Abadi, et al., ۲۰۲۳).

پیوستگی

عنصر پیوستگی از ایجاد محله‌هایی ایزوله جلوگیری کرده و در بخش‌های مختلف به سیستم شهری کمک می‌کند تا در برابر شوک‌ها و تنش‌ها بهتر مقاومت کند و برگشت‌پذیر باشد. با شبکه خطوط حمل و نقل عمومی، مناطق فرعی در یک شهر ۱۵ دقیقه‌ای به بخش مرکزی وصل می‌شوند. پیاده‌روی و دوچرخه‌سواری، به همراه امکان بهره‌بردن از مزایای حمل و نقل عمومی، وابستگی به خودرو را کاهش می‌دهد (Pozoukidou & Chatziyiannaki, ۲۰۲۱).

معیارهای دیگری نیز برای ارزیابی شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای و ایجاد شرایطی در جهت رسیدن به آن تعریف شده که در جدول ۱ نشان داده شده‌است. این معیارها در جهت اثربخشی برنامه‌ریزی فضایی نه به عنوان یک مداخله در طراحی شهری برای بهبود کیفیت محیط ساخته شده، بلکه به عنوان فرآیندی از پایین به بالا برای ایجاد جوامعی ایمن و عادلانه تعیین شده‌اند. به نظر می‌رسد مسائلی مانند بی‌ثباتی اقتصادی، تغییر اقلیم، نابرابری‌های اجتماعی و همچنین همه‌گیری‌هایی مانند کووید-۱۹ نیاز به اقداماتی فراگیر در جهت دستیابی به رفاه همه ساکنان و استفاده‌کنندگان از فضا دارند. از این رو، تلاش برای ایجاد جوامعی ایمن و برابری طلب که در آن، همه شهروندان بدون توجه به جنسیت، سن، پیشینه فرهنگی یا توانایی، از جمله دسترسی به خدمات، از حقوق برابر برخوردار باشند، مفهوم شمولیت را به عنوان یک ویژگی کیفی مهم در برنامه‌ریزی فضایی برجسته کرد (Wang & Liu, ۲۰۲۲). در یک جامعه پایدار، برنامه‌ریزان برای فراهم کردن زمینه اشتغال و مسکن همه افراد جامعه تلاش می‌کنند تا رونق اقتصادی در شهر را تضمین کنند که به نوبه خود به کاهش جرم، خشونت و فقر کمک می‌کند. از نظر اقتصادی، معیار شمولیت به موضوع ارائه فرصت‌هایی برابر برای اشتغال، آموزش، درمان و تضمین سهم عادلانه در افزایش رفاه مربوط می‌شود (Schreiber & Carius, ۲۰۱۶). در این جوامع، برنامه‌ریزان امکانی برای شنیدن صداها و مشورت، طراحی مشترک و همکاری در فرآیند تصمیم‌گیری با مقامات محلی و ذینفعان فراهم می‌کنند. همچنین نظر تمام گروه‌های محلی و به ویژه آن‌هایی که شرایط محرومیت اجتماعی-فضایی را تجربه می‌کنند مانند افراد با پیشینه‌های فرهنگی مختلف، مشکلات حرکتی، سالمندان، جوانان و دانش‌آموزان را در نظر می‌گیرند تا از طریق برنامه‌های توانمندسازی آسیب‌پذیری آن‌ها کاهش یابد (Omholt, ۲۰۱۹; Sturiale et al., ۲۰۲۰).

جدول ۱ معیارهای جوامع ایمن و عادلانه در راستای تحقق شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای (Chatziyiannaki & Pozoukidou, ۲۰۲۱)

معیارها	ابعاد مورد ارزیابی
شمولیت	مسکن: تنوع و مقرون به صرفه بودن گزینه‌های مسکن نزدیکی به خدمات: انواع خدمات در محل سکونت نزدیکی به محل کار: میانگین زمان صرف شده برای رفت و آمد به محل کار یا فاصله تا محل کار از خانه تراکم ساختمان: تراکم متوسط ساختمان ترکیب کاربری اراضی: تنوع کاربری‌ها از جمله مسکن دسترسی: دسترسی به سیستم‌های حمل و نقل سریع (راه آهن، مترو، تراموا)، دسترسی به راه‌حل‌های جایگزین مانند مسیرهای دوچرخه‌سواری مشارکت عمومی: فرآیندهای طراحی مشترک برای شکل دادن فضاهای شهری، فرایند برنامه‌ریزی از پایین به بالا برای بهبود کیفیت زندگی شهروندان
سلامت	نزدیکی به مراکز عرضه غذای سالم و مقرون به صرفه از طریق بازارهای مواد غذایی تازه و باغ‌های شهری جامعه نزدیکی به مراکز درمانی پیوستگی و چندمنظوره بودن فضاهای سبز و باز امکان پیاده‌روی، دوچرخه‌سواری، اسکووتر و غیره نزدیکی به مراکز فرهنگی و تفریحی فرآیند ساخت و برنامه‌ریزی جامعه همکاری ذینفعان و جامعه به نفع گروه‌های خاص (کودکان، سالمندان، افراد دارای معلولیت و ...) تعامل بین شهروندان در ایجاد فعالیت‌های فرهنگی و تفریحی (باغبانی شهری، گروه‌های پیاده‌روی و ورزشی) همکاری ذینفعان و جامعه به نفع گروه‌های خاص (کودکان، سالمندان، افراد دارای معلولیت و ...)
امنیت	اشتراک ایمن فضای عمومی (از جمله فضای جاده) برای فعالیت‌های فرهنگی و تفریحی مقررات فاصله‌گذاری اجتماعی به دلیل محدودیت‌های کووید-۱۹ بهبود گزینه‌های جابجایی ایمن به دلیل کووید-۱۹، یعنی شیوه‌های اشتراک گذاری جاده محله‌های پویا از نظر تنوع فعالیت در فضای عمومی شیوه‌های مشارکتی به منظور به کارگیری افراد در هر سن و توانایی برای جلوگیری از انزوای فیزیکی، اجتماعی آن‌ها

نمونه‌ای از شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای در جهان

شهر پاریس

اولین تلاش نظام‌مند در راستای ایجاد شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای و به کارگیری اصول آن در پاریس انجام شد. در ژانویه ۲۰۲۰، آن هیدالگو^۱ برنامه خود برای انتخابات شهرداری را بر اساس این مفهوم استوار کرد و با دوچرخه‌سواری در سطح شهر سعی داشت دیدگاه خود را به مردم نشان دهد (Bruno et al., ۲۰۲۳). او پس از انتصاب، به توسعه خدمات در سطح مناطق شهری پرداخت و با ایجاد فرصت‌هایی برای رشد مشاغل محلی و گسترش مسیرهای دوچرخه‌سواری، به کاهش ترافیک کمک شایانی کرد. هیدالگو همچنین سالانه یک میلیارد یورو برای حفظ و زیباسازی خیابان‌ها، میدان‌ها و باغ‌های شهر متعهد شد. پاریس اکنون در صدر فهرست شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای قرار دارد (Moreno et al., ۲۰۲۱).



شکل ۲ الگوی شهر ۱۵ دقیقه‌ای در برنامه انتخاباتی آن هیدالگو (Sadeghi & Sharifi, Garmsir-Khavarian, ۲۰۲۳)

در نتیجه تلاش‌های هیدالگو و مورنو، پاریس به یک مدل مرجع برای شهر ۱۵ دقیقه‌ای تبدیل شد. در سه سال گذشته، چندین شهر دیگر نیز همین روند را دنبال کردند. به عنوان مثال، استکهلم برنامه‌ای به نام «شهر یک دقیقه‌ای» را توسعه داد که ایده «۱۵ دقیقه» را تا حد افراطی اجرا می‌کرد. میلان نیز مدل پاریس را پذیرفت و از آن اقتباس کرد. کاربرد مدل پاریسی عموماً مبتنی بر استفاده از فضاهای یکسان برای فعالیت‌های چندگانه یا کاربری‌های مختلط است (Bruno et al., ۲۰۲۳).

بحث و نتیجه‌گیری

شهرهای ۱۵ دقیقه‌ای به عنوان محیط‌های شهری در نظر گرفته شده‌اند که فرصت‌هایی را برای تعامل ساکنین در سطح محله، مانند پیاده‌روها و فضاهای باز، افزایش می‌دهند. در این راستا، درگیر کردن جوامع محلی در تمام مراحل فرآیند برنامه‌ریزی، از شکل دادن به سیمای سرزمین محله تا انتخاب و به کارگیری پروژه‌های محلی حیاتی است. در مدل شهر ۱۵ دقیقه‌ای، اجرای این روند به‌ویژه برای جوامع کم‌درآمد و به حاشیه رانده شده حائز اهمیت است. زیرا برنامه‌ریزان باید اطمینان حاصل کنند که برنامه‌ها بر مسائل واقعی محله که لزوم اجرای آن توسط مردم درک شده، استوار است. بنابراین رویکرد شهر ۱۵ دقیقه‌ای یک ایده جدید رادیکال نیست زیرا از فرایند برنامه‌ریزی پایین به بالا و با چشم‌اندازی بلندمدت الهام می‌گیرد. به عبارت دیگر، به کارگیری مفهوم شهر ۱۵ دقیقه‌ای به معنای مجاورت عملکردهای شهری در مقیاس محلات، همراه با تغییرات سیستمی در الگوهای تخصیص منابع و طرح‌های حکمرانی در سطح شهر است. پژوهش‌هایی که تاکنون در حوزه این مفهوم انجام شده اغلب مروری بوده و پژوهش‌های آتی می‌تواند در راستای اندازه‌گیری میزان

دسترسی به خدمات با وسایل حمل و نقل عمومی، تأثیر مورفولوژی جاده‌ها در سرعت دسترسی و تأثیر شیب در پارامتر مجاورت باشد. عامل دیگری که به میزان قابل توجهی بر مؤلفه مجاورت اثر دارد، زمان است. برای مثال، بسته به هدف پیاده‌روی، برخی از محله‌ها ممکن است در آخر هفته‌ها برخلاف روزهای دیگر هفته، قابلیت پیاده‌روی بیشتری داشته باشند. یک مثال معنی‌دار، وجود بازارها در برخی از روزهای هفته است. در مناطقی که سوپرمارکت‌ها یا مغازه‌ها حضور ندارند، یک بازار می‌تواند سطح مجاورت را کاملاً تغییر دهد. حتی در طول یک روز، مقدار مجاورت می‌تواند تغییر کند. در نهایت، تحقیقات بیشتری می‌تواند برای اصلاح انتخاب معیارها، طبقه‌بندی آن‌ها و فهرست خدمات موجود در هر طبقه انجام شود.

مراجع

- Allam, Z., Bibri, S. E., Jones, D. S., Chabaud, D., & Moreno, C. (2022). Unpacking the '15-Minute City' via 6G, IoT, and Digital Twins: Towards a New Narrative for Increasing Urban Efficiency, Resilience, and Sustainability. *Sensors (Basel)*, 22(4). <https://doi.org/10.3390/s22041369>
- Allam, Z., Moreno, C., Chabaud, D., & Pratlong, F. (2020). Proximity-Based Planning and the "15-Minute City": A Sustainable Model for the City of the Future. In *The Palgrave Handbook of Global Sustainability* (pp. 1-20). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38948-2_178-1
- Allam, Z., Nieuwenhuijsen, M., Chabaud, D., & Moreno, C. (2022). The 15-minute city offers a new framework for sustainability, liveability, and health. *The Lancet Planetary Health*, 6(3), e181-e183. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00014-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00014-6)
- Anik, M. A. H., & Habib, M. A. (2023). COVID-19 and Teleworking: Lessons, Current Issues and Future Directions for Transport and Land-Use Planning. *Transportation Research Record*, 03611981231166384.
- Bertolini, L., Le Clercq, F., & Kapoen, L. (2005). Sustainable accessibility: a conceptual framework to integrate transport and land use plan-making. Two test-applications in the Netherlands and a reflection on the way forward. *Transport policy*, 12(3), 207-220.
- Bibri, S. E., Krogstie, J., & Kärrholm, M. (2020). Compact city planning and development: Emerging practices and strategies for achieving the goals of sustainability. *Developments in the Built Environment*, 4, 100021. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100021>
- Birkenfeld, C., Victoriano-Habit, R., Alousi-Jones, M., Soliz, A., & El-Geneidy, A. (2023). Who is living a local lifestyle? Towards a better understanding of the 15-minute-city and 30-minute-city concepts from a behavioural perspective in Montréal, Canada. *Journal of Urban Mobility*, 3, 100048. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.urbmob.2023.100048>
- Boot, M., Ulak, M. B., Geurs, K. T., & Havinga, P. J. M. (2024). Using body sensors for evaluating the impact of smart cycling technologies on cycling experiences: a systematic literature review and conceptual framework. *European Transport Research Review*, 16(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s12544-024-00635-3>
- Bruno, D. M., Musante, G., & Dacarro, F. (2023). Materials for a debate on the 15-minute city: Public transportation's effect on urban space and time in two Asia-based alternative proposals. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 1-23. <https://doi.org/10.1080/13467581.2023.2287223>
- Di Marino, M., Tomaz, E., Henriques, C., & Chavoshi, S. H. (2023). The 15-minute city concept and new working spaces: a planning perspective from Oslo and Lisbon. *European Planning Studies*, 31(3), 598-620. <https://doi.org/10.1080/09654313.2022.2082827>
- Elldér, E. (2024). Built environment and the evolution of the "15-minute city": A 25-year longitudinal study of 200 Swedish cities. *Cities*, 149, 104942. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104942>
- Gower, A., & Grodach, C. (2022). Planning Innovation or City Branding? Exploring How Cities Operationalise the 20-Minute Neighbourhood Concept. *Urban Policy and Research*, 40, 1-17. <https://doi.org/10.1080/08111146.2021.2019701>
- Guzman, L. A., Arellana, J., Oviedo, D., & Moncada Aristizábal, C. A. (2021). COVID-19, activity and mobility patterns in Bogotá. Are we ready for a '15-minute city'? *Travel Behaviour and Society*, 24, 245-256. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tbs.2021.04.008>

- Hall, P., & Tewdwr-Jones, M. (2019). *Urban and regional planning*. Routledge.
- Kallus, R., & Law-Yone, H. (2000). What is a neighbourhood? The structure and function of an idea. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 27(6), 815-826.
- Khavarian-Garmsir, A. R., Sharifi, A., Hajian Hossein Abadi, M., & Moradi, Z. (2023). From Garden City to 15-Minute City: A historical perspective and critical assessment. *Land*, 12(2), 512.
- Khavarian-Garmsir, A. R., Sharifi, A., & Sadeghi, A. (2023). The 15-minute city: Urban planning and design efforts toward creating sustainable neighborhoods. *Cities*, 132, 104101. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.104101>
- Knap, E., Ulak, M. B., Geurs, K. T., Mulders, A., & van der Drift, S. (2023). A composite X-minute city cycling accessibility metric and its role in assessing spatial and socioeconomic inequalities – A case study in Utrecht, the Netherlands. *Journal of Urban Mobility*, 3, 100043. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.urbmob.2022.100043>
- Kohon, J. (2018). Social inclusion in the sustainable neighborhood? Idealism of urban social sustainability theory complicated by realities of community planning practice. *City, Culture and Society*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.ccs.2018.08.005>
- Li, M., Zeng, Z., & Wang, Y. (2021). An innovative car sharing technological paradigm towards sustainable mobility. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125626. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125626>
- Madsen, D. L. (2023). *Postmodernism: a bibliography, 1926-1994* (Vol. 12). Brill.
- Moreno, C., Allam, Z., Chabaud, D., Gall, C., & Pratlong, F. (2021). Introducing the “15-Minute City”: Sustainability, resilience and place identity in future post-pandemic cities. *Smart cities*, 4(1), 93-111.
- Murgante, B., Valluzzi, R., & Annunziata, A. (2024). Developing a 15-minute city: Evaluating urban quality using configurational analysis. The case study of Terni and Matera, Italy. *Applied Geography*, 162, 103171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.103171>
- Olivari, B., Cipriano, P., Napolitano, M., & Giovannini, L. (2023). Are Italian cities already 15-minute? Presenting the Next Proximity Index: A novel and scalable way to measure it, based on open data. *Journal of Urban Mobility*, 4, 100057. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.urbmob.2023.100057>
- Omholt, T. (2019). Strategies for inclusive place making. *Journal of Place Management and Development*, 12(1), 2-19.
- Patricios, N. N. (2002). Urban design principles of the original neighbourhood concepts. *Urban morphology*, 6(1), 21-32.
- Pisano, C. (2020). Strategies for Post-COVID Cities: An Insight to Paris En Commun and Milano 2020. *Sustainability*, 12(15), 5883. <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/15/5883>
- Pozoukidou, G., & Chatziyiannaki, Z. (2021). 15-Minute City: Decomposing the New Urban Planning Eutopia. *Sustainability*, 13(2), 928. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/2/928>
- Salngaros, N. A. (2006). Compact city replaces sprawl. *Crossover: Architecture, urbanism, technology*, 10, 100-115.
- Schreiber, F., & Carius, A. (2016). The Inclusive City: Urban Planning for Diversity and Social Cohesion. In *State of the World: Can a City Be Sustainable?* (pp. 317-335). Island Press/Center for Resource Economics. https://doi.org/10.5822/978-1-61091-756-8_27
- Sharifi, A., Khavarian-Garmsir, A. R., Allam, Z., & Asadzadeh, A. (2023). Progress and prospects in planning: A bibliometric review of literature in Urban Studies and Regional and Urban Planning, 1956–2022. *Progress in Planning*, 173, 100740.
- Sharifi, A., Khavarian-Garmsir, A. R., & Kummitha, R. K. R. (2021). Contributions of Smart City Solutions and Technologies to Resilience against the COVID-19 Pandemic: A Literature Review. *Sustainability*, 13(14), 8018. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/14/8018>
- Son, T. H., Weedon, Z., Yigitcanlar, T., Sanchez, T., Corchado, J. M., & Mehmood, R. (2023). Algorithmic urban planning for smart and sustainable development: Systematic review of the literature. *Sustainable Cities and Society*, 94, 104562. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104562>
- Stevens, M. R. (2017). Does compact development make people drive less? *Journal of the American Planning Association*, 83(1), 7-18.
- Sturiale, L., Scuderi, A., Timpanaro, G., Foti, V. T., & Stella, G. (2020). Social and inclusive “value” generation in metropolitan area with the “urban gardens” planning. *Values and Functions for Future Cities*, 285-302.
- Talubo, J. P., Morse, S., & Saroj, D. (2022). Whose resilience matters? A socio-ecological systems approach to defining and assessing disaster resilience for small islands. *Environmental Challenges*, 7, 100511. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100511>

- Urbanism, C. f. t. N. (2000). Charter of the new urbanism. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 20(4), 339-341.
- Wang, X., & Liu, Z. (202). Neighborhood environments and inclusive cities: An empirical study of local residents' attitudes toward migrant social integration in Beijing, China. *Landscape and Urban Planning*, 226, 104495.
- Weng, M., Ding, N., Li, J., Jin, X., Xiao, H., He, Z., & Su, S. (2019). The 15-minute walkable neighborhoods: Measurement, social inequalities and implications for building healthy communities in urban China. *Journal of Transport & Health*, 13, 259-273.



برآورد میزان سطوح نفوذناپذیر شهری با بکارگیری فناوری های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی: مطالعه موردی: منطقه ۶ شهر تهران

مهسا عظیم پور^۱ ✉، شهرزاد فریادی^۲ ID، زهرا دهقان منشادی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه برنامه ریزی و مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

نویسنده مسئول: Azimpourmahsa78@gmail.com

۲. دانشیار، گروه برنامه ریزی و مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳. دانشجوی دکتری، گروه برنامه ریزی و مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخها: دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷	پژوهش حاضر به بررسی سطوح نفوذناپذیر در شهر تهران (منطقه ۶ شهر تهران) و تأثیرات آن بر رواناب و سیلاب های شهری می پردازد. در نیم قرن گذشته، تغییرات سریع در کاربری اراضی و افزایش جمعیت منجر به کاهش فضای سبز و گسترش سطوح نفوذناپذیر شده است. این سطوح به عنوان مواد مصنوعی شناخته می شوند که مانع از نفوذ آب می شوند و شامل جاده ها، ساختمان ها و سایر سازه ها هستند. افزایش سطوح نفوذناپذیر، رواناب ناشی از بارش های شدید را افزایش می دهد و این موضوع به نوبه خود، خطر وقوع سیلاب ها را در مناطق شهری افزایش می دهد. مورد مطالعه این پژوهش، منطقه ۶ شهر تهران است. این پژوهش با استفاده از تصاویر ماهواره ای و نرم افزارهای جغرافیایی، درصد سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر در منطقه ۶ تهران را شناسایی و تحلیل کرده است. سپس با استفاده از الگوریتم ها و نرم افزارهای جغرافیایی متعدد، داده ها پیش پردازش، طبقه بندی، تحلیل و پس از ترسیم نقشه های نفوذپذیری و نفوذناپذیری، درصد مساحت های هر یک از سطوح بررسی شد. نتایج نشان می دهد مناطق نفوذناپذیر در کل شهر تهران معادل ۲۰/۸۹٪ از کل مساحت است. با این حال، در منطقه ۶ نسبت درصد سطوح نفوذپذیر به مساحت کل منطقه، تنها ۱۰/۱۹٪ است که نشان دهنده درصد کمتر مناطق نفوذپذیر نسبت به شهر تهران، در این منطقه است و نشان دهنده این است که این منطقه به شدت تحت تأثیر ساخت و سازهای بی برنامه و کاهش فضای سبز قرار دارد که باعث مشکلاتی نظیر جزایر گرمایی و سیلاب های سطحی شده است. در نهایت، این مطالعه بر ضرورت بهبود مدیریت آب های سطحی و افزایش فضای سبز به عنوان راهکارهایی برای کاهش آثار منفی سطوح نفوذناپذیر تأکید می کند.
واژگان کلیدی: نفوذناپذیری رواناب فضای سبز توسعه شهری	

استناد: فریادی، شهرزاد، عظیم پور، مهسا، دهقان منشادی، زهرا (۱۴۰۴). برآورد میزان سطوح نفوذناپذیر شهری با بکارگیری فناوری های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی: مطالعه موردی: منطقه ۶ شهر تهران. *رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط*، ۲(۲)، ۴۰-۳۱.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045355.1066>

© ۱۴۰۴ (۲۰۲۶) نویسندگان مقاله، نشریه رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط، ناشر: سازمان مطالعه و تدوین کتب دانشگاهی در علوم اسلامی و انسانی (سمت).



The effect of impervious surfaces on urban runoff and flooding: A case city study of District 6 of Tehran

Mahsa Azimpour ^{1✉} , Shahrzad Faryadi ² , Zahra Dehghan Manshadi ³

1. Master's student, Department of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. Corresponding author: Azimpourmahsa78@gmail.com
2. Associate Professor, Department of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.
3. Ph.D. student, Department of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

Article Info

History

Received: November 16, 2025

Accepted: January 07, 2026

Keywords

Impenetrability

Runoff

Green space

Urban development

Abstract

This study examines impervious surfaces in Tehran and their impacts on urban runoff and flooding. Over the past half-century, rapid changes in land use and population growth have led to a decrease in green spaces and an increase in impervious surfaces. These surfaces, recognized as artificial materials that prevent water infiltration, include roads, buildings, and other structures. The rise in impervious surfaces exacerbates runoff during heavy rainfall, consequently increasing the risk of flooding in urban areas. The case study of this research is District 6 of Tehran. This research utilized satellite imagery and geographic information system (GIS) software to identify and analyze the percentage of permeable and impervious surfaces in Region 6 of Tehran. Then, using various algorithms and geographic software, the data were pre-processed, classified, and analyzed. After mapping the permeable and impermeable surfaces, the percentage of each surface type was examined. The results show that impervious surfaces account for 89.20% of the total area in Tehran. However, in District 6, the percentage of permeable surfaces relative to the total area is only 19.10%, indicating a significantly lower proportion of permeable areas compared to the city as a whole. The findings indicate that this area is significantly affected by unplanned construction and the reduction of green spaces, leading to issues such as urban heat islands and surface flooding. Ultimately, the study emphasizes the need for improved management of surface water and the enhancement of green spaces as strategies to mitigate the negative effects of impervious surfaces.

Citation: Faryadi, Sh., Azimpour, M., & Dehghan Manshadi, Z. (2025). The effect of impervious surfaces on urban runoff and flooding: A case study of District 6 of Tehran city. *Innovative Approaches in Human–Environment Studies*, 2(2), 31-40. <https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045355.1066>

© 2025 Authors, Innovative Approaches in Human–Environment Studies.

Publisher: The Organization for Researching and Composing University Textbooks in the Islamic Science and Humanities (SAMT)

مقدمه

طی نیم قرن گذشته، فعالیت‌های انسانی از طریق جنگل زدایی و توسعه شهرها تغییرات چشمگیری بر زمین اعمال کرده‌است. در مناطق شهری، مشکلات محیط زیستی فراوانی ازجمله کاهش فضای سبز به دلیل تغییرات سریع پوشش زمین رخ داده‌است (امیری و همکاران، ۲۰۰۶: ۲۰۰۹). جمعیت شهری ایران طی ۹۰ سال گذشته حدود ۲۶ برابر افزایش یافته که سبب تغییرات زیادی در شهرها شده‌است. امروزه به دنبال روند افزایشی شهرنشینی، سطوح غیرقابل نفوذ شهری نیز افزایش پیدا کرده‌است. سطوح نفوذ ناپذیر به‌طور کلی به‌عنوان مواد مصنوعی که آب نمی‌تواند در آن نفوذ کند، شناخته می‌شوند و سقف ساختمان‌ها، سیستم‌های حمل‌ونقل مانند جاده‌ها، راه‌های عبور، پارکینگ‌ها و پیاده‌روها را شامل می‌شود (لی، ۲۳۸۹: ۲۰۱۷). باران یکی از رویدادهای طبیعی است که چنانچه تدابیر لازم جهت استفاده درست و به موقع از آن به کار رود می‌تواند در رفع نیازهای بشر بسیار مؤثر باشد. هر گاه بارانی با شدت زیاد بر روی حوضه‌ای می‌بارد، به دلیل کاهش نفوذپذیری خاک در همان اوایل بارندگی، آب بر روی خاک جاری شده و از طریق مسیل‌ها به رودخانه‌ها می‌پیوندد. تغییر الگوی استفاده از زمین و افزایش شهری شدن باعث برهم خوردن پروسه‌های هیدرولوژیکی منطقه و افزایش مناطق نفوذناپذیر باعث برهم خوردن تعادل طبیعی آب می‌شود. کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب، منجر به افزایش پیک سیلاب حتی در بارش‌های کم در دوره زمانی کوتاه مدت می‌شود. گسترش روزافزون مناطق شهری و از بین رفتن اراضی طبیعی موجب گسترش مناطق غیرقابل نفوذ شده که این حالت موجب افزایش حجم و ارتفاع رواناب ناشی از بارش در حوضه‌های شهری می‌شود. در صورت وجود زهکشی نامناسب رواناب ناشی از بارش‌های شهری، امکان بروز سیلاب در سطح شهر افزایش می‌یابد. فشار فعالیت‌های مضر بشری اغلب سبب افزایش سیلاب‌ها می‌شود (ایستومینا و همکاران، ۲۰۲۰). در صورت عدم زهکشی مناسب رواناب ناشی از بارش‌های شهری امکان بروز سیلاب در سطح شهر افزایش می‌یابد. به دلیل اثرات مخرب ناشی از سیلاب در حوضه‌های شهری چگونگی انتقال، مدیریت و تخلیه رواناب‌های ایجاد شده در سطح شهر مورد توجه محققین و سازمان‌های مربوطه از جمله شهرداری‌ها قرار گرفته است. آمار و تحقیقات خطر وقوع سیل نشان می‌دهد که هم‌زمان با توسعه اقتصادی، افزایش جمعیت، تجمع و انباشت سرمایه‌ها و کاربری نادرست اراضی در دشت‌های سیلابی رودخانه‌های بزرگ، خسارات و ضایعات اقتصادی مرتبط با سیلاب‌ها در حال افزایش است. در پنج دهه گذشته روند افزایش سیل نشان می‌دهد که تعداد وقوع سیل در دهه ۸۰ نسبت به دهه ۴۰ حدود ۱۰ برابر شده و به عبارتی ۹۰۰ درصد افزایش یافته‌است (عبدی، ۱۳۳۲). تغییر سطوح شهری به نفوذناپذیری از نظر جذب دما و بروز پدیده جزایر گرمایی نیز حائز اهمیت است. با توجه به موارد بیان شده، ضرورت انجام این پژوهش برای شناسایی درصد سطوح نفوذ ناپذیر در سطح منطقه امری بدیهی است. هدف از این پژوهش، شناسایی عوامل مؤثر بر بروز سیلاب شهری و مناطق در معرض خطر سیلاب به منظور ارائه راهکارهایی برای کاهش خطرات و خسارات سیلاب در محدوده مطالعاتی است. یکی از راه‌حل‌های مبتکرانه برای این مشکل، حمایت از استفاده از بتن گذرا یا «بتن تشنه» است. سنگدانه‌های درشت، حفره‌هایی را در بتن ایجاد می‌کنند که نفوذ تدریجی آب باران به زیر زمین را تسهیل می‌کند و یک جایگزین عالی سازگار با محیط زیست ارائه می‌دهد. این نه تنها به کنترل سیلاب کمک می‌کند، بلکه آلودگی را به حداقل می‌رساند و فرسایش را کاهش می‌دهد (جدها، ریا و همکاران، ۲۰۲۲). در دو دهه گذشته، پژوهشگران مختلف پژوهش‌های زیادی به

منظور توسعه روش‌ها و تکنیک‌های لازم برای تشخیص و تعیین پراکندگی مکانی سطوح نفوذناپذیر و تعیین آثار منفی آن انجام داده‌اند. در ایران، اکبری در سال ۲۰۰۰ با استفاده از سنجنده TM، الگوی توزیع درجه حرارت شهر تهران را مورد مطالعه قرار داد. او با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی حداکثر احتمال (MLC) کلاس‌های کاربری پارک تفریحی، پارک جنگلی، مسکونی-صنعتی، معابر، اراضی کم درخت و اراضی بایر را از سه مولفه اول حاصل از تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) استخراج کرد و میانگین حرارت برای هریک از کلاس‌های کاربری را به‌دست‌آورد. وی با بررسی‌ها و ارزیابی‌های انجام شده، نتیجه گرفت که کلاس‌های کاربری دارای میانگین حرارتی متفاوت با یکدیگر بودند و کلاس‌های حرارتی یکسان در نقشه کاربری تقریباً بر کلاس‌های دمایی ویژه‌ای انطباق داشتند. امیری و همکاران، با استفاده از تصاویر TM و ETM+ چند زمانه شهر تبریز، به بررسی تغییرپذیری فضایی-زمانی حرارت در زمینه کاربری/پوشش زمین پرداختند. نتایج نشان دادند که گرم‌ترین کلاس پوشش در سال ۱۹۹۸ کلاس کاربری مسکونی بوده است. اما در سال ۲۰۰۱ و ۱۹۸۹ زمین‌های بایر گرم‌ترین کلاس‌ها بودند. بررسی رابطه میان NDVI و حرارت سطح با استفاده از تحلیل همبستگی و رگرسیون چند متغیره، بیانگر نقش موثر پوشش گیاهی در تعدیل دمای سطح بود (شانگ و ویلسون، ۲۰۰۹). نشان دادند در حوزه‌های شهری ۹۰ درصد رگبارها به رواناب تبدیل می‌شود. در حالی که در حوزه‌های روستایی این مقدار ۲۵ درصد است. ساریا و مجال سال ۲۰۱۲ در تحقیقی پیرامون مدیریت سیلاب‌های شهری، سیاست‌هایی را در رابطه با فعالیت‌های بشر و برنامه‌ریزی دولت‌ها ارائه دادند که در کاهش سیل در مناطق شهری موثر است. سلاجقه و همکاران، در مقاله‌ای با عنوان «برآورد رواناب در حوزه‌های آبخیز شهری با استفاده از مدل‌های تحلیلی» به تعیین مقدار رواناب در حوزه‌های آبخیز شهری در منطقه ۲۲ شهر تهران پرداختند. در این مطالعه، از دو مدل یکی بر اساس ضریب رواناب و دیگری با در نظر گرفتن ضریب نفوذپذیری استفاده شده است. مقایسه نتایج به‌دست آمده از برآورد مدل‌ها با مقادیر مشاهده شده در منطقه موردبررسی، نشان داد که هر دو مدل، در برآورد رواناب احتمالی از دقت خوبی برخوردارند. کومار و همکاران در ۲۰۱۳، در مقاله‌ای با عنوان «مدل‌سازی تغییرات رشد شهری و تأثیر آن بر ویژگی‌های رواناب سطحی» با استفاده از روش رگرسیون خطی به بررسی سطوح نفوذناپذیری شهری پرداخته و با برآورد حجم رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیک WetSpa، تأثیر افزایش سطوح نفوذناپذیر بر رواناب را موردبررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که افزایش سطوح نفوذناپذیر باعث افزایش ۱۲ درصدی حجم رواناب شده است؛ سپس با روش سلول‌های خودکار به پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی آینده پرداختند و با توجه به داده‌های گذشته و حال، به مدل‌سازی پارامترهای رواناب در آینده پرداختند. نگوین تی توی لین و همکاران سال ۲۰۲۰ در مقاله‌ای با عنوان «سنجش از دور و یادگیری ماشینی برای برجسته کردن همبستگی بین تغییرات کاربری/پوشش زمین و پتانسیل، GIS استفاده از سیل ناگهانی» با استفاده از سنجش از دور به بررسی همبستگی بین تغییر کاربری/پوشش زمین و تغییرات پتانسیل سیل ناگهانی در حوزه آبریز زابالا (رومانی) بین سال‌های ۱۹۸۹ و ۲۰۱۹ پرداختند. در آخر نتیجه گرفته‌اند میان تغییرات کاربری زمین/پوشش زمین با تغییراتی که در پتانسیل سیل ناگهانی رخ داده است همبستگی زیادی داشت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه ۶ شهرداری تهران یکی از مهم‌ترین و مرکزی‌ترین مناطق پایتخت است که به دلیل موقعیت مکانی ویژه خود، از اهمیت زیادی برخوردار است. این منطقه در بخش میانی شهر تهران قرار دارد و از شمال به بزرگراه همت، از غرب به بزرگراه چمران، از شرق به بزرگراه مدرس و خیابان مفتوح، و از جنوب به خیابان انقلاب محدود می‌شود. مساحت این

منطقه برابر با ۲۱۳۸,۴۵ هکتار است و حدود ۲,۳ درصد از کل مساحت شهر تهران را شامل می‌شود، که آن را به یکی از مناطق پرجمعیت و پرکاربرد شهری تبدیل کرده است (نیکبخت و همکاران، ۱۴۰۰). از نظر موقعیت اداری و تجاری، منطقه ۶ نقشی کلیدی در تهران دارد. بیش از ۳۰ درصد از ساختمان‌های دولتی و خصوصی تهران در این منطقه قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده تمرکز بالای فعالیت‌های اقتصادی و اداری است (رضایی و همکاران، ۱۳۹۹). وجود این تمرکز باعث شده است تا منطقه ۶ یکی از نقاط کلیدی شهر در ارائه خدمات دولتی و اقتصادی باشد. علاوه بر این، منطقه ۶ شامل ۶ ناحیه و ۱۸ محله است. به لحاظ تعداد محلات، این منطقه در رتبه سیزدهم بین مناطق تهران قرار دارد (کازمی و همکاران، ۱۳۹۸). این محله‌ها از نظر ترکیب بافت مسکونی، تجاری و اداری تنوع زیادی دارند و هر کدام از آنها ویژگی‌ها و نیازهای خاص خود را دارند. از نظر دسترسی، منطقه ۶ به دلیل مجاورت با شبکه‌های اصلی حمل‌ونقل از جمله بزرگراه‌های همت، چمران و مدرس و همچنین نزدیکی به مراکز علمی و فرهنگی مانند دانشگاه تهران، به یکی از مهم‌ترین مراکز شهری تبدیل شده است. این نزدیکی‌ها باعث شده تا این منطقه نقشی اساسی در تأمین نیازهای روزانه شهروندان ایفا کند (حسینی و همکاران، ۱۴۰۰).

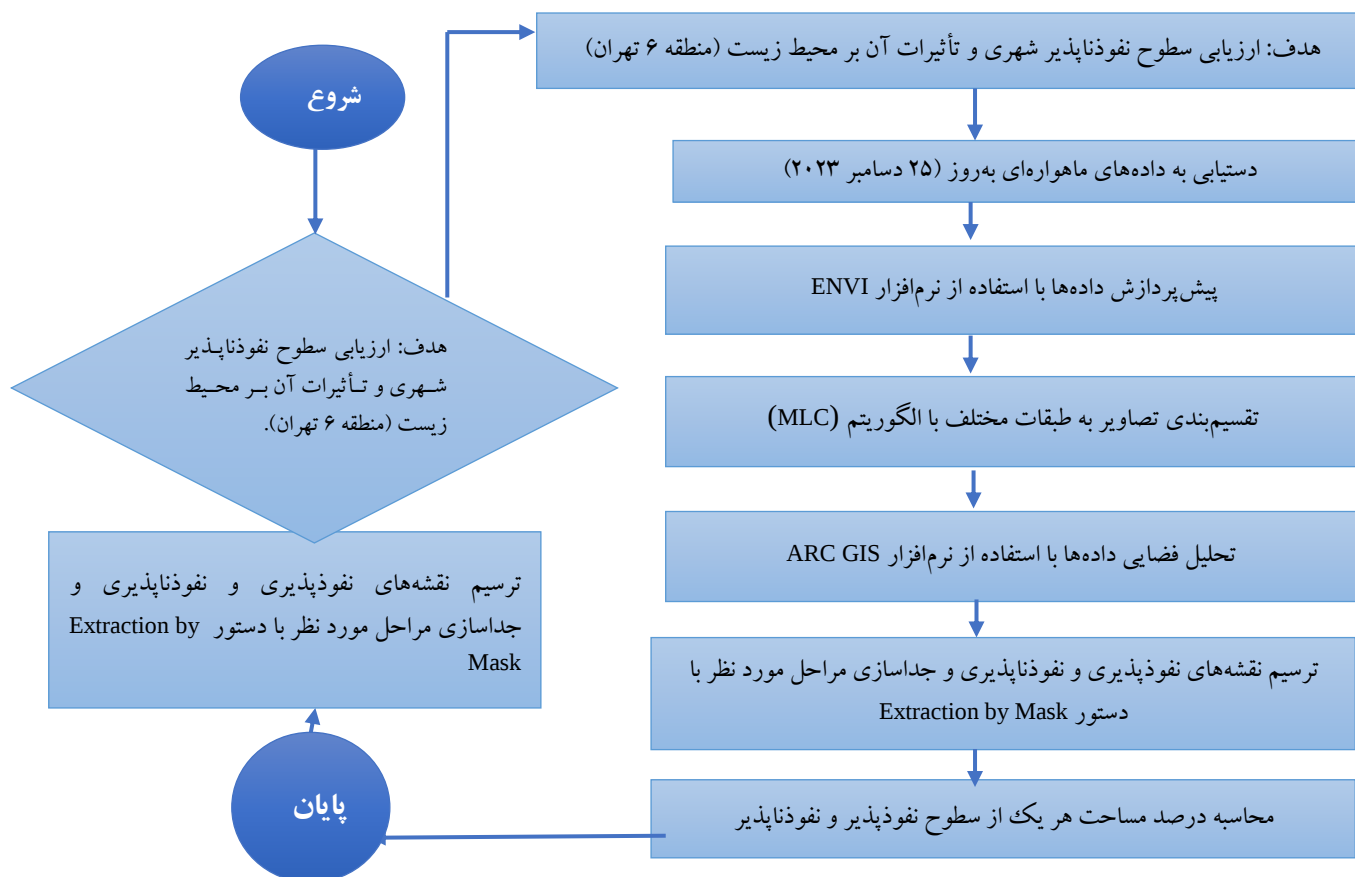


شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه

روش تحقیق

این پژوهش، با هدف ارزیابی سطوح نفوذناپذیر شهری و تأثیرات آن بر محیط زیست به‌ویژه در منطقه ۶ تهران، انجام شده است. برای دستیابی به این هدف، ابتدا داده‌های ماهواره‌ای به‌روز از سال ۲۰۲۳ از وبسایت USGS Earth Explorer (در تاریخ ۲۵ دسامبر ۲۰۲۳) دریافت شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار ENVI، داده‌ها پیش‌پردازش شدند. مراحل پردازش شامل تصحیحات هندسی و رادیومتریک تصاویر بود تا کیفیت داده‌ها برای تحلیل دقیق بهبود یابد. پس از پیش‌پردازش، تصاویر با الگوریتم Maximum Likelihood Classification (MLC) به طبقات مختلف کاربری زمین شامل مناطق بایر، فضای سبز، مناطق ساخته‌شده و منابع آبی طبقه‌بندی شدند. هر یک از این کلاس‌ها بر اساس نفوذپذیری به دو گروه نفوذپذیر (بایر، فضای سبز) و نفوذناپذیر (ساخته‌شده، آب) تقسیم شدند. در مرحله بعد، از نرم‌افزار ArcGIS برای تحلیل فضایی داده‌ها استفاده شد. با استفاده از لایه‌های کاربری زمین و شیب فایل منطقه ۶ تهران، نقشه‌های نفوذپذیری و نفوذناپذیری منطقه استخراج شدند. سپس با استفاده از دستور Extraction by Mask، مناطق مدنظر جدا و تحلیل شدند. برای ارائه نتایج دقیق‌تر، درصد مساحت

هر یک از سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر محاسبه شد. به منظور ارزیابی تأثیرات این سطوح بر رواناب‌های شهری و خطر وقوع سیلاب، از مقالات و مدل‌های پیشین به عنوان مرجع استفاده شد. نتایج این تحلیل‌ها با مطالعات مشابه در دیگر مناطق شهری مقایسه شد تا ارتباط بین نفوذناپذیری و وقوع سیلاب‌های شهری به‌طور علمی بررسی شود.



نتایج

طبق پژوهش انجام شده درصد بالایی از سطوح نفوذناپذیر در مناطق مرکزی شهر تهران مشهود است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که گسترش مناطق ساخته‌شده و کاهش قابل توجه فضای سبز و اراضی بایر در این مناطق، منجر به افزایش سطوح نفوذناپذیر شده‌است. مناطق نفوذناپذیر در کل شهر تهران معادل ۲۰/۸۹٪ از کل مساحت است. با این حال، در منطقه ۶ نسبت درصد سطوح نفوذپذیر به مساحت کل منطقه، تنها ۱۰/۱۹٪ است که نشان‌دهنده درصد کمتر مناطق نفوذپذیر نسبت به شهر تهران، در این منطقه است. این تفاوت را می‌توان به ساختار خاص منطقه ۶ که بخش زیادی از آن را فضاهای ساخته شده تشکیل می‌دهد، نسبت داد.

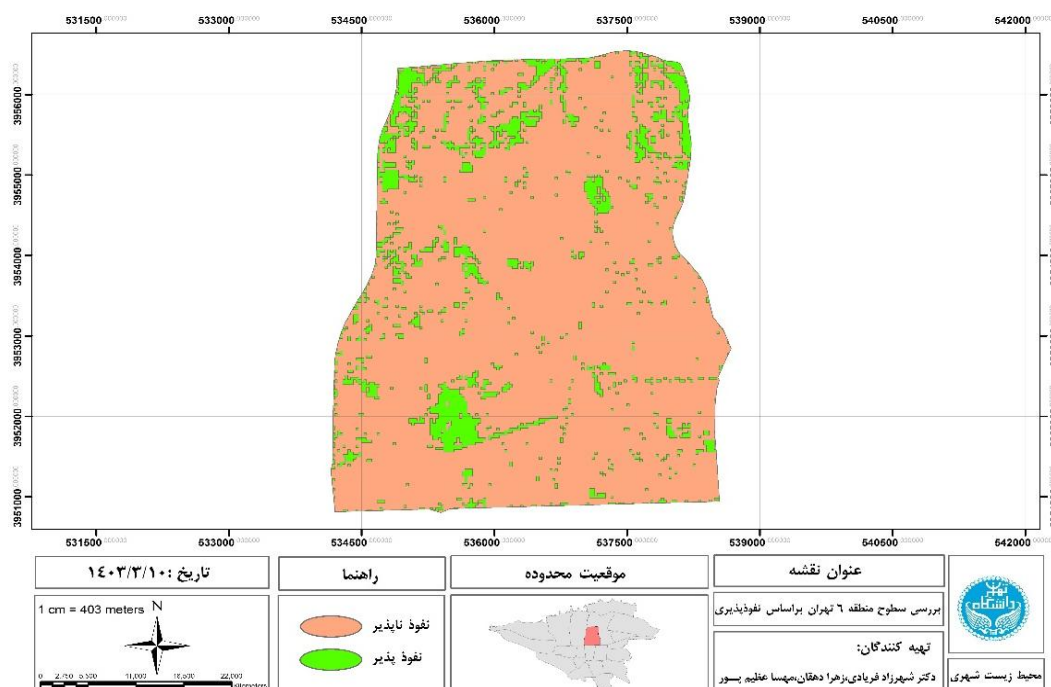
جدول ۱. برآورد مساحت و نسبت سطوح نفوذپذیر و ناپذیر شهر تهران و منطقه ۶. منبع: نگارندگان

منطقه	مساحت کل (کیلومتر مربع)	مساحت نفوذ ناپذیری	مساحت نفوذ پذیری	درصد نفوذناپذیری	درصد نفوذ پذیری
شهر تهران	۶۹۸۴۹۳	۵۵۲۹۲۳	۱۴۵۸۹۷	۲۰٪/۸۹	۷۹٪/۱۱
منطقه ۶	۲۱/۳۸	۱۹/۰۲	۲/۳۶	۱۰٪/۱۹	۸۹٪/۸۰

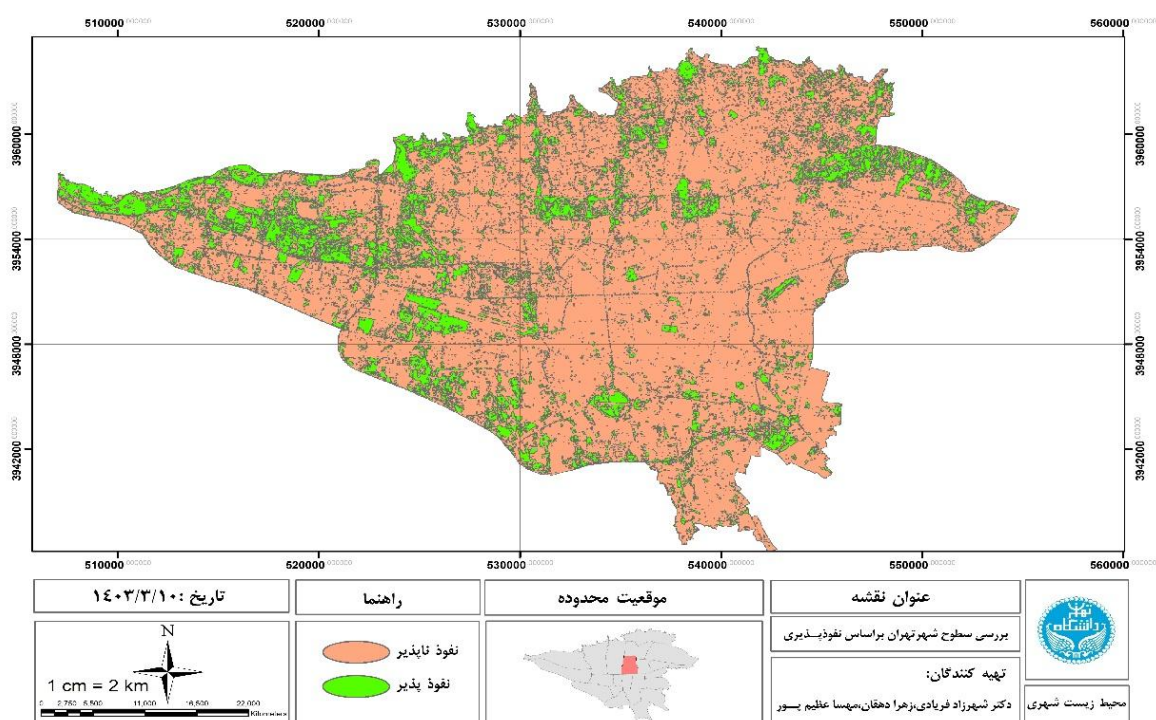
جدول فوق در برآوردی دقیق تر با محاسبه نسبت نفوذناپذیری منطقه ۶ و شهر تهران مارا از شرایط نامناسب موجود آگاه می‌کند.

از جمله چالش‌های عمده‌ای که در سطح شهر تهران و منطقه ۶ مشاهده شد، افزایش رواناب‌های سطحی و بروز سیلاب‌های ناگهانی به دلیل وجود مناطق نفوذناپذیر است. این مناطق شامل سطوح ساخته‌شده مانند جاده‌ها، پارکینگ‌ها و سقف ساختمان‌ها می‌باشد که امکان نفوذ آب به خاک را کاهش می‌دهد و رواناب سطحی را افزایش می‌دهد. تحقیقات مشابه نیز نشان داده است که گسترش مناطق نفوذناپذیر در مناطق شهری، به‌ویژه در مناطقی با توسعه سریع، منجر به افزایش شدت و حجم سیلاب‌های شهری می‌شود. تحلیل‌ها نشان داد که منطقه ۶ تهران نسبت به سایر مناطق، با کاهش قابل توجه فضای سبز و افزایش ساخت و ساز، مستعد افزایش پدیده جزایر گرمایی شهری و کاهش کیفیت زیست‌محیطی است. جزایر گرمایی شهری به دلیل ذخیره گرمای بیشتر توسط سطوح نفوذناپذیر شکل می‌گیرند و باعث افزایش دمای سطحی مناطق شهری می‌شوند. این پدیده می‌تواند به مشکلات بهداشتی و افزایش مصرف انرژی برای خنک‌سازی ساختمان‌ها منجر شود.

در نهایت، بررسی نقشه‌های تولید شده و تحلیل نشان می‌دهد که افزایش سطوح نفوذناپذیر نه تنها خطر سیلاب‌های ناگهانی را افزایش می‌دهد، بلکه مشکلات زیست‌محیطی دیگری نظیر کاهش جذب آب باران، کاهش نفوذپذیری خاک و افزایش دمای سطحی مناطق شهری را نیز به همراه دارد. با توجه به این تحلیل‌ها، ضروری است که برنامه‌های جامع شهری برای افزایش سرانه فضای سبز و کاهش استفاده از مصالح نفوذناپذیر اجرا شود تا تأثیرات منفی توسعه شهری بر روی هیدرولوژی منطقه و خطرات مرتبط با سیلاب‌ها کاهش یابد.



شکل ۲ سطوح نفوذپذیر شهر تهران. منبع نگارندگان



شکل ۳ سطوح نفوذپذیر منطقه ۶ شهرداری تهران. منبع نگارندگان

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر شهر تهران به‌ویژه منطقه ۶، در این پژوهش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل‌های مکانی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که افزایش شهرنشینی و توسعه مناطق ساخته‌شده در تهران، به‌ویژه در منطقه ۶، به‌طور قابل‌توجهی منجر به افزایش سطوح نفوذناپذیر و در نتیجه بروز مشکلاتی نظیر افزایش رواناب‌های سطحی و وقوع سیلاب‌های ناگهانی شده‌است. این تغییرات نه تنها باعث تغییر الگوهای هیدرولوژیکی شهر شده، بلکه منجر به بروز پدیده‌های دیگری نظیر جزایر گرمایی شهری نیز شده‌است. مطالعات نشان داده‌اند که سطوح نفوذناپذیر به دلیل جذب و ذخیره گرما، دمای سطحی مناطق شهری را افزایش می‌دهند که این امر به‌طور مستقیم بر کیفیت زیست‌محیطی و سلامت شهروندان تأثیر می‌گذارد (پارک و همکاران، ۲۰۲۰). از سوی دیگر، کاهش سطوح نفوذپذیر به دلیل کاهش فضاهای سبز و اراضی بایر، موجب افزایش حجم رواناب و کاهش نفوذپذیری خاک شده که این مسئله، خطر وقوع سیلاب‌های ناگهانی را افزایش می‌دهد (حیدری و همکاران، ۲۰۲۱). یکی از مهم‌ترین نتایج این پژوهش، مشخص کردن نقش سرانه فضای سبز در مدیریت و کاهش اثرات منفی مناطق نفوذناپذیر است. افزایش سرانه فضای سبز می‌تواند به‌عنوان راهکاری موثر برای کاهش اثرات رواناب‌های سطحی و کنترل سیلاب‌ها در مناطق شهری مطرح شود (موسوی و همکاران، ۲۰۲۳). در همین راستا، توصیه می‌شود که شهرداری‌ها و نهادهای مسئول با اجرای پروژه‌های افزایش فضای سبز، از جمله کاشت درختان و ایجاد پارک‌های جدید، نقش موثری در بهبود وضعیت نفوذپذیری زمین ایفا کنند. همچنین، ضروری است که در برنامه‌ریزی‌های شهری، از مصالح ساختمانی نفوذپذیر به‌جای مصالح معمولی استفاده شود. تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از موادی مانند بتن‌های نفوذپذیر، به دلیل امکان جذب آب و کاهش رواناب‌های سطحی، می‌تواند نقش موثری در کاهش خطرات سیلاب‌های ناگهانی داشته باشد (کیم و همکاران، ۲۰۲۲). استفاده از چنین مصالحی نه

تنها به کاهش آب‌های سطحی و خطرات ناشی از آن کمک می‌کند، بلکه به حفظ تعادل هیدرولوژیکی و جلوگیری از تخریب محیط‌زیست نیز کمک می‌کند. در نهایت، پیشنهاد می‌شود که علاوه بر اقدامات سازه‌ای مانند استفاده از مصالح نفوذپذیر و افزایش فضاها، مدیریت پایدار آب‌های سطحی نیز به‌عنوان یکی از راهکارهای کلیدی در نظر گرفته شود. این مدیریت شامل ایجاد سیستم‌های زهکشی مناسب، جمع‌آوری و استفاده مجدد از رواناب‌های سطحی و توسعه سیستم‌های طبیعی نفوذ آب است (راد و همکاران، ۲۰۲۲). اجرای چنین راهکارهایی نه تنها به کنترل سیلاب‌ها کمک می‌کند، بلکه به بهبود کیفیت آب و حفظ منابع آبی نیز منجر می‌شود.

منابع

- Haiderzadeh, M., Noheghar, A., Malkiyan, A., & Khorani, A. (2017). Evaluation and sensitivity analysis of runoff quantity and drainage system in coastal urban basins: A case study of Bandar Abbas coastal city. **Water and Soil Conservation Research**, 24(3).
- Ebrahimi Heravi, B., Riahi Bakhtiari, H., Anvaripour, R., & Safar Birandvand, P. (2015). Surface level entry estimation using pixel-based and sub-pixel methods in Karaj metropolis. **Geomatics National Conference**. Retrieved from <https://sid.ir/paper/892172/fa>
- Zangeneh Asadi, M., Taghavi Moghadam, R., & Akbari, M. (2017). Review and evaluation of mangrove forest change trends using remote sensing techniques: Case study in Bandar Abbas. **Iranian Natural Ecosystems**, 4(7), 17-32.
- Afshari Azad, M., & Pourki, H. (2012). Estimating surface runoff in Rasht city: A case study of Gholipoor Street to Yakh-Sazi roundabout. **Geographical Space* 11:19
- Safarrad, T., Yousefi, Y., & Rezaei Talaii, A. (2021). Analysis of changes in impervious surfaces and land surface temperature in Qaemshahr. **Applied Research in Geographical Sciences**, 21(62), 183-199. Retrieved from <https://sid.ir/paper/963399/fa>
- Alizadeh, M. (2020). Evaluation of factors influencing flood occurrence in Yasuj city and providing management solutions. **10th National Conference on Civil Engineering, Architecture, and Urban Planning**. Retrieved from <https://civilica.com/doc/1167282>
- Istomina, M. N., Kocharyan, A. G., & Lebedeva, I. P. (2005). Floods: Genesis, socioeconomic, and environmental impacts. **Water Resources**, 32, 349-853.
- Zoppou, C. (2001). Review of urban stormwater models. **Environmental Modelling and Software**, 16, 195-132.
- Jadhav, R., Vyas, K., Gollapudi, B., & Anil, T. (2022). Reviewing the implementation of 'Thirsty Concrete' in urban areas. **Materials Today: Proceedings**, 64, 1000-1005.
- Zhao, J., & Tsutsumida, N. (2020). Mapping fragmented impervious surface areas overlooked by global 1
- Smith, J. A., & Lee, Y. C. (2019). Urban flood management: Integrating green infrastructure solutions. **Journal of Hydrology**, 572, 835-846.
- Brown, C., & Milne, G. (2020). Climate resilience and flood risk management in urban environments. **Sustainable Cities and Society**, 55, 101-118.
- Li, X., & Li, Y. (2021). Remote sensing-based evaluation of urban heat islands and their link to land cover changes. **Remote Sensing of Environment**, 258, 112-127. and-cover products in Liping County, Guizhou Province, China. **Remote Sensing**, 12(9), 1527.



بررسی اثرات صنعت نفت بر بوم‌شناسی سیمای سرزمین در جزیره شهر خارگ

رضا کاکاوند^۱✉، حسین اینانلو^۲

۱. دانشجوی دکتری، اداره کل هواشناسی استان قزوین، قزوین، ایران. نویسنده مسئول: rez_kakavand@yahoo.com

۲. استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی قزوین، قزوین، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌ها: دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱	جزایر کوچک در تاریخ تمدن، عمدتاً نقش هم‌افزا در شکل‌گیری و تکوین تمدن‌های بشری خشکی‌های هم‌جوار داشته‌اند. چرا که این جزایر همواره به‌عنوان جاباهایی برای ایست و توان‌افزایی دریانوردان و نیز بارگیری و باردهی محموله‌های دریایی و گاه بنابر موقعیت ژئوپلیتیکی، به‌عنوان دژهای پیش‌آهنگ در حمله و دفاع عمل کرده‌اند. در ردیابی توان‌های فوق برای جزیره خارگ، خارگ امروز را باید بیشتر پایانه صدور نفت برشمرد که با بارگذاری‌های صنعت پتروشیمی، هیبت یک جزیره شهر نفتی را به خود گرفته‌است. در این میان، کارکرد جزیره خارگ دگرگونی‌های شکلی و ماهوی بسیاری را پذیرفته و به‌عنوان یک جزیره شهر در اکولوژی انسانی خلیج فارس و سواحل جنوبی ایران نقش آفرین شده‌است. کارکرد توان‌های محیطی خارگ در پذیرش جایگاه اول صدور نفت ایران اثرات متعددی داشته که در پژوهش حاضر مطالعه "بوم‌شناسی سیمای سرزمین" مدنظر است. در این مسیر و در استفاده از منابع کتابخانه‌ای، پس از بازنمایی تاریخ جزیره، ابتدا برای توصیف فضایی ویژگی‌های محیطی آن، تولید نقشه‌های موضوعی در نرم‌افزار GIS مد نظر بوده‌است. در ادامه، با به‌کارگرفتن نرم‌افزار Google Earth تغییرات مکانی-فضایی جزیره دورسنجی و دگردهایی عناصر سیمای سرزمین (لکه - گریدها) در دهه‌های اخیر پایش شده‌است. یافته‌های برآمده از مسیر پژوهشی فوق دلالت بر اختلال در عناصر ساختاری سیمای سرزمین جزیره دارد که با توجه با اصل "ساختار-عملکرد"، آفت خدمات اکوسیستمی را رقم زده‌است. از این رو و با هدف تعدیل اختلال‌های پیش‌آمده در سیمای سرزمین و با رویکرد "مدیریت یکپارچه نواحی ساحلی" پیشنهادهایی ارائه شده‌است.

استناد: کاکاوند، رضا، اینانلو، حسین (۱۴۰۴). بررسی اثرات صنعت نفت بر بوم‌شناسی سیمای سرزمین در جزیره شهر خارگ. *رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط*، ۲ (۲). ۵۸-۴۱.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045817.1064>

© ۱۴۰۴ (۲۰۲۶) نویسندگان مقاله، نشریه رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط، ناشر: سازمان مطالعه و تدوین کتب دانشگاهی در علوم اسلامی و انسانی (سمت).



Survey of the Impacts Petroleum Industry on the Landscape Ecology in Kharg Urban - Island

Reza Kakavand ¹, Hossein Inanlo ²

1. PhD Student, General Directorate of Meteorology of Qazvin Province, Qazvin, Iran.

2. Assistant Professor, Islamic Azad University, Qazvin Branch, Qazvin, Iran.

Corresponding author: rez_kakavand@yahoo.com

Article Info

History

Received: November 16, 2025

Accepted: December 22, 2025

Keywords

Kharg Island

Urban-island

landscape ecology

Oil industry

Abstract

In the history of civilization, small islands have mainly played a complementary role in the formation and evolution of human civilizations of neighboring lands. Because these islands have always acted as places to stop and strengthen the sailors, as well loading and unloading sea cargoes, and sometimes, depending on the geopolitical situation, as advance fortresses in attack and defense. In tracking the above capabilities for Kharg Island, today Kharg should be considered more of an oil export terminal, which has taken on the awe of an oil urban-island with the loadings of the petrochemical industry. In the meantime, the function of Kharg Island has accepted many changes in shape and substance and has played a role as an urban-island in the human ecology of the Persian Gulf and the southern coasts of Iran. The function of external environmental strengths in accepting the first position of Iran's oil export has had several impacts, which is considered in the present research to study the "landscape ecology". In this direction and in the use of library resources, after representing the history of the island, first, for the spatial description of the environmental features of the island, the production of thematic maps in GIS software has been considered. In addition, by using Google Earth software, the spatial changes of telemetry (RS) island and the metamorphoses of the landscape elements (patch – corridors) have been monitored in recent decades. The findings the above research path indicate a disturbance in the structural elements of the landscape of the island, which, according to the principle of "structure – function", has resulted in the decline of ecosystem services. Therefore, with the aim of adjusting the disturbances in the landscape and with the approach of "Integrated Coastal Zone Management", cases proposed.

Citation: Kakavand, R., & Inanlo, H. (2025). Survey of the Impacts Petroleum Industry on the Landscape Ecology in Kharg Urban - Island. *Innovative Approaches in Human–Environment Studies*, 2(2), 41-58.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045817.1064>

© 2025 Authors, Innovative Approaches in Human–Environment Studies.

Publisher: The Organization for Researching and Composing University Textbooks in the Islamic Science and Humanities (SAMT)

مقدمه

به‌عنوان مقدمه و پیش‌درآمد ورود به بحث مقاله پیش‌رو، طرح سه محور اساسی و توضیح درباره آنها، شامل: تبیین مسئله پژوهش، معرفی پیشینه تحقیق و سرانجام تشریح مبانی نظری پژوهش، مدنظر است که با شرح و بیان زیر ارائه می‌گردد.

بیان مسئله

تعریف تحقیق که «کوششی علمی و اندیشیده، همراه با طرح و نقشه برای کشف حقیقتی مجهول است» (فریادی، ۱۳۹۴: ۲)، گوشتزد کننده اولین گام پژوهش با عنوان "طرح پرسش و بیان مسئله تحقیق" است. در این راستا و برای پژوهش حاضر باید گفت: این پژوهش، پاسخ به کدام پرسش را دنبال می‌کند و برای چه مسئله‌ای باید راه حل داده شود؟ پاسخ اینکه در پژوهش پیش‌رو، "مسئله" و "پرسش" این است که صنعت نفت به‌عنوان "متغیر مستقل" این تحقیق، در طول تاریخ‌جانمایی و فعالیت خود در جزیره خارگ بر بوم و سیمای سرزمین این جزیره که "متغیر وابسته" این پژوهش تعریف شده، چه اثراتی داشته‌است؟ در این میان، اختلال‌های بوم‌شناختی و راه‌های تعدیل آنها کدام است؟

پیشینه تحقیق

گزیده‌ای از پیشینه منابع پژوهشی در موضوع جزیره خارگ به‌صورت زیر قابل معرفی است:
آل‌احمد، جلال (۱۳۵۶)، در کتابی با عنوان "جزیره خارگ، دُرّ یتیم خلیج فارس" جغرافیا و جغرافیای تاریخی جزیره خارگ، گذر از اقتصاد سنتی به صدور نفت و نیز چگونگی فرهنگ و ادبیات عامیانه این جزیره در سال ۱۳۳۷ را مکتوب کرده‌است.

کشاورز، کریم (۱۳۶۳)، با نوشتن کتاب "چهارده ماه در خارگ"، یادداشت‌های شخصی خود (به‌عنوان تبعیدی سیاسی در سال‌های ۴ - ۱۳۳۳) را با گزارش از: رخداد‌های روزانه، وضع طبیعی و مردم‌شناسی جزیره، ثبت کرده‌است. شرکت ملی نفت ایران (۱۳۴۸)، با تهیه گزارشی با عنوان "سیری در صنعت نفت ایران" از جمله به معرفی شرکت سهامی شیمیایی خارگ (چگونگی تأسیس، اهداف و منابع گازی - نفتی تغذیه کننده) پرداخته‌است.
سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح (۱۳۸۱)، در بخشی از کتاب "جغرافیای جزایر ایرانی خلیج فارس" تبیین ویژگی‌های جغرافیایی خارگ در مؤلفه‌های طبیعی (اقلیم، توپوگرافی و...) و انسانی (تاریخ، جمعیت و...) را مدنظر قرار داده‌است.

سازمان بنادر و دریانوردی (۱۳۹۳)، در بخشی از جلد دوم "مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی ایران"، معرفی توان‌ها و تنگناهای ناشی از ریخت‌شناسی زمین، شامل: لندفرم‌ها، شیب زمین و سازندهای زمین‌شناختی جزیره خارگ را معرفی کرده‌است.

افزون بر کتاب‌ها، در مقاله‌های علمی - پژوهشی، جزیره خارگ از جوانب گوناگون معرفی شده است. در این میان، نمونه‌های شاخص از مقاله‌های تاریخی که بنا به ضرورت مورد استفاده در پژوهش حاضر بوده، به صورت کوتاه و گزیده معرفی می‌شود.

رضوان‌تبار، امیر و پروانه، فرهاد (۱۳۹۷)، اثرگذاری موقعیت جغرافیایی جزیره خارگ بر کارکرد سیاسی و آمدوشد دریایی را در مقاله‌ای با عنوان "تحولات سیاسی و اقتصادی جزیره خارگ از دوره باستان تا صفویه" مطالعه کرده‌اند.

حیدری، احمد (۱۳۹۹)، در مقاله "خارگ و خاراسن، پیشنهاد و بحثی درباره انتساب دو گور صخره‌ای و نام خارگ" نقش ارتباطی خارگ در کارکرد تجاری و مذهبی و تبیین باستان‌شناسی از نام جزیره و دو گور صخره‌ای آن را پژوهش کرده‌است.

ثواب، جهان‌بخش و همکاران (۱۳۹۹)، نقش صنعت نفت در افزایش شدید جمعیت خارگ (به ویژه در سال‌های ۱۳۴۵ تا ۱۳۵۵) را در مقاله "تأثیرات جمعیتی صنعت نفت در جزیره خارگ و پیامدهای آن (۵۶-۱۳۳۶)" بررسی کرده‌اند. فروغی، محمدحسین (۱۴۰۳)، در مقاله‌ای با عنوان "جایگاه نفت در تحول هویتی جزیره خارگ" عملکرد صنعت نفت در دگردیسی هویت این جزیره از یک ایستگاه خدمات دریانوردی و گاه تبعیدگاهی به شهر و پایانه نفتی را کنکاش کرده‌است.

بررسی پژوهش‌های انجام شده در مورد جزیره خارگ، جای خالی "جزیره‌شهر دیدن خارگ" و نیز نگاه "بوم‌شناسی سیمای سرزمین" به این جزیره را نشان می‌دهد. از این رو می‌توان گفت خلاء مطالعاتی فوق دلالت بر نوآور بودن مقاله حاضر دارد.

مبانی نظری

پژوهش علمی به عنوان فعالیت فکری، جسمی و گاه میدانی نظام‌مند و هدف‌مند برای یافتن پاسخ به مسئله تحقیق، مبتنی بر پایه‌های تئوریک و چارچوب نظری مشخصی است که با تبیین مفاهیم کلیدی وابسته به موضوع تحقیق معنی‌دار می‌شود. در همین راستا و در پژوهش پیش‌رو واژگان و نیز مفاهیم کلیدی زیر قابل طرح است:

۱. جزیره: در خوانش کلی از مفهوم جزیره می‌توان گفت، جزیره عبارت است از «قطعه خشکی که به وسیله آب احاطه شده باشد. ممکن است جزیره در دریا، دریاچه و یا اقیانوس و حتی رودخانه قرار گرفته باشد» (شایان، ۱۳۶۹: ۱۹۵). این مفهوم فارغ از وسعت و میزان فاصله‌ای است که جزیره می‌تواند از خشکی و یا جزایر بزرگ تا بسیار بزرگ‌تر از خود داشته باشد. به عنوان مثال در حالیکه "تاسمانی" به عنوان جزیره‌ای کوچک در همجواری جنوب شرقی استرالیا جانما شده، استرالیا خود نیز جزیره است که به دلیل وسعت بسیار بزرگ، هیت قاره داشته و جزایر کوچک بسیاری از جمله تاسمانی را در پیرامون و از آن قاره خود دارد. این نسبت و سلسله‌مراتب را می‌توان برای جزایر خلیج فارس و از جمله خارگ در قیاس با فلات ایران و غرب آسیا همانندسازی کرد.

۲. جزیره‌شهر: نقشه جغرافیای شهری جهان‌نامایی و چیدمان شهرهای پرشماری را در جزایر نشان می‌دهد. برخی از این جزایر از قبیل: هُنشو در ژاپن و سوماترا در اندونزی ده‌ها شهر را در خود جای داده‌اند و برخی دیگر به دلیل کمی وسعت امکان جانمایی یک شهر و یا حتی بخشی از یک شهر را در خود دارند که در جغرافیای شهری با نام "جزیره‌شهر"^۱ خوانده می‌شوند. بنابراین می‌توان گفت: جزیره‌شهر به شهری گفته می‌شود که تمامی یک جزیره یا مجمع‌الجزایر را در قلمرو کالبدی، حریم، محدوده و یا حوزه نفوذ و عملکرد خود داشته باشد. در مثال آوری می‌توان به شهرهای: ماله (پایتخت مالدیو)، ونیز (شمال شرق ایتالیا) و بخش پنج از شهر نیویورک موسوم به منهتن، اشاره کرد. در این جزایر گاه تقریباً تمامی جزیره (مانند ماله) یا مجمع‌الجزایر (مانند ونیز) به عنوان بستر کالبدی کل و یا قسمتی از شهر، اشغال شده و گاه بخشی از شهر (مانند منهتن)، جزیره‌ای را اشغال کرده‌است.

۳. ساحل: برای مفهوم ساحل خوانش‌های گوناگونی مطرح است که بیان چکیده و گزیده آنها از قرار زیر است. خط ساحلی^۲: «به امتدادی گفته می‌شود که دقیقاً آب دریا با خشکی تلاقی پیدا می‌کند. موقعیت این خط در اثر جزر و مد ثابت نبوده و تغییر می‌کند» (برد، ۱۳۹۲: ۲).

باریکه ساحلی^۳: «باریکه‌ای از خشکی‌ها که در کنار دریا قرار گرفته و دارای شیبی ملایم به سوی دریاست. عمدتاً به منطقه‌ای از خشکی گفته می‌شود که بر اثر عمل دریا ایجاد شده و دارای شن، ماسه و یا گِل است» (شایان، ۱۳۶۹: ۳۷).

1. Island – Urban
2. Shoreline
3. Beach

ساحل به‌عنوان دریاکنار و یا کناردریا^۱: «قسمتی از خشکی در کنار دریا و یا در کنار هر توده وسیع آب. ساحل ممکن است بر اثر نهشته شدن مواد حمل‌شده توسط رودها در دهانه آنها، از بین رفتن یک دریاوار قدیمی و یا پست شدن یک قسمت از قاره‌ای قدیمی ایجاد گردد» (همان: ۷۷). دریاکنار می‌تواند پهنای وسیعی از زمین هموار را شامل شود که مفهومی با عنوان دشت ساحلی^۲ را مطرح می‌کند. دشت ساحلی «ناحیه‌ای پست و هموار در مجاور دریاست که از نهشته شدن رسوبات دریایی و رودخانه‌ای شکل گرفته‌است. جایی که نهشته‌های دریایی دشت ساحلی را شکل دهد، یک پس‌رفتگی نسبی در سطح دریا وجود خواهد داشت. مانند جنوب شرقی ایالات متحده که در آنجا دشتی به طول ۳۰۰۰ کیلومتر در ساحل اطلس و خلیج گسترده شده که پهنای آن تا ۴۵۰ کیلومتر هم می‌رسد» (Small & Witherick, 1990: 40). در همانندجویی از مفهوم فوق برای جزیره خارگ باید توجه داشت که دشت ساحلی در مقیاسی کوچکتر پهنه اصلی از شمال شرق این جزیره را در بر گرفته است (شکل ۱).

در مطالعه بوم‌شناختی از جزایر کم‌وسعتی چون جزیره خارگ و با در نظر گرفتن ویژگی‌های محیطی این جزیره، ساحل با مفاهیم سه‌گانه مورد اشاره مدنظر است (شکل ۱). با این حال ساحل با معنای نوار تا دشت ساحلی مورد تأکید است. این همان معنایی است که در «مدیریت یکپارچه ناحیه ساحلی»^۳ نیز مطرح است.

۴. بوم‌شناسی سیمای سرزمین^۴: با وضع واژه‌های: سیمای سرزمین^۵، بوم‌شناسی^۶ و بوم‌سازگان^۷ که از اواسط سده ۱۹ تا میانه دهه ۱۹۳۰ و به ترتیب توسط: الکساندر فن همبولت^۸، ارنست هککل^۹ و جورج تانسلی^{۱۰} انجام شد؛ زمینه آن فراهم آمد تا در سال ۱۹۳۹، کارل ترول^{۱۱}، عنوان «اکولوژی سیمای سرزمین» را برای شناخت الگوی فضایی از عناصر سرزمین به کار گیرد. «ترول، اکولوژی سیمای سرزمین را پایه‌ای برای مطالعه روابط فیزیکی و زیستی که منجر به ایجاد واحدهای فضایی گوناگون در یک منطقه می‌شود، معرفی کرد. وی این روابط را درون یک واحد فضایی، به‌صورت عمودی و بین واحدهای فضایی، به شکل افقی در نظر گرفت و امیدوار بود که «اکولوژی سیمای سرزمین» به‌عنوان علمی نو بتواند رویکرد فضایی و افقی جغرافیدانان را با رویکرد عمودی اکولوژیست‌ها ادغام کند» (زبردست و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۲، نقل از Farina, 2006).

در بوم‌شناسی سیمای سرزمین، مطالعه عناصر ساختاری و سازنده سیمای سرزمین در کنار تغییرات مکانی - فضایی آنها در طول زمان مدنظر است. در این میان باید در نظر داشت که «الگوهای ساختاری سیمای سرزمین یا منطقه، ترکیبی است از سه عنصر جهانی په‌روها^{۱۲}، گذرگاه‌ها^{۱۳} و زمینه‌ها^{۱۴}» (ونچ و همکاران، ۱۳۸۶: ۱۶) در این میان و به‌ویژه در تحقیق حاضر، په‌روها یا لگه‌ها بیشتر مدنظر و مطالعه هستند.

۵. مدیریت یکپارچه نواحی ساحلی: این رهیافت که از اوایل دهه ۱۹۹۰ و برای تحقق توسعه پایدار در نواحی ساحلی مطرح شده، نگاه کل‌نگرانه و سیستمی به برنامه‌ریزی و مدیریت محیط‌زیست نواحی ساحلی را دنبال می‌کند. «تجربه کشورهای ساحلی خوب توسعه‌یافته نشان می‌دهد که مدیریت یکپارچه منطقه ساحلی، خردمندانه‌ترین روش برای

1. Coast
2. Coastal Plain
3. Integrated Coastal Zone Management
4. Landscape Ecology
5. Landscape
6. Ecology
7. Ecosystem
8. Alexander Von Humboldt
9. Ernest Haeckel
10. Arthur George Tansley
11. Carl Troll
12. Patch
13. Corridor
14. Matrix

تحقق یافتن اصول آمایش سرزمین و توسعه پایدار است» (منصوری و ثروتی، ۱۳۹۵: ۱۵۵). از نظر^۱ UNEP (1993) «مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی، فرآیندی انعطاف پذیر و منطبق بر مدیریت منابع برای توسعه پایدار محیط زیستی در نواحی ساحلی است» (سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۳۹۳: ۲۷). در این راستا، برای مدیریت یکپارچه نواحی ساحلی اهداف زیر قابل طرح است (همان: ۲۳).

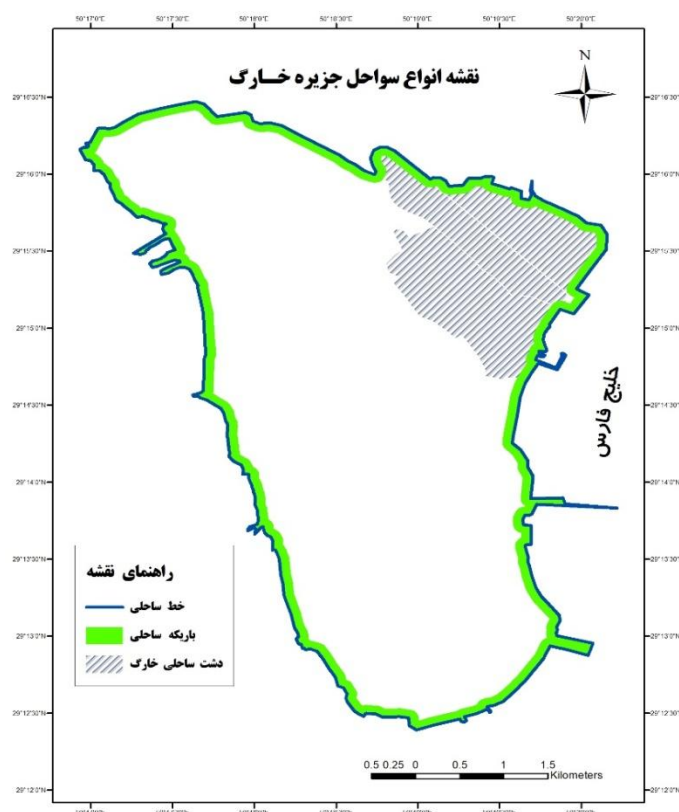
- * دستیابی به توسعه پایدار با توجه به ظرفیت های محیطی سواحل؛
 - * معرفی مناسب ترین شکل از توسعه اقتصادی - اجتماعی برای رفع محرومیت؛
 - * حفاظت از محیط زیست شکننده نواحی ساحلی و کاهش آسیب پذیری آن؛
 - * هماهنگی بین سازمانی برای جلوگیری از تداخل فعالیت ها؛
 - * امکان سنجی مشارکت مردمی در بهره برداری و نگهداشت نواحی ساحلی.
- مطالعات "مدیریت یکپارچه نواحی ساحلی" در ایران از اوایل دهه ۱۳۸۰ خورشیدی شروع و پس از طی مراحل زیر و در سال ۱۳۸۹ با عنوان "برآیند مطالعات طرح مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی کشور" گزارش شد (همان: ۲۴).

مرحله اول: مطالعات پایه (سال های ۴ - ۱۳۸۲)

مرحله دوم: تبیین دستاوردها (سال های ۷ - ۱۳۸۴)

مرحله سوم: تلفیق مطالعات (سال های ۸ - ۱۳۸۷)

با توجه به ماهیت مکانی - فضایی مطالعات "مدیریت یکپارچه نواحی ساحلی"، خروجی نهایی این طرح ها که از برای اجرایی شدن ارائه می شود، همانند طرح های جامع شهری و مطالعات آمایش سرزمین به نمایش ترسیمی - فضایی (نقشه) درمی آید



شکل ۱ نقشه از اشکال سه گانه ساحل در جزیره خارک (نگارندگان)

مواد و روش تحقیق

پژوهش‌های بوم‌شناختی در گردآوری مواد یا (داده‌ها و اطلاعات) تحقیق، متکی به دو گروه از منابع اسنادی و میدانی هستند. با این حال، در پژوهش حاضر به دلیل ممکن نبودن انجام کارمیدانی مستقل در جزیره خارگ، دورسنجی جزیره با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (در فاصله سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۴) جایگزین پژوهش میدانی شده است. از این رو و به‌عنوان منابع گردآورنده داده‌های خام و پردازش آنها در قالب اطلاعات تحقیق، موارد مطرح در (جدول ۱) موردنظر و استفاده بوده است.

جدول ۱ گروه‌بندی منابع اسنادی مورد استفاده

نوع منبع	زمینه اصلی استفاده
کتاب‌های دانشگاهی	تدوین مبانی نظری تحقیق و شناخت شرایط محیطی (زمین‌شناسی و اقلیم) جزیره خارگ
مقاله‌های علمی-پژوهشی	عمدتاً برای آشنایی با پیشینه تاریخی جزیره خارگ
نقشه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای	دورسنجی سیمای سرزمین جزیره خارگ و ردیابی تغییرات مکانی و زمانی از عناصر سیمای سرزمین جزیره
داده‌ها و اطلاعات عددی	محاسبه شاخص‌های اقلیمی جزیره خارگ و پایش تغییرات جمعیتی جزیره خارگ از سال ۱۳۳۵ تا ۱۳۹۵
گزارش‌ها و سفرنامه‌ها	شناخت پیشینه سیمای سرزمین و ویژگی‌های اجتماعی-اقتصادی جزیره خارگ در چند دهه گذشته

به‌منظور کارآمدی مواد تحقیق، لازم است برخی از اطلاعات عددی در مدل‌های دستی و یا نرم‌افزاری قرار گیرند تا خروجی‌های آنها به‌عنوان یافته‌های پژوهشی تحلیل و مستند شود. به‌عنوان مهمترین مدل‌های دستی، می‌توان به (رابطه ۱) و (رابطه ۲) اشاره کرد که به ترتیب برای تعیین تیپ اقلیمی و محاسبه ضریب بری جزیره خارگ کارآمدی دارند. افزون بر تکنیک‌های دستی فوق، از نرم‌افزارهای Google Earth، Excel و GIS، به ترتیب برای دورسنجی و تهیه نمودارها و نقشه‌ها استفاده شده است.

$$IA = \frac{P}{T+10}$$

رابطه ۱ شاخص خشکی دمارتن^۱ (پژوهشکده هواشناسی، ۱۳۸۷: ۳۹)

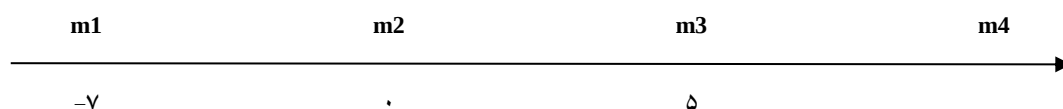
$IA =$ شاخص خشکی $P =$ مجموع بارش سالانه به میلیمتر $T =$ متوسط دمای سالانه به سیلسیوس

شاخص به‌دست آمده از (رابطه ۱) با قرار گرفتن در سطح‌بندی شاخص خشکی (جدول ۲) قابلیت تعیین تیپ اقلیمی را پیدا می‌کند.

جدول ۲ سطح‌بندی شاخص خشکی و طبقه اقلیمی در روش دمارتن (پژوهشکده هواشناسی، ۱۳۸۷: ۳۹)

شاخص خشکی (AI)	طبقه اقلیمی	آستانه شاخص	شاخص خشکی (AI)	طبقه اقلیمی	آستانه شاخص
A1	بسیار خشک	۰ - ۵	A4	نیمه مرطوب	۲۴ - ۲۸
	خشک	۵ - ۱۰	A5	مرطوب	۲۸ - ۳۵
A2	نیمه خشک	۱۰ - ۲۰	A6	خیلی مرطوب	۳۵ - ۵۵
A3	مدیترانه‌ای	۲۰ - ۲۴	A7	بسیار مرطوب	۵۵ و بالاتر

در این میان باید توجه داشت «بدون دخل و تصرف در طبقه‌بندی اولیه دمارتن نتایج به‌دست آمده بسیار مطلوب و منطبق بر واقعیت نیست. برای مثال: شاخص دمارتن در بندرانزلی و کوه رنگ حدود ۷۰ بوده و هر دو ایستگاه در اقلیم مرطوب جایابی می‌شوند. این در حالی است که، در کنار تفاوت پوشش گیاهی، انزلی دمایی معتدل و کوه‌رنگ در زاگرس مرتفع زمستان سردی را تجربه می‌کند. برای رفع کاستی فوق‌تغییراتی در طبقه‌بندی دمارتن اعمال شده است. بر این اساس، برای رفع نقیصه توزیع دما، به هر طبقه اقلیمی از A1 تا A7، زیرتقسیم‌های دمایی اضافه شده است. از این‌رو، طبقات اقلیمی، گسترش یافته و هر اقلیم با رعایت الگوی زیر به چهار زیراقلیم دمایی شامل: فراسرد (m1)، سرد (m2)، معتدل (m3) و گرم (m4) تقسیم می‌شود» (خلیلی، ۱۳۸۱: ۱۴).



یکی از پارامترهای دمایی با اهمیت در مطالعه اقلیم میزان افت و خیز دما در طول سال و شبانه‌روز است. مطالعه این پارامتر در نواحی ساحلی و درون‌دریایی همانند جزیره خارگ اهمیت فراوانی دارد. چرا که در چنین مکان‌هایی بالا بودن رطوبت موجود در هوا به‌عنوان یک بازدارنده قوی در برابر افت و خیز دما عمل کرده و میزان بری بودن را کاهش می‌دهد. در مطالعات اقلیم‌شناسی برای درک بهتر از نوسانات دمای سالانه، مدل‌ها و فرمول‌های ریاضی برای محاسبه ضریب بری^۱ ارائه شده‌است. ضریب بری گویای پتانسیل افت و خیز دما و اثرپذیری اقلیم از دریا است. در این میان، فرمول ابداعی توسط کُنراد^۲ (اقلیم‌شناس آمریکایی) از کارآیی و اهمیت بیشتری برخوردار است (رابطه ۲). باید توجه داشت که در این فرمول «میزان K بین اعداد صفر تا ۱۰۰ در نوسان است. این میزان در بحری‌ترین نواحی دنیا مساوی صفر و در بری‌ترین نواحی مساوی ۱۰۰ است» (جعفرپور، ۱۳۵۷: ۳۵).

$$K = \frac{1.7A}{\sin(\varphi + 10)} - 14$$

رابطه ۲ فرمول کُنراد برای محاسبه ضریب بری (جعفرپور، ۱۳۵۷: ۳۵)

K = ضریب کُنراد A = نوسان دمای سالانه $\sin$ = سینوس φ = عرض جغرافیایی

با شرحی که از آشنایی با مواد و تکنیک‌های تحقیق گفته شد، لازم به ذکر است که به‌لحاظ گونه‌شناسی تحقیق، پژوهش حاضر از نظر هدف، "کاربردی" و از نظر چگونگی انجام، "توصیفی - تحلیلی" شمرده می‌شود.

مکان و محدوده مورد مطالعه

در چارچوب اهداف مطالعاتی پژوهش پیش‌رو که بوم‌شناسی سیمای سرزمین را دنبال می‌کند؛ معرفی جزیره خارگ در دو محور از عناصر "محیط طبیعت‌ساخت" و نیز "محیط انسان‌ساخت" با شرح زیر دنبال شده‌است.

ویژگی‌های محیطی جزیره خارگ

در شناخت ویژگی‌های طبیعت‌ساخت جزیره خارگ و در چارچوب مطالعات محیطی، با بیانی کوتاه، گزیده و همسو با شناخت سیمای سرزمین به شرح زیر ارائه مطلب می‌شود.

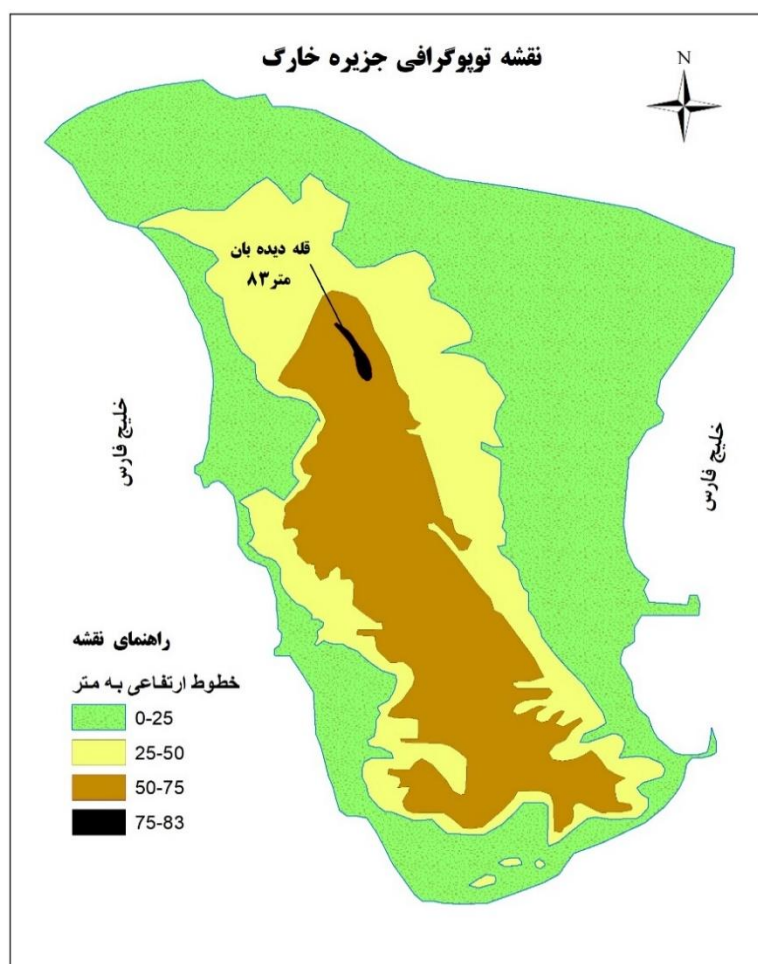
موقعیت جغرافیایی: از نظر موقعیت نسبی، خارگ جزیره‌ای در شمال خلیج فارس و ۵۵ کیلومتری شمال غربی بندر بوشهر است که با نزدیکترین مکان از پیکره اصلی ایران ۳۵ کیلومتر فاصله دارد. در تقسیمات اداری-سیاسی، جزیره خارگ به همراه جزیره خارگو (در شمال غربی آن) یک بخش از شهرستان بوشهر شمرده می‌شود که شهر خارگ مرکز آن تعریف شده است. از نظر موقع ریاضی، جزیره خارگ، از نزدیکترین مکان‌های ایران به مدار استواست که به استناد (شکل ۲)، عرض جغرافیایی را از ۲۹ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۲۹ درجه و ۱۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی را از نصف النهار ۵۰ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی، نشان می‌دهد. همچنین این جزیره گویای نوسان ارتفاعی از صفر (ساحل خلیج فارس) تا ۸۳ متر (قله دیده‌بان) است (شکل ۳). خارگ با این مختصات جغرافیایی، نزدیک به ۲۲ کیلومتر مربع مساحت دارد (استخراج از تصویر ماهواره‌ای Google Earth).



شکل ۲ موقع هندسی جزیره خارگ (دریافت و محاسبه از تصویر ماهواره‌ای Google Earth)

*** ریخت‌شناسی زمین در جزیره خارگ:** شناخت ریخت و مورفولوژی خارگ به عنوان جزیره جانما شده در پهنه خلیج فارس و حاشیه جنوبی زاگرس چین خورده، نگاه به پیشینه زمین‌شناسی آن را لازم می‌آورد. در این راستا باید توجه داشت که «خلیج فارس کنونی با پیشروی آب دریای عمان از طریق تنگه هرمز بر محل قبلی خود در دوره هولوسن به وجود آمده است» (علایی طالقانی، ۱۳۸۲: ۳۴۶). حاشیه شمالی این دریا بخش چین خورده و منظم رشته کوه زاگرس است که در حد جنوبی و جنوب غربی خود تا بستر خلیج فارس ادامه یافته و آن را تبدیل به دریایی کم عمق کرده که ژرف‌ترین نقاط آن به زحمت به ۱۰۰ متر می‌رسد. از این رو «خلیج فارس در عمل یک فلات قاره است که دنباله دشت‌های جنوبی و طاقدیس‌ها و ناودیس‌های زاگرس بوده و در پی شکل‌گیری خلیج عمان به زیر آب رفته است» (زمردیان، ۱۳۸۵: ۱۷۴). به دلیل ادامه زاگرس چین خورده در کف خلیج فارس، «جزایر نزدیک کناره‌های ایران بیشتر از برجستگی‌های طاقدیسی تشکیل شده‌اند» (علایی طالقانی، ۱۳۸۲: ۳۴۷). در این میان، «جزیره خارگ در منتهی‌الیه خارجی منطقه چین‌های ساده و گسترده زاگرس واقع شده است» (سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۳۸۱: ۸). در آب‌های کم عمق و آرام طاقدیس‌های

فوق با فراهم آمدن شرایط لازم برای فعالیت مرجان‌ها به تدریج سطح برخی از جزایر توسط رسوب‌های مرجانی پوشیده شده که «جزیره خارگ بیشتر از همین رسوب‌های مرجانی ساخته شده است» (علایی طالقانی، ۱۳۸۲: ۳۴۷). به این ترتیب، این جزیره چین‌خورده جوان، با دو طاق‌دیس موازی در جهت جنوب به شمال، رسوب‌های مارنی تا سنگ‌های کنگلومرانی (موسوم به بختیاری) را به عنوان سازند غالب نشان می‌دهد که با پوششی از مرجان همراه است. در این میان و در عهد حاضر زمین‌شناسی (هولوسن)، عمل فرسایش عمدتاً آبی، بخش عمده‌ای از سازندهای خارگ را تخریب و در چاله‌های جزیره و سواحل آن نهشته کرده است. عملکرد عوامل فرسایش در حجم مواد نهشته شده در سواحل با توجه به تفاوت‌های محیطی و نیز عمق دریا به گونه‌ای عمل کرده که در شمال شرق جزیره، دشت ساحلی با پهنای ۱ تا ۲/۵ کیلومتر را شکل داده است. این پیشینه زمین‌شناختی در پیوند با دینامیک بیرونی تغییر دهنده چهره زمین به گونه‌ای رقم خورده که امروزه جزیره کنگلومرای-مارنی خارگ همراه با پوشش ناپیوسته مرجانی، سه لایه ارتفاعی با اختلاف و فاصله ۲۵ متر و یک لایه ۸ متری را به نمایش گذاشته است (شکل ۳).



شکل ۳ نقشه توپوگرافی و لایه‌های ارتفاعی جزیره خارگ (نگارندگان)

*** اقلیم و منابع آب جزیره خارگ:** انتظار اولیه آن است که جزیره خارگ به دلیل قرارگیری در میانه دریا، اقلیم پربارشی داشته باشد. اما تیپ‌بندی اقلیمی با روش دمارتن (رابطه ۱) نشان از حاکمیت آب‌وهوای خشک گرم در این جزیره دارد (جدول ۳). در این میان اثر دریا بر اقلیم خارگ بیشتر در کاستن از نوسان دمای سالانه و ضریب کنراد (رابطه ۲) منعکس است (جدول ۳).

جدول ۳ عناصر و شاخص‌های اقلیمی جزیره خارگ (استخراج و محاسبه از سالنامه‌های هواشناسی سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۲)

مجموع بارندگی سالانه	دمای سالانه (درجه سلسیوس)			شاخص خشکی	تیپ اقلیمی (روش دمارتن)	ضریب برّی (روش کُنراد)
	میانگین	میانگین بیشینه	میانگین کمینه			
۲۱۴ میلی‌متر	۲۶/۶	۳۹/۳۵	۱۳/۳۳	۵/۹	گرم و خشک	۲۸

حاکمیت اقلیم گرم و خشک بر خلیج فارس و از جمله جزیره خارگ، نه با عوامل محلی کنترل‌کننده اقلیم (ارتفاع زمین، عرض جغرافیایی، دسترسی به دریا و توپوگرافی) بلکه با عامل سیاره‌ای (گردش عمومی هوا) قابل تفسیر است. چرا که الگوهای پویشی هوا، هسته‌ای از "پرفشار کنارحاره*" را در منطقه حاکم کرده که صعود هوای مرطوب دریا را سرکوب می‌کند و امکان سرماییش، تراکم و بارش را از هوا می‌گیرد. «با این حال، گاهی به دلیل تضعیف پرفشار پویشی، کم‌فشار گرمایی که از رطوبت بسیار زیادی برخوردار است به تراز چگالش می‌رسد و بارش‌های سنگینی را در جنوب ایران پدید می‌آورد» (مسعودیان، ۱۳۹۰: ۳۳).

شرایط اقلیمی گرم و خشک جزیره خارگ از یک سو و کم‌وسعت بودن آب‌خیزها در کنار شرایط توپوگرافیکی جزیره که خط تقسیم آب را در محور میانی خود دارد، از دیگر سو سبب شده تا خارگ روان آب دائمی نداشته‌باشد. از این رو، شبکه آب‌های این جزیره مسیل‌های کوتاهی را در خود دارد که به صورت واگرا از ستیغ میانی جزیره به سوی دریا جاری می‌شوند. با این حال، غنای نسبی در بارندگی جزیره نسبت به دیگر جزایر خلیج فارس از یک سو و نفوذپذیری بالا در سازندهای رسوبی جزیره و به‌ویژه در نهشته‌های آبرفتی دشت ساحلی شمال‌شرقی از دیگر سو، آبخوان آب شیرین را برای خارگ زمینه‌ساز شده‌است.

جغرافیای زیستی جزیره خارگ: «جنوب و جنوب شرق ایران شرایط خشک و گرمی دارد که رویشگاه‌هایی به صورت درخت‌زارهای شبه‌ساوانا، درختچه‌ها و گیاهان شورپسند دارد» (یاوری و همکاران، ۱۳۹۶: ۶۹). این رویشگاه با نام سودانی - سندی شناخته می‌شود. در این بین، جزیره خارگ با توجه به موقع جغرافیایی و اقلیم در این رویشگاه واقع شده که گونه‌های زیستی آن توسط افرادی چون (قربانلی، ۱۳۸۱) و (عصاره، ۱۳۸۴) مطالعه شده‌است. در این راستا، سفرنامه آل‌احمد (۱۳۵۶: ۱۲۹ و ۱۳۰) اشاره به گونه‌های جانوری آهو، بز، جوجه تیغی و انواع پرندگان گرمسیری در کنار گونه‌های رستنی سازگار با آنها مانند: درختچه تا درخت‌های گز، نخل، انجیر هندی و موز دارد. به استناد یادداشت کشاورز (تبعیدی سیاسی، سال ۱۳۳۳)، در آن سال «در خارگ بیش از دو هزار اصله درخت لیل یا انجیر هندی دیده می‌شود و به این جهت می‌توان گفت کثیرالعدده‌ترین درخت خارگ است و پس از آن به ترتیب اهمیت عددی، نخل خرما و گُناَر (سدر) و سپستان و گز را می‌توان نام برد» (کشاورز، ۱۳۶۳: ۴۳).

ویژگی‌های انسانی و تاریخ جزیره خارگ

پژوهش پیش‌رو با توجه به ماهیت و موضوع خود، نگاه گذرا به پیشینه تاریخی جزیره خارگ را ایجاب می‌کند. در این راستا، می‌توان محورهای زیر را از دوره باستان تا استقرار صنعت نفت و پس از آن را برای این جزیره به صورت گزیده و چکیده بیان کرد.

شواهد تاریخی بر ایرانی بودن خارگ از دوران باستان گواهی می‌دهد. «جزیره خارگ در دوران هخامنشیان جزو امپراتوری هخامنشی بوده‌است» (رضوان تبار و پروانه، ۱۳۹۷: ۲۰). «لسترنج در وصف جغرافیای تاریخی جزیره خارگ نوشته‌است: جزیره خارگ از دهانه رود شاپور دور است، از توابع اردشیرخوره و لنگرگاه کشتی‌هایی بوده که از بصره به

طرف جزیره قیس و هندوستان می‌رفتند» (همان: ۲۰). همچنین نوشته‌هایی که دربارهٔ نا این جزیره آمده، همگی دلالت بر ایرانی بودن خارگ دارد. در این میان، جزیره خارگ به دلیل موقعیت دریانوردی در نزدیکی دهانهٔ اروندرود اهمیت بین‌المللی داشته‌است. از این رو، حضور بیگانگان را از دوران باستان (پالمیری‌ها) تا ظهور اسلام و اروپائیان (هلندی‌ها و انگلیسی‌ها) را در دورهٔ استعمار تجربه کرده‌است.

موقعیت جغرافیایی خارگ در نزدیکی به سواحل بوشهر و دهانهٔ اروندرود و جانما بودن آن در مسیر دریانوردی غرب به شرق خلیج فارس، نقش اصلی در جذب پایدار انسان (از نیاکان زرتشتی و شهریاران اشکانی و ساسانی تا دریانوردان تاریخ معاصر) را داشته‌است. به‌عنوان مثال، شاهپور، بزرگ‌شهریار ساسانی در یکی از جنگ‌ها با رومیان «عده‌ای از مسیحیان را از سوریه به‌عنوان زندانی به جزیره خارگ آورد. این عده به سبک زندگی خود در سوریه، جزیره را آباد ساختند و آن را به‌عنوان یکی از توقفگاه‌های بزرگ در راه دریایی هند-خاورودور و مدیترانه درآوردند» (کشاوری، ۱۳۶۳: ۳۱). همچنین اصطخری می‌گوید: «خارگ دارای یک اسکله یا توقفگاه بین راه تجاری هند و بصره بوده است» (حیدری، ۱۳۹۹: ۱۰۶). افزون بر اهمیت دریانوردی، (همان منبع: ۱۱۹) دلالت بر امن و نزدیک به ساحل بودن خارگ در جانمایی گورهای صخره‌ای شاهان محلی سدهٔ دوم میلادی دارد.

جزیره خارگ به دلیل صید مروارید (به ویژه دُر سیاه یا یتیم) و نیز تأمین سنگ ساختمانی برای شهرهای ساحلی اهمیت اقتصادی داشته‌است. این امر در گزارش‌های گوناگون تاریخی توسط (کشاوری، ۱۳۶۳) و (آل‌احمد ۱۳۵۶) آورده شده‌است.

جزیره خارگ تا پیش از اختلال‌های ناشی از صنعت نفت از توان محیطی نسبی برای زراعت و باغداری برخوردار بود. این توانمندی برآمده از منابع آب شیرین و بالا بودن بارندگی تا ۳۰ درصد نسبت به میانگین بارشی جزایر خلیج فارس است. «جزیره خارگ از معدود جزایر خلیج فارس است که دارای آب شیرین بوده‌است» (رضوان‌تبار و پروانه، ۱۳۹۷: ۱۷). «به قرار، آب شیرین چاه‌های خارگ معروف و مطلوب ملاحان است» (کشاوری، ۱۳۶۳: ۲۳). «در میان مزارع و باغ‌ها چاه‌های بزرگ هم دیدم هر کدام با دیواره‌ای سنگچین و حوضچه‌ای سنگی (سنگاب) بر کنارهٔ دهانهٔ آن و حداکثر به عمق ۷-۶ متر» (آل‌احمد، ۱۳۵۶: ۵۶).

بوم‌شناسی امروز خارگ رنگ نفتی دارد که با جانمایی پایانهٔ صدور نفت رقم خورده‌است. مرحلهٔ نخست از این نقش از میانهٔ دهه ۱۳۳۰ رقم خورد. در این مسیر «جزیره خارگ در سال ۱۳۳۶ از طرف شرکت‌های عامل نفت ایران به‌عنوان محلی برای ایجاد بندر دوم صدور نفت ایران انتخاب شد» (فروغی، ۱۴۰۲: ۱۲۰، نقل از اتاق بازرگانی ایران ۱۳۳۹: ۴۰). در ادامه «فاز دوم عملیات ساماندهی صادرات نفت ایران با عنوان "طرح جم" از سال ۱۳۴۲ آغاز به کار کرد و میدان‌های نفتی ایران در گچساران و خوزستان با تأسیسات صدور و پالایش نفت در آبادان، ماهشهر و خارگ به‌صورت شبکه به هم وصل و ساماندهی شدند» (همان: ۱۲). در ادامهٔ این روند سرانجام در سال ۱۳۵۲، خارگ به‌عنوان مهمترین و بزرگترین پایانهٔ نفتی ایران به‌حساب آمد. در همین حال، تأسیس و گسترش صنعت پتروشیمی در سال ۱۳۴۲ و ۱۳۴۴ و راه‌اندازی واحد متانول در سال ۱۳۷۳، هویت نفتی خارگ را کامل‌تر کرد.

* در جمع‌بندی از تغییرات تاریخی در کاربری‌ها و سیمای سرزمین جزیره خارگ می‌توان از سه دوره سخن گفت (جدول ۴).

جدول ۴ کاربری‌های جزیره خارگ در ادوار تاریخی

دوره تاریخی	نقش و کاربری‌های جزیره خارگ
باستان اسلامی	ایستگاه و پایگاه دریانوردی / نیایشگاه / پایگاه والیان محلی وابسته به حکومت‌های مرکزی / استقرار آسرای جنگی پررنگ شدن نقش دریاوردی و محل دریابانان خواندن جزیره توسط اعراب / جان‌پناهی پناه‌جویان / صید مروارید اقت شدید نقش خارگ در بازرگانی دریایی و غالب شدن نقش تبعیدگاهی آن. «در اواخر قاجار و اوایل پهلوی بندرهای آبادان و خرمشهر رونق گرفتند و بندرها و جزایر و سواحل بوشهر رونق قدیم را از دست دادند. تا جایی که خارگ به بدترین شرایط خود در طول تاریخ نزدیک و تبعیدگاه مخالفان حکومت شد» (فروغی، ۱۴۰۲: ۱۱۳).
۱۳۰۰ ۱۳۰۰	* در ادامه دوره قبل و در دهه نخست پهلوی دوم خارگ در بدترین وضع اقتصادی خود بود. به طوری که کشاورز (۱۳۶۳) از مشاهدات خود در سال (۱۳۳۳) می‌نویسد، اندک جمعیت خارگ (حدود ۲۰۰ نفر) از تبعیدی‌ها گدایی می‌کردند. * پس از جنبش ملی نفت، خارگ با بازایی جایگاه بازرگانی خود، نقش نوینی با عنوان "پایانه صدور نفت" را عهده‌دار شد. «در این زمان موقعیت ژئوپلتیک و ژئواستراتژیک خارگ در ارتباط با نفت، جان دوباره‌ای به این جزیره داد. اما با هویتی نو که متأثر از متغیر نفت و اهمیت روزافزون آن بود» (فروغی، ۱۴۰۲: ۱۱۳).
	* استقرار تجهیزات مربوط به انبار و صدور نفت از دهه ۱۳۳۰ و جانمایی صنایع پتروشیمی از دهه ۱۳۴۰، تغییرات شدید در سیمای سرزمین جزیره خارگ را به همراه آورد که اختلال‌های بوم‌شناختی آن، خارگ امروز را درگیر کرده‌است.

یافته‌های تحقیق

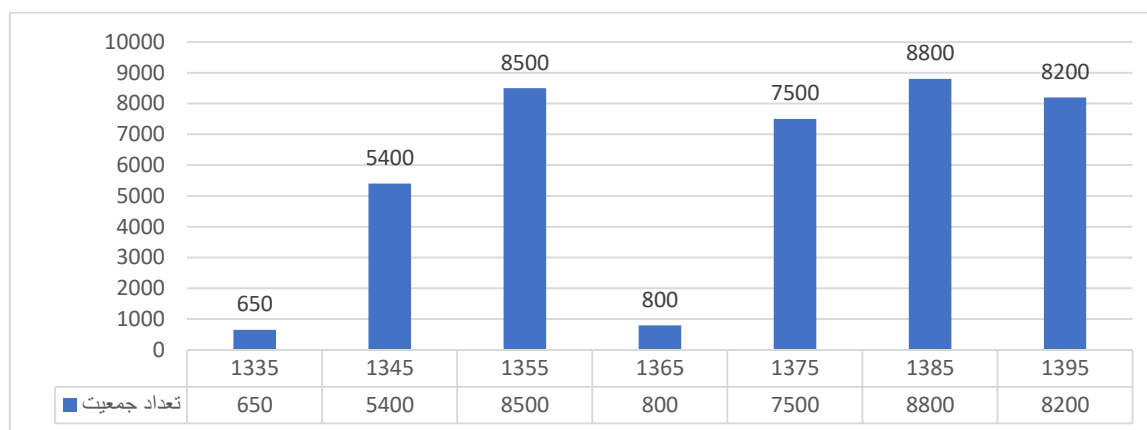
برای توصیف و شناخت مکان مورد مطالعه، با جمع‌بندی کاربست تکنیک‌های پژوهشی بر روی مواد تحقیق می‌توان از یافته‌های پژوهشی زیر سخن گفت. در بیان یافته‌های پژوهشی تحقیق حاضر باید توجه داشت که "متغیر مستقل" صنعت نفت به‌عنوان عامل اثرگذار بر سیمای سرزمین جزیره خارگ که "متغیر وابسته" شمرده شده مطالعه شده‌است. در این میان، بارگذاری‌های جمعیتی و سازه‌ای به عنوان "متغیر میانگر" (واسط) در ایجاد اختلال‌های سیمای سرزمین مدنظر قرار گرفته‌است.

جزیره خارگ و صنعت نفت: در نیمه دهه ۱۳۳۰ خورشیدی به دلیل نیاز مبرم اروپا به بازسازی پس از جنگ دوم جهانی از یک سو و فضای سیاسی و اقتصادی ایران پس از ساقط کردن دولت ملی دکتر مصدق در کودتای ۲۸ مرداد ۱۳۳۲ از دیگر سو، صدور نفت از ایران شتاب روزافزون گرفت. از این رو جزیره خارگ به دلیل عمق مناسب ساحل شرقی (شکل ۴)، نزدیکی به میادین نفت و گاز و امنیت ژئوپلتیکی، از نیمه دوم دهه ۱۳۳۰ به تدریج به‌عنوان پایانه نخست در صدور نفت ایران نقش آفرین شد. در این سال‌ها «از گچساران به جزیره خارگ لوله نفت کشیده‌اند» (آل‌احمد، ۱۳۵۶: ۱۲). «ساختمان خط لوله ۲۶، ۲۸ و ۳۰ اینچی که جزیره خارگ را به منطقه نفت‌خیز گچساران متصل خواهد کرد در ۲۶ آبان ۱۳۳۷ آغاز گردیده است» (اتاق بازرگانی، ۱۳۳۹: ۴۱). در ادامه این روند بود که صنایع وابسته به نفت و گاز نیز در خارگ پا گرفت و به‌عنوان مثال، «شرکت سهامی شیمیایی خارگ به سال ۱۳۴۵ با خوراک‌گیری از گازهای همراه با نفت میادین داریوش و خارگ و با هدف تولید و صدور فرآورده‌های پتروشیمی تأسیس شد» (شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۴۸: ۱۱۳ و ۱۱۶).



شکل ۴ نقشه موقع جزیره خارگ در خطوط هم‌عمق ۲۰ تا ۴۰ مترخلیج فارس (برگرفته از فروغی، ۱۴۰۲: ۱۱۹)

*** بارگذاری سنگین جمعیت در جزیره خارگ:** جایگاه جزیره خارگ به عنوان پایانه نخست در صدور نفت کشور در کنار جانمایی صنایع نفت و گاز و همینطور نقش نظامی، بارگذاری سنگین جمعیت را در آن رقم زده است. از این رو و براساس (شکل ۵) جمعیت دائمی خارگ در طول ۶۰ سال منتهی به سال ۱۳۹۵، نزدیک به ۱۳ برابر افزایش داشته و تراکم نسبی جمعیت به ۳۹۰ نفر در کیلومتر مربع رسیده است. این ارقام به ترتیب ۳ و ۸ برابر میانگین کشوری می باشد. در واقع تراکم جمعیت در جزیره خارگ با تراکم نسبی جمعیت در متراکم ترین استان کشور (تهران) برابری می کند. این در حالی ست که در صورت به حساب آوردن جمعیت شناور از قبیل: دانشجویان و کارکنان اقماری، شمار جمعیت این جزیره سنگینی چشمگیری خواهد داشت. بر این اساس، طبق یکی از برآوردها (مهندسان مشاور گزین، ۱۳۹۵) شمار جمعیت خارگ در سال ۱۳۹۰ حدود ۱۲۰۰۰ نفر برآورد شده است.



شکل ۵ نمودار تغییر در تعداد جمعیت ساکن و دائمی جزیره خارگ از سال ۱۳۳۵ تا ۱۳۹۵ (استخراج از سالنامه های مرکز آمار)

*** اختلال در سیمای سرزمین جزیره خارگ:** «اختلال» ناشی از فعالیت های انسانی از طریق تکنولوژی در مقیاس فضایی- زمانی و در یک دامنه وسیع گسترش می یابد» (زبردست و همکاران، ۱۳۹۴: ۹۰). اختلال های انسان ساخت با تغییرات عمیق، گسترده و ناسازگار با نظم بوم شناختی و در زمانی کوتاه و به شکلی سریع و با بس آمد بالا حادث می شود. به عنوان مهمترین شکل از این نوع اختلال ها باید به گسیختگی^۱ لکه ها، تغییر کاربری زمین، برهم خوردن الگوهای گردش هوا و رژیم های آب شناختی اشاره کرد. در این میان، گسیختگی به عنوان مخرب ترین اختلال انسان ساخت بیشترین اثر تخریبی را بر فرآیندهای بوم شناختی دارد. «گسیختگی عبارت است از شکسته شدن و تبدیل شدن یک پوشش خاص سرزمین به قطعات کوچکتر و بدون ارتباط مؤثر با یکدیگر» (همان: ۹۲ به نقل از Turner, et al, 2001; Fahrig & Nuttle, 2006; Bissonette, 2007; Collinge, 2009). مهمترین عمل انسان ساخت در ایجاد گسیختگی، پروژه های راه سازی است. «از دیدگاه فورمن^۳ (۱۹۹۵) پنج اثر فضایی اختلال در سیمای سرزمین وجود دارد که جاده ها به صورت مستقیم و غیرمستقیم در ایجاد همه آنها نقش دارند» (همان: ۹۵). گسیختگی ناشی از انواع جاده های برون شهری جزیره خارگ با طول ۲ / ۳ کیلومتر در کیلومتر مربع و با طول مطلق ۵۰ کیلومتر (شکل ۶)؛ از آن جهت اختلالی است که براساس اصل "فضا- زمان"^۴ "اُفت عملکردی در قطعات کوچک سرعت بیشتری دارد. با توجه به اصل فوق می توان آسیب های سیمای سرزمینی برآمده از گسیخته شدن

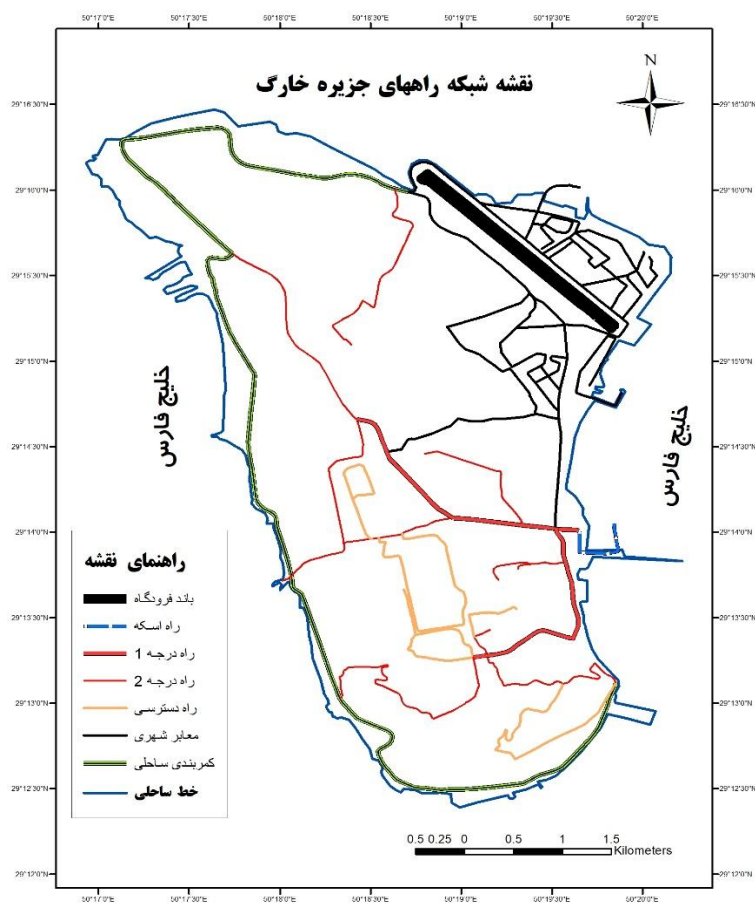
1. Disturbance
2. Fragmentation
3. Forman
4. Space - Time

خارگ توسط جاده‌ها از یک پهنه یکپارچه اکولوژیکی به بیش از ۲۰ قطعه (شکل ۶) را در دو محور زیر دانست که کاهش تنوع زیستی و انقراض محلی گونه‌های گیاهی و جانوری از بازتاب‌های اصلی بوم‌شناختی آن است.

* افزایش لبه و محیط لکه‌های جزیره و بیشتر شدن سطح تماس؛

* وقوع پدیده‌های: ساییدگی^۱ نقصان^۲ و جداافتادگی^۳ در لکه‌های گسیخته شده که به ترتیب سبب حذف و کوچک‌شدگی و از بین رفتن ارتباط مؤثر میان لکه‌ها و قطعات کوچک شده می‌شود.

افزون بر گسیختگی ناشی از شبکه راه‌های جزیره خارگ، تغییر کاربری زمین از پوشش طبیعی به کاربری‌های انسان‌ساخت، دومین عامل اختلال در سیمای سرزمین این جزیره محسوب می‌شود که در دو شکل کاربری‌های سکونتگاهی- نظامی و صنعتی انجام شده‌است (شکل ۷). در این میان، جانمایی شهر خارگ در دشت ساحلی همراه با بافت فشرده و آشفته (شکل ۷) و با نسبت حدود یک سوم جزیره، زمینه اختلال‌های پرشمار از جمله اختلال در نظام آب‌شناختی آبخوان‌ها را رقم زده‌است.



شکل ۶ نقشه از شبکه راه‌ها و گسیختگی جزیره خارگ (نگارندگان)

1. Attrition
2. Shrinkage
3. Isolation



شکل ۷ عکس - نقشه از غلبه کاربری شهر و صنعت در جزیره خارگ (دریافت و ویرایش از Google Earth, 2022)

نتیجه گیری و پیشنهادها

آنچه آل احمد در (سال ۱۳۳۷) از تغییرات پیش روی خارگ در فردای صنعت نفت با زبان ادبی انشاء کرده بود، امروزه از زبان علم "بوم‌شناسی سیمای سرزمین" و با تمسک به اصل "ساختار - عملکرد" تأیید می‌شود. براساس این اصل، در جزیره شهر خارگ تغییر در اجزاء و عناصر ساختاری سیمای سرزمین (شکل ۸)، به عنوان اختلال‌های انسان‌ساخت، فرآیندهای عملکردی جاری در آن را مختل کرده است. در فرجام این روند اختلالی، عملکرد بوم‌شناختی خارگ که در خدمات اکوسیستمی آن بازتاب می‌یابد، دچار رکود می‌شود؛ چرا که «تغییرات در شرایط اکولوژیکی مرتبط با شهرنشینی (مثل آلودگی حوضه آبخیز، از بین رفتن تنوع زیستی و تغییر اقلیم)، خدمات اکوسیستمی را در مقیاس محلی و جهانی تحت تأثیر قرار خواهد داد» (زبردست و همکاران، ۱۳۹۴: ۳۷).



شکل ۸ سیمای سرزمین جزیره خارگ در سال ۱۳۳۷ (آل احمد، ۱۳۵۶) و سال ۱۴۰۱ (Google Earth, 2024)

* «وقتی چنان بندری و چنان تاسیساتی در خارگ کامل بشود دیگر از آن خارگ که در این دفتر خواهید دید کمتر اثری بر روی روزگار ما مانده‌است. چرا که قلمزین این کلمات وقتی آنجا بود دید که خارگ چگونه از دم جاروب بولدوزرهای بزرگ رفته می‌شد. از خانه‌ها و نخل‌هایش گرفته که مزاحم فرودگاه‌ها و باراندازها بودند تا بزهایش که دست و پاگیر شده بودند و حتی شخص ساکنانش که در چنان گرم‌بازار متخصصان و مهندسان و مقاطه کاران هیچکاره بودند» (آل‌احمد، ۱۳۵۶: ۱۲).

برای تعدیل اختلال‌های جزیره خارگ و ترمیم خدمات اکوسیستمی آن، ذیل "طرح مدیریت نوار ساحلی"^۱ از طرح "مدیریت یکپارچه نواحی ساحلی" که پیشتر معرفی شد، پیشنهادهای ریزنا شده و قابل اجرای زیر با یکی دیدن "خارگ و خارکو" مورد تأکید است.

الف) پیشنهادهای مکانی - سازه‌ای:

- توقف گسترش شبکه راه‌ها و ایجاد ارتباط کالبدی - اکولوژیکی میان لگه‌های جدا شده؛
- تعریف لگه‌های ساحلی امن برای زادآوری دوزیستان دریایی و حفاظت از جانوران خشکی‌زی؛
- تعریف مسیرهای گردشگری روزانه با کمیته ایست در جزیره خارگ همراه با پشتیبانی بنادر ساحلی (بوشهر، گناوه و ...)

- تحدید محیط‌های مرجانی دایر و پویا؛

- طرح تثبیت محدوده شهر خارگ و حذف حریم آن؛

- تهیه طرح عملیاتی برای به‌سازی، نوسازی و بازسازی بافت فرسوده شهر خارگ.

ب) پیشنهادهای غیرمکانی - غیرسازه‌ای:

- بازگشت به "طرح تثبیت جمعیت"^۲ توقف رشد جمعیت غیربومی و برنامه‌ریزی برای مهاجرفرستی جمعیت بومی؛
- آزادسازی ظرفیت‌های مشارکت مردمی برای حفظ مواریث بوم‌سازگان‌های جزیره در افق اجرای طرح (3R)^۳؛
- تکمیل مطالعات بوم‌شناسی سیمای سرزمین جزیره خارگ با استفاده از نرم‌افزارهای کمی‌ساز (همانند Fragstats).

منابع

- آل‌احمد، جلال (۱۳۵۶)، جزیره خارگ، دُرّ یتیم خلیج فارس، تهران: امیرکبیر.
- اتاق بازرگانی (۱۳۳۹)، جزیره خارگ و موقعیت آینده آن، نشریه نامه اتاق بازرگانی، ۳۹-۴۸.
- برد، اریک، ترجمه یمانی، مجتبی (۱۳۹۲)، ژئومورفولوژی ساحلی، تهران: دانشگاه تهران.
- پژوهشکده هواشناسی و علوم جوی (۱۳۸۷)، پهنه‌بندی اقلیمی استان قزوین با بهره‌گیری از GIS، سازمان هواشناسی کشور و اداره کل هواشناسی قزوین.
- ثواقب، جهانبخش و لعبت‌فرد، احمد و رستمی، پروین (۱۳۹۹)، تأثیرات جمعیتی صنعت نفت در جزیره خارگ و پیامدهای آن (۱۳۳۶ - ۱۳۵۶ شمسی)، دوفصلنامه تحقیقات تاریخ اجتماعی، سال دهم، شماره ۱، ۱۲۳-۱۴۶.
- جعفرپور، ابراهیم (۱۳۵۷)، پژوهش‌های اقلیمی در غرب ایران، تهران: دانشگاه تهران.
- حیدری، احمد (۱۳۹۹)، خارگ و خاراسن؛ پیشنهاد و بحثی درباره انتساب دوگور صخره‌ای بزرگ و نام جزیره خارگ، دوفصلنامه پژوهش‌های ایران‌شناسی، سال دهم، شماره ۱، ۱۰۴-۱۲۴.

۱. (SMP : Shoreline Management Plan) این طرح «بر مدیریت مناطقی متمرکز شده است که مستقیماً در معرض پدیده‌های دریایی قرار

داشته و از طرف دیگر از نظر محیط‌زیستی اهمیت دارند» (سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۳۹۳: ۲۸).

۲. با توجه به محدودیت ظرفیت اکولوژیکی جزیره خارگ، در دهه ۱۳۵۰ دولت تصمیم به تثبیت جمعیت خارگ گرفته بود.

۳. Reduce , Repeat , Recycle of Consumption.

- رضوان تبار، امیر و پروانه، فرهاد (۱۳۹۷)، *نگاهی به تحولات سیاسی و اقتصادی جزیره خارگ از دوران باستان تا عصر صفویه*، فصلنامه مطالعات خلیج فارس، سال چهارم، شماره دوم، شماره پیاپی ۱۴، ۱۷-۲۵.
- زبردست، لعبت و یاوری، احمد رضا و پریور، پرستو و ستوده، احد (۱۳۹۴)، *اکولوژی سیمای سرزمین، تهران: آوای قلم*.
- زمرّدیان، محمدجعفر (۱۳۸۵)، *ژئومورفولوژی ایران*، چاپ اول، مشهد: دانشگاه فردوسی.
- سازمان بنادر و دریانوردی (۱۳۹۳)، *مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی ایران*، جلد دوم (سواحل خلیج فارس و دریای عمان)، تهران: سازمان بنادر و دریانوردی.
- سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح (۱۳۸۱)، *جغرافیای جزایر ایرانی خلیج فارس*، تهران: سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح.
- شایان، سیاوش (۱۳۶۹)، *فرهنگ اصطلاحات جغرافیای طبیعی*، تهران: سازمان پژوهش و برنامه ریزی آموزشی.
- علایی طالقانی، محمود (۱۳۸۲)، *ژئومورفولوژی ایران*، تهران: انتشارات قومس.
- فریادی، شهرزاد (۱۳۹۴)، *مقدمه‌ای بر روش تحقیق در محیط زیست*، تهران: دانشگاه تهران.
- کشاورز، کریم (۱۳۶۳)، *چهارده ماه در خارگ (یادداشت‌های روزانه زندانی)*، تهران: انتشارات پیام.
- مسعودیان، سید ابوالفضل (۱۳۹۰)، *آب و هوای ایران*، مشهد: انتشارات توس.
- مهندسان مشاور گزینه (۱۳۹۵)، *طرح جامع و تفصیلی شهر خارگ*.
- منصوری، رضا و ثروتی، محمدرضا (۱۳۹۵)، *ژئومورفولوژی، مدیریت یکپارچه منطقه ساحلی (ICZM) و آمایش سرزمین*. مجموعه مقالات همایش انجمن ژئومورفولوژی ایران با عنوان ژئومورفولوژی و آمایش سرزمین، ۱۵۵-۱۵۸.
- ونچ ای، درامستاد، و آلسون دی، جیمز و فورمن تی، ریچارد، ترجمه آذری دهکردی، فرود (۱۳۸۶)، *اصول اکولوژی سیمای سرزمین*، تهران: اتحاد دبستان.
- یاوری، احمد رضا و دارایی، لاله و زبردست، لعبت و هاشمی، محمود (۱۳۹۶)، *شناخت استعداد سرزمین در فلات ایران*، تهران: آوای قلم.



رشد هوشمند و پایدار شهرها با استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی و مدیریت شهری

فرهاد خسروانی^۱، یوسف رفیعی^۲✉، حسین نصیری^۳

۱. دکترای تخصصی، مدیر مطالعات خدمات شهری و محیط زیست مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، تهران، ایران.
۲. دکترای تخصصی، برنامه‌ریزی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. نویسنده مسئول: rafii.yusof@gmail.com
۳. دکترای تخصصی، جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌ها: دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸	طی سال‌های اخیر، استفاده از هوش مصنوعی به‌طور گسترده، به‌ویژه در تحقیقات، برای مقابله با چالش‌های مختلف اجتماعی، اقتصادی، برنامه‌ریزی شهری و محیط زیستی توسعه پیدا کرده‌است. هوش مصنوعی با توجه به قابلیت‌های پیشرفته خود می‌تواند به یکی از ابزارهای اساسی برای دستیابی به توسعه هوشمند و پایدار در شهرها تبدیل شود. استفاده از هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی و مدیریت شهری، حوزه‌ای نسبتاً جدید محسوب می‌شود. این مطالعه مرور منابعی از حوزه‌های برنامه‌ریزی و مدیریت شهری است که هوش مصنوعی می‌تواند در آنها به کار گرفته شود و از توسعه هوشمند و پایدار در شهرها پشتیبانی کند. نتایج تاکید دارد که گسترش حوزه‌های تحقیقاتی هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی شهری مسیر را برای پذیرش و استفاده واقعی و گسترده‌تر این فناوری توسط مدیران شهری هموارتر می‌کند. باید در نظر داشت که تهیه داده‌های اساسی و قابل اعتماد عنصری مهم برای استفاده مؤثر از هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی و مدیریت شهری است. همچنین همسویی هوش مصنوعی و انسان برای مدیریت مناسب چالش‌های شهری و دستیابی به توسعه هوشمند و پایدار بسیار مهم است. این موارد ضرورت همکاری بین ذینفعان کلیدی در شهرها را به طور خاص در جهت دستیابی به پذیرش بیشتر هوش مصنوعی بیش از پیش آشکار می‌سازد.

استناد: خسروانی، فرهاد، رفیعی، یوسف، نصیری، حسین (۱۴۰۴). رشد هوشمند و پایدار شهرها با استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی و مدیریت شهری. *رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط*، ۲(۲)، ۷۰-۵۹.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045893.1068>

© ۱۴۰۴ (۲۰۲۶) نویسندگان مقاله، نشریه رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط، ناشر: سازمان مطالعه و تدوین کتب دانشگاهی در علوم اسلامی و انسانی (سمت).



Smart and Sustainable Growth of Cities Using Artificial Intelligence Technologies in Urban Planning and Management

Farhad Khosravi ¹, Yousef Rafii ²✉, Hossein Nasiri ³

1. PhD, Director of Urban Services and Environment Studies, Center for Studies and Planning of Tehran City, Tehran, Iran.
2. PhD, Environmental Planning, University of Tehran, Tehran, Iran. Corresponding author: rafii.yusof@gmail.com
3. PhD, Geography and Rural Planning, University of Tehran, Tehran, Iran.

Article Info

History

Received: December 17, 2025
Accepted: February 07, 2026

Keywords

Artificial Intelligence
Urban Planning and management
Sustainable and Smart City
Data

Abstract

In recent years, the use of artificial intelligence has expanded widely, especially in research, to address various social, economic, urban planning, and environmental challenges. Given its advanced capabilities, artificial intelligence can become one of the essential tools for achieving smart and sustainable development in cities. The application of artificial intelligence in urban planning and management is considered a relatively new field. This study provides a review of resources from the areas of urban planning and management where artificial intelligence can be utilized to support smart and sustainable development in cities. The results emphasize that expanding the research areas of artificial intelligence in urban planning paves the way for greater acceptance and broader use of this technology by urban managers. It is important to note that the collection of fundamental and reliable data is a crucial element for the effective use of artificial intelligence in urban planning and management. Additionally, the alignment of artificial intelligence and human is vital for appropriately managing urban challenges and achieving smart and sustainable development. These factors particularly highlight the necessity for collaboration among key stakeholders in cities to enhance the acceptance of artificial intelligence.

Citation: Khosravi, F., Rafii, Y., & Nasiri, H. (2025). Smart and Sustainable Growth of Cities Using Artificial Intelligence Technologies in Urban Planning and Management. *Innovative Approaches in Human–Environment Studies*, 2(2), 59-70.
<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045893.1068>

© 2025 Authors, Innovative Approaches in Human–Environment Studies.

Publisher: The Organization for Researching and Composing University Textbooks in the Islamic Science and Humanities (SAMT)

مقدمه

توسعه پایدار به عنوان تعادل بین رشد اقتصادی پایدار و شرایط اکولوژیکی تعریف می‌شود. این وعده‌ای است برای دستیابی به اهداف آینده بدون به خطر انداختن رفاه جامعه، کیفیت زندگی و محیط زیست (Berawi, 2019). در حال حاضر سومدیریت، افزایش جمعیت، پیامدهای تغییرات اقلیمی، تخریب محیط زیست، عدم توانایی در تأمین مسکن مناسب، امنیت و مشکلات مرتبط با تأمین پایدار آب، غذا و انرژی موضوعات بحث بین محققان، برنامه‌ریزان شهری و سیاست‌گذاران است (Berawi, 2019). از زمان افزایش بی‌سابقه شهرنشینی در دنیا شهرها با فشارهای فزاینده‌ای در زمینه‌های اقتصادی، اجتماعی، مدیریتی و محیط زیستی مواجه هستند (Perveen et al., 2017). در پاسخ به این چالش‌ها، مفهوم توسعه پایدار، به امید ساختن آینده‌ای مطلوب برای شهرها، به کانون بحث‌های سیاست‌گذاری شهری گره خورده است (Yigitcanlar & Teriman, 2015). بر این اساس، در چند سال اخیر بسیاری از شهرهای جهان به مفهوم شهر هوشمند روی آورده‌اند و تلاش می‌کنند از فناوری‌های پیشرفته در برنامه‌ریزی شهری برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار، در ارتباط با شهرها و همچنین شهر هوشمند استفاده کنند (Giuliani et al., 2020).

اگرچه استفاده از فناوری‌ها در برنامه‌ریزی و مدیریت شهرها مفهوم جدیدی نیست، اما امروزه هوش مصنوعی (AI)^۱ نشان داده که به نقطه‌ای کانونی و نوآرانه رسیده که می‌تواند ایده‌ها را از متخصصین در رشته‌های مختلف گرفته و با استفاده از ابزارهای در اختیار خود؛ از جمله اینترنت اشیاء (IoT)^۲، شبکه‌های عصبی مصنوعی، یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، و غیره با استفاده از کلان داده‌ها، در سرتاسر جهان مورد استفاده قرار گرفته و نتایج شگفت‌انگیزی ارائه دهد (Milton, 2008). باید اشاره کرد که برای حل یک مشکل خاص، ممکن است یک یا چند رویکرد را انتخاب شود که به نوبه خود به معنای انتخاب یک یا چند فناوری است زیرا بسیاری از آنها ممکن است در بسیاری زمینه‌ها منحصر به فرد نباشند و مکمل یکدیگر به شمار بروند (Corea, 2019). از این رو، امروزه هوش مصنوعی به عنوان یک فناوری نوید دهنده در توسعه شهری هوشمند و پایدار نیز شناخته می‌شود (Sanchez, 2023).

امروز، تحلیل‌های کلان داده‌های شهری و فناوری‌های برنامه‌ریزی مبتنی بر داده به عنوان بنیادهای توسعه هوشمند و پایدار شهری مبتنی بر برنامه‌ریزی الگوریتمی در نظر گرفته و تعریف می‌شوند. این برنامه‌ریزی در شهر به استفاده از طیف متعدد الگوریتم‌های محاسباتی و تکنیک‌های تحلیل داده‌ها برای طراحی و بهینه‌سازی محیط‌های شهری اشاره دارد. هدف این رویکرد در برنامه‌ریزی شهری، بهبود زیست‌پذیری و عملکرد شهرها از طریق تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد و یکپارچه‌سازی بینش‌های مبتنی بر داده و در نتیجه بهبود پایداری شهری است (Urban planning society of china). این رویکرد، از مجموعه داده‌های بزرگ و ابزارهای مدل‌سازی پیشرفته برای ایجاد طرح‌های شهری کارآمد، پایدار و سازگار، با چالش‌های پیچیده مانند ترافیک، استفاده از زمین، تخصیص منابع و اثرات محیط زیستی بهره می‌برد (Lazaroiu & Harrison, 2021).

به عنوان مثال، هوش مصنوعی می‌تواند به برنامه‌ریزان شهری کمک کند تا بهترین و عادلانه‌ترین شبکه‌ها را برای مدیریت ترافیک و حمل‌ونقل عمومی فراهم کنند. همچنین می‌تواند به طراحان شهری کمک کند تا به نیازها برای طراحی محیط‌های خاص پاسخ دهند و آنها را بهتر طراحی کنند که مکان‌های کارآمدتری ایجاد شوند. علاوه بر این، هوش مصنوعی می‌تواند کیفیت هوا را درون شهرها پیش‌بینی و تحلیل کند و نتایج مربوط به سطوح آلودگی، چگالی ذرات و سطوح آلاینده را تحلیل کند؛ که این اطلاعات ورودی‌های ارزشمندی برای اطلاع‌رسانی به ادارات شهری و سیاست‌گذاران فراهم می‌آورد (Mahendra, 2021).

با توجه به آنچه تا کنون گفته شد، این مقاله بررسی حوزه‌های برنامه‌ریزی و مدیریت شهری است که فناوری‌های هوش مصنوعی می‌تواند به کار گرفته شود و همچنین یک ارزیابی از چگونگی پشتیبانی این فناوری‌ها از توسعه هوشمند و پایدار شهری را ارائه می‌دهد. این مرور، ادبیات فعالیت‌های تحقیقاتی را مورد بررسی قرار می‌دهد و فعالیت‌های اجرا شده در این زمینه را شامل نمی‌شود.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

هوش مصنوعی، در عصر حاضر نقش مهمی در برنامه‌ریزی شهری و توسعه شهر هوشمند دارد. این، به شهرها اجازه می‌دهد تا با استفاده از فناوری‌های محاسباتی هوشمندی که می‌توانند داده‌ها را تجزیه و تحلیل کنند، تصمیمات آگاهانه‌تری برای بهبود محیط‌های شهری بگیرند و رویکردی جامع‌تر و سازگارتر برای طراحی، مدیریت و ارائه خدمات شهری در راستای رشد هوشمند و پایدار شهری اتخاذ شود (Canada, 2024). یکی از تعاریف خوب هوش مصنوعی که درک بهتری از آن در عصر حاضر ارائه می‌دهد، هوش مصنوعی را به عنوان تقلید از ویژگی‌های شناختی انسانی مانند ارتباط، استدلال، دانش، درک و برنامه‌ریزی در یادگیری و حل مشکلات به صورت موثر تعریف می‌کند (Frankenfield, 2022). آنچه که توانایی‌های شناختی انسان را از هوش مصنوعی متمایز می‌کند، تفاوت‌ها در نحوه انجام وظایف است. در حالی که انسان‌ها وظایف را به صورت دستی اجرا می‌کنند، هوش مصنوعی می‌تواند وظایف با حجم بالا را اجرا کند. علاوه بر این، هوش مصنوعی می‌تواند مقادیر زیادی از داده‌ها را تجزیه و تحلیل کند و بنابراین به عنوان راه حل مناسب برای مقابله با محدودیت‌های حل مسائل پیچیده توصیه می‌شود (Testi, 2021).

کاربردهای هوش مصنوعی که در سال‌های اخیر توسعه یافته‌است، بسیار قابل توجه است. هر ساله هوش مصنوعی قابلیت‌های جدیدی کسب می‌کند، دسترسی به آن آسان‌تر می‌شود و تعمیم‌پذیری بیشتری پیدا می‌کند و فرصت‌ها و در عین حال برخی مخاطرات و حساسیت‌هایی را ایجاد می‌کند. در سال‌های اخیر، هوش مصنوعی در نهادهای دولت محلی و مدیریت شهری مورد استفاده قرار گرفته‌است. استفاده از هوش مصنوعی عمدتاً به دو حوزه متمایز اما مرتبط مربوط می‌شود: تصمیم‌گیری و وظایف برنامه‌ریزی (مانند برنامه‌ریزی استفاده از زمین) و عملیات خدمات شهری خدمات شهری (مانند کنترل ترافیک و جمع‌آوری زباله) (Samsurijan et al., 2022). به طور گسترده‌ای فرض می‌شود که کاربرد هوش مصنوعی و فناوری‌های مرتبط با آن، رشد اقتصادی و رفاه عمومی را در شهرهای هوشمند افزایش خواهد داد (Szorenyi, 2024). اخیراً با توجه به ظهور و در دسترس بودن هوش مصنوعی در کاربردهای شهری، شهرها در مسیر هوشمندسازی خود از این فناوری برای مقابله با چالش‌های شهری و توسعه پایدار به شیوه‌های موثرتر استفاده می‌کنند.

علاوه بر این، ابتکارات استفاده از هوش مصنوعی در حوزه برنامه‌ریزی و مدیریت شهری می‌توانند تحت عناوین کلی اقتصاد، جامعه، محیط زیست و مدیریت تقسیم‌بندی شوند. بر این اساس، توسعه شهرهای هوشمند از طریق برنامه‌ریزی شهری نیازمند یادگیری دیدگاه‌ها، بینش‌ها و کارایی‌های مختلف است (Allam & Dhunny, 2019). بنابراین، در زمینه شهرهای هوشمند، برنامه‌ریزی شهری می‌تواند از طریق به کارگیری یا ادغام هوش مصنوعی در عمل برنامه‌ریزی برای توسعه هوشمند و پایدار شهرها در راستای بهبود کیفیت زندگی شهروندان بهره‌مند شود (Nam & Pardo, 2011). امروزه، کاربرد برنامه‌های مرتبط با هوش مصنوعی در بخش‌های مختلف مشاهده می‌شود. به طوریکه مثلاً حتی موتورهای جستجو در جستجوهای روزمره افراد بر اساس الگوها و نیازهای متفاوت آنها از این فناوری بهره می‌برند.

شهرهایی در اروپا، آمریکا و آسیا، از جمله آمستردام، وین، تورنتو، سنگاپور، هنگ کنگ و غیره از هوش مصنوعی برای دستیابی به نتایج پایدار در اهداف تحول شهرهای هوشمند خود استفاده کرده‌اند (Tekouabou et al., 2024).

این کاربرها به عنوان مثال در تجزیه و تحلیل‌های پیشرفته، برنامه‌ریزی، مدیریت داده‌ها و بهبود عملیات در مدیریت بحران‌های شهری، مدیریت سیستم‌های ترافیکی، پایش آلودگی هوا، مدیریت بهینه انرژی و حتی سیستم‌های تشخیص نشت آب در زیر زمین استفاده کرده‌اند (Jha et al, 2021). اثبات شده است که برخی شبکه‌ها و الگوریتم‌ها، مانند شبکه‌های عصبی و ماشین بردار پشتیبان، خودکار سلولی، رگرسیون منطقی فضایی و مدل‌سازی و شبیه‌سازی مبتنی بر عامل‌ها به صورت مؤثری در طبقه‌بندی و تحلیل الگوهای داده‌های شهری و همچنین به عنوان بهترین گزینه‌ها برای مطالعه الگو و تغییرات رشد جمعیت شهری و تغییرات کاربری زمین شناسایی و استفاده شده‌اند و بر اساس نتایج، راه‌حل‌هایی نیز برای مسائل و چالش‌های موجود ارائه می‌دهند (Gulshad et al, 2022).

علاوه بر این، پیش‌بینی می‌شود که در آینده‌ای نه چندان دور، هوش مصنوعی و تأثیر آن بر چالش‌های محیط‌های شهری ابعاد چندوجهی بسیاری را در برگیرد. به عنوان مثال، در یک مطالعه که توسط Zou و همکاران (۲۰۱۹) انجام شد، استفاده از فناوری‌های مرتبط با هوش مصنوعی، پیش‌بینی رشد جمعیت و مدل‌سازی فضایی محیط‌های شهری را تا میزان ۵۰ درصد بهبود داد. در مطالعه دیگری، یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری که مناسب بودن یک ساختمان یا فضای مشخص را با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از ویژگی‌ها مانند توزیع و ترکیب جمعیت، دسترسی‌ها از جمله به حمل‌ونقل و زیرساخت‌ها و فرم شهری ارزیابی می‌کند، در محیط شهری لیون فرانسه به طور موفقیت‌آمیزی بررسی شد (Sideris et al., 2019). یک مطالعه موردی دیگر در چین نیز موفقیت هوش مصنوعی را در ترکیب سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری، سیستم‌های مبتنی بر دانش و شبکه‌های عصبی مصنوعی ارزیابی کرد (Feng and Xu, 1999).

نهایتاً باید گفت افزایش دسترسی به داده‌های کلان در سال‌های اخیر، به ظهور گزینه‌های جدیدی در تحلیل داده‌های شهری برای برنامه‌ریزان منجر شده است که محاسبات پیشرفته‌ای برای پردازش و تحلیل هوشمند داده‌های جغرافیایی در مقیاس‌های مختلف ارائه می‌دهد. به علاوه اگر برنامه‌ریزان شهری به طور گسترده از هوش مصنوعی استفاده کنند، این فناوری پتانسیل قابل توجهی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌ها و سیاست‌گذاری‌ها را نیز دارد و قادر است به شرط در نظر گرفتن نواقص، وظایف جاری برنامه‌ریزی را تا حد زیادی اتوماتیک‌وار اجرا کند (Andrews et al, 2022).

روش پژوهش

این مطالعه، مرور مقاله‌های فناوری‌های هوش مصنوعی است که در برنامه‌ریزی و مدیریت شهری به کار گرفته شده‌اند. ادبیات موجود در حوزه کاربرد هوش مصنوعی در شهر غالباً به این دلیل که هنوز جدید است پراکنده است، اما این موضوع در بررسی روندی که در جریان است به سرعت در حال تغییر و تحول است. مرور ادبیات در مورد یک موضوع تحقیقاتی نوظهور، اهداف متعددی را دنبال می‌کند. یکی از دلایل مهم، شناسایی جایگاه فعلی دانش مورد بررسی در این حوزه است که به محققان و دست‌اندرکاران اجرا کمک می‌کند تا درک بهتری از نوآوری‌ها و یافته‌های موجود داشته باشند. این امر، همچنین زمینه‌ای برای تحقیقات و اقدامات بیشتر را فراهم می‌کند.

جستجو برای مقاله‌های مرتبط به کمک موتور جستجوی Google Scholar و در پایگاه‌های (WoS)^۱ و Scopus انجام شد، زیرا این دو پایگاه دارای جدیدترین مقالات هستند و همچنین مبنایی برای کارهای علمی محسوب می‌شوند. مقاله‌های مورد بررسی بر اساس محدودیت‌های دسترسی، معیارها و کلیدواژه‌های مورد جستجو انتخاب شدند که این مقاله در ادامه به بررسی یافته‌های آنها پرداخته است.

یافته‌های پژوهش

انقلاب صنعتی و آغاز آن، تبدیل مناطق روستایی به شهرهای بزرگ، ایجاد شبکه‌های حمل‌ونقل گسترده، زیرساخت‌های گسترده در محیط شهری، توسعه روش‌های تحقیقاتی تکنولوژیکی، توسعه فناوری‌های پرسرعت و در پی آنها اثرات محیط زیستی تغییرات چنان گسترده‌ای در شهرها ایجاد کرده‌است که غیرقابل وصف بوده است (Ortega, 2020). این تغییرات و به دنبال آن مطالعات انجام شده دامنه گسترده‌ای از موضوعات را شامل می‌شوند. از این‌رو، مقاله‌هایی که متناسب با هدف پژوهش نهایی شده‌بودند با توجه به موضوع و زمینه مورد بررسی آنها و زمینه‌های برنامه‌ریزی شهری که در آنها فناوری‌های هوش مصنوعی به کار برده شده‌اند، با لحاظ محدودیت‌های ذکر شده شامل دسترسی به آنها، معیارها و کلیدواژه‌های مورد جستجو، مورد تحلیل و در سه دسته بندی قرار گرفتند:

- مدیریت شهری، زیرساخت‌ها و توسعه شهری؛
- پشتیبانی از تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی شهری؛
- مدیریت بحران‌ها و محیط زیست شهرها

بررسی‌های اولیه منابع نشان داد که هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی شهری با مفهوم شهر هوشمند و پایدار در زمینه استفاده از فناوری‌های پیشرفته برای بهبود عملکردها در شهرها دارای ارتباط قوی است.

کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت شهری، زیرساخت‌ها و توسعه شهری

هم‌زمان با افزایش مسائل شهری که به‌صورت روزانه نیز به‌وجود می‌آیند، برنامه‌ریزان و مدیران شهری ملزم به پاسخگویی مناسب و کارآمد به این مسائل هستند؛ با این حال، بسیاری از این مسائل بسیار پیچیده هستند و همیشه برای یک برنامه‌ریز شهری و یا تصمیم‌گیر امکان‌پذیر نیست که به‌تنهایی به حل مسئله بپردازد. انتظار می‌رود با ادامه رشد شهرها، محیط‌های شهری و زیرساخت‌های آنها به‌طور فزاینده‌ای برای برنامه‌ریزی، طراحی و درک مسائل آن بیش از پیش چالش‌برانگیزتر شود. مثلاً استفاده مؤثر از زمین در شهرها می‌تواند از افزایش جمعیت پشتیبانی کند و به توسعه اقتصادی و پروژه‌های زیرساختی کمک کند. در این راستا، استفاده از هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی استفاده از زمین نه تنها به بهبود کارایی برنامه‌ریزی شهری کمک می‌کند بلکه مهم‌تر از آن به بهبود کارایی مجموعه شهر کمک می‌کند. برنامه‌ریزی و مدیریت استفاده از زمین جنبه‌ای مهم از برنامه‌ریزی شهری است که به شدت به پردازش داده‌ها و دانش تخصصی وابسته است (Fang et al., 2022).

کنار این چالش‌ها، نتایج عمدتاً نشان می‌دهند که ادغام و پیاده‌سازی فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در شیوه‌های برنامه‌ریزی شهری می‌تواند به مدیریت آینده محیط‌ها و زیرساخت‌های شهری در راستای نیل به اهداف شهر هوشمند و پایدار کمک کند. دستیابی به یک شهر نه تنها هوشمند بلکه پایدار نیازمند همکاری ذینفعان است و پیاده‌سازی هوش مصنوعی به ایجاد ابتکارات در پیاده‌سازی شهر هوشمند، فرآیندهای مدیریتی و طراحی‌های خاص که به چالش‌های شهری و زیرساختی پاسخ می‌دهند، کمک خواهد کرد (Anthony, 2021). مطالعات زیادی (Ibrahim et al., 2021; Lee et al., 2022; Fang et al., 2022) نشان می‌دهند که چگونه هوش مصنوعی برای پشتیبانی از برنامه‌ریزی شهری در شهرهای هوشمند، به‌ویژه در فرآیندهای مدیریت شهری و زیرساخت‌ها و نظارت‌ها در شهر استفاده می‌شود.

همچنین مقالات بررسی‌شده در حوزه توسعه شهرها نشان دادند که کنترل گسترش شهر و پیش‌بینی اثرات آن می‌تواند دشوار باشد؛ با این حال، هوش مصنوعی برای شبیه‌سازی رشد شهرها از طریق تحلیل الگوهای کاربری زمین و تحلیل مقایسه‌ای محیط‌های شهری می‌تواند برای شبیه‌سازی اثرات انواع سیاست‌های برنامه‌ریزی در بسیاری زمینه‌های شهری مورد استفاده قرار گیرد (Shen et al., 2020). بنابراین راه‌حل‌های نوآورانه به برنامه‌ریزان شهری در تحلیل‌های

سریع‌تر و بهتر از کاربری زمین در شهرها و درک بهتر از مجموعه عواملی که در تعیین کنترل‌های توسعه برای رشد شهری دخیل هستند، به عنوان عواملی که بدون استفاده از هوش مصنوعی قابل درک نیستند یا به سختی قابل درک هستند، کمک می‌کند (Cugurullo, 2020; Gray & Kovacova, 2021). در مقیاس‌های کوچکتر، هوش مصنوعی به عنوان مثال برای نظارت و پیش‌بینی نقاط کانونی جرم در شهرها نیز به کار رفته است (He & Zheng, 2021) که این امر امکان اجرای سیاست‌ها و تدابیری را برای افزایش ایمنی در مناطق مورد نگرانی فراهم می‌آورد. همچنین استفاده رایج‌تر از هوش مصنوعی، از طریق فناوری سنجش از دور برای کمک به نظارت و تحلیل‌های کاربری زمین و گسترش شهرها و همچنین مثلاً برای نظارت و شناسایی نقاط مورد نیاز به بهبود مسیرها به کار رفته است (Lan et al., 2021).

یکی از مشکلات پیچیده‌ای که شهرها علاوه بر حوزه پشتیبانی از تصمیم‌سازی در حوزه اجرا نیز با آن مواجه هستند، مدیریت استفاده از زمین و حمل و نقل است. با تغییر محیط شهرها، این تغییرات بر مدیریت، سازماندهی و برنامه‌ریزی برای توسعه‌ها و زیرساخت‌های جدید مرتبط تأثیر می‌گذارد. به طور خلاصه، نتایج مطالعات در این حوزه نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند به طور مؤثر یاد بگیرد، پیش‌بینی و ارزیابی کند، ذخیره و مدیریت کند و داده‌های مربوط به ترافیک و همچنین برنامه‌های توسعه‌های مسکن در شهر را تحلیل کند (Azad & Wang, 2021). این رویکردها در استفاده از هوش مصنوعی به بهبود و کارآمدتر شدن روش‌های برنامه‌ریزی استفاده از زمین، برنامه‌ریزی حمل و نقل، توسعه و مدیریت منجر می‌شود. بررسی کاربرد هوش مصنوعی در این زمینه نشان داده‌است که می‌تواند به خوبی در حل مسائل مربوط به برنامه‌ریزی، طراحی شهری و مدل‌سازی زیرساخت‌های شهری با بکارگیری فناوری‌های مرتبط کمک کند (Anastasiou et al., 2019). در نهایت استفاده از هوش مصنوعی در حوزه مدیریت شهری، زیرساخت‌ها، کنترل بر توسعه شهر و نظارت‌ها پتانسیل‌های قابل توجهی در حوزه‌های ذکر شده نشان می‌دهد (Nikitas et al., 2020).

کاربرد هوش مصنوعی در پشتیبانی از تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی شهری

برنامه‌ریزی شهرهای هوشمند، در تنوری، عمدتاً بر استفاده از فناوری مرتبط با هوش مصنوعی برای بهبود کارایی، اثربخشی، نوآوری و ساخت شهری پایدار و ایمن تر متمرکز است. مقالات این بخش با نمونه‌های استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی در ارائه خدمات شهری و عملیات و همچنین در برنامه‌ریزی‌ها و قانونگذاری‌های شهری، تصمیم‌گیری و وظایف برنامه‌ریزی ارتباط دارد. رایج‌ترین حوزه‌هایی که از هوش مصنوعی برای تحلیل و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در آنها استفاده شده است شامل کیفیت هوا، بهینه‌سازی استفاده از زمین، بهداشت، حوزه‌های برنامه‌ریزی، مدیریت ترافیک، سیاستگذاری‌های شهری و پیشنهاد عملیات مرتبط با خدمات شهری مثل آتش‌نشانی است (Jha et al., 2021).

تعاملات یا فعالیت‌های ایده‌آل مرتبط با فرآیند تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی، اغلب به دلیل محدودیت‌های زمانی، کارایی و بودجه قابل دستیابی نیستند. بنابراین فناوری‌های مرتبط با هوش مصنوعی می‌تواند برخی از فرآیندهای برنامه‌ریزی را برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری مورد حمایت قرار دهد. به عنوان مثال یادگیری عمیق می‌تواند به نگرانی‌های محیط زیستی ناشی از آلودگی‌ها در شهرها پردازد (Ameer & Shah, 2018). مدیریت ترافیک در شهرها یکی دیگر از آن دسته مسائل پیچیده است که با مجموعه وسیعی از تحقیقات و کاربردهای هوش مصنوعی که سعی در بهبود ترافیک، و کاهش ازدحام و مدیریت آن دارند، مواجه است. در چندین مطالعه هوش مصنوعی برای تحلیل داده‌های کلان و درک استفاده فعلی از حمل و نقل و پیش‌بینی ترافیک شبکه‌های حمل و نقل پیچیده استفاده شده‌است. علاوه بر این، فناوری‌های یادگیری عمیق به الگوهای توزیع مکانی مشاغل و مسکن نیز کمک کرده‌اند (Yao et al., 2020). تمام این فرآیندها نیاز به جمع‌آوری، تحلیل و پردازش داده‌های گسترده‌ای دارند که با حمایت هوش مصنوعی، کارایی به مراتب بالاتری حاصل می‌شود.

باید اشاره کرد که تصمیمات برنامه‌ریزی سنتی تر نیز می‌توانند با حمایت هوش مصنوعی تقویت شوند. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که هوش مصنوعی، به‌ویژه سیستم‌های خبره، برای تسهیل برنامه‌ریزی در سطح کلان می‌تواند با برنامه‌ریزی سنتی تلفیق شوند و از جمله در ایجاد نقشه‌ها و ارزیابی‌های مرتبط با قابلیت اجرایی طرح‌های جامع مورد استفاده قرار بگیرند. همچنین، پتانسیل زیادی برای بهبود برخی از تصمیمات برنامه‌ریزی با پشتیبانی هوش مصنوعی وجود دارد. نمونه‌های متعددی وجود دارد که نشان می‌دهد چگونه هوش مصنوعی می‌تواند از برنامه‌ریزی کاربری زمین و همچنین اثر ترافیک بر کاربری‌های مجاور به عنوان بخشی از شبکه حمل‌ونقل شهر هوشمند حمایت کند. با وجود این که نتایج نشان می‌دهد که ادغام سیستم‌های هوش مصنوعی با دانش انسان می‌تواند راه‌حل‌های بهتری در حوزه پشتیبانی از تصمیم‌گیری ارائه دهد (Chaturvedi & de Vries, 2021 و Yuan et al., 2022)، پیشنهاد می‌شود که همکاری‌های بین‌رشته‌ای نیز در به اشتراک‌گذاری و ادغام داده‌ها به منظور بهبود و تکمیل نتایج توسعه یابد.

کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت بحران‌ها و محیط زیست شهرها

مسائلی از جمله اثرات توسعه شهری و یا مصرف انرژی یک شهر بر محیط طبیعی و مثلاً رویدادهای جوی، باید در برنامه‌ریزی شهری یک شهر هوشمند با هدف حفظ توسعه پایدار و کیفیت محیط زیست مورد توجه قرار گیرد. این حوزه به بررسی چالش‌های محیط زیستی و پیامدها و وضعیت‌های اضطراری در شهرها می‌پردازد. بر اساس بررسی یافته‌های مطالعات، هوش مصنوعی به‌طور کاربردی برای حل بسیاری از چالش‌های محیط زیستی و مدیریت آنها استفاده شده‌است. آلودگی صوتی (Mrówczyńska et al., 2019)، مدیریت فضای سبز و پسماند (Conley et al., 2022)، پیش‌بینی رشد جمعیت (Mulligan, 2021)، و آلودگی هوا (Demmler et al., 2021) از جمله مسائلی هستند که هوش مصنوعی برای آنها راه‌حل‌هایی ارائه داده است. مدیریت بحران شهری از جمله مقاومت در برابر سیلاب و ارزیابی ریسک سیلاب برای مناطق شهری از دیگر کاربردهای پشتیبانی‌شده توسط هوش مصنوعی هستند (Pham et al., 2021 و Ye et al., 2021).

نتایج کاربرد هوش مصنوعی در ارتباط با بررسی مسائل مرتبط با حوزه محیط زیست در شهر نشان داده‌اند که قابل اعتماد بوده و تاثیر مثبتی بر افزایش استاندارد زندگی ساکنان شهری دارد. به عنوان مثال، مقالات بررسی شده نشان دادند که به‌طور خاص، برنامه‌های پشتیبانی‌شده توسط هوش مصنوعی برای بهبود استراتژی‌هایی که حجم زباله‌ها را در شهرها پیش‌بینی، اندازه‌گیری و مدیریت می‌کنند، معرفی شده‌اند که می‌تواند نتایج بهتری را با هزینه‌ای بسیار کمتر نسبت به شرایط معمول فراهم کند. این نتایج در نهایت به بهبود کیفیت محیط طبیعی و فیزیکی منجر می‌شود (Gupta et al., 2022). در کنار این مطالعات، هوش مصنوعی همچنین در مطالعات شهری و تحقیقات مرتبط با موضوع اندازه‌گیری اثرات جزایر حرارتی شهرها نیز به‌خوبی استفاده شده است (Feng et al., 2024). همچنین مطالعات نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند تحلیل‌های تاریخی و جاری را نیز در ارتباط با زمان‌های بحرانی در مورد نگرانی‌های محیط زیستی مورد بررسی قرار دهد (Dhamija & Bag, 2020).

می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که هدف هوش مصنوعی، بهبود شرایط محیط زیست طبیعی شهر برای شهروندان به منظور آسایش بیشتر و همچنین به عنوان مثال افزایش دسترسی‌ها به فضاهای شهری است. نتایج این بررسی‌ها همچنین بر استفاده از فناوری‌های پشتیبانی‌شده با هوش مصنوعی برای بهبود فرآیندهای مدیریتی شهری توصیه و حتی تأکید می‌کند.

بحث و نتیجه‌گیری

رشد فناوری و دیجیتال‌تر شدن شهرها و مواجهه مستمر آنها با پیچیدگی‌های اقتصادی، اجتماعی، محیط زیستی و مدیریتی، افزایش نیاز به هوش مصنوعی برای حمایت از برنامه‌ریزی شهری را بیش از پیش سبب می‌شود. چالش واقعی در کاربرد واقعی هوش مصنوعی در شهرها نه در فناوری‌های آن، بلکه در پیاده‌سازی آن در برنامه‌ریزی و طراحی

شهری است (Popelka et al, 2023). مطالعات مورد بررسی، طیفی از فناوری‌های حاضر و نوظهور را که می‌توان برای مواجهه با این چالش‌ها مورد استفاده قرار داد، پیشنهاد می‌دهند و تأکید می‌کنند که برنامه‌ریزی شهری مبتنی بر استفاده از فناوری‌های معتبر هوش مصنوعی می‌تواند از توسعه هوشمند و پایدار شهر حمایت کند. با این حال، تعامل و همکاری میان محققان، برنامه‌ریزان، سازمان‌ها و جوامع که ذینفعان کلیدی تصمیم‌گیری در شهرها هستند، برای پذیرش بیشتر و همه جانبه تر هوش مصنوعی در شهرها مورد نیاز است.

همچنین باید در نظر داشت که نظریه و عمل هوش مصنوعی به‌ویژه در برنامه‌ریزی شهری، هنوز در مراحل ابتدایی خود به‌سر می‌برد. با این حال، جای امیدواری است که تمایل‌ها در سیاستگذاری‌ها و عمل منجر به پذیرش نسبی هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی شهری و توسعه شهرهای هوشمند و پایدار شده‌است (Yigitcanlar et al., 2022). بنابراین به دلیل شکافی که فعلاً بین تحقیق و عمل وجود دارد، دانش فعلی در مورد چگونگی پذیرش هوش مصنوعی در مکانیزم‌های اجرایی در برنامه‌ریزی شهری همچنان نامشخص است. بخش عمده‌ای از بحث‌های مرتبط با برنامه‌ریزی در مورد هوش مصنوعی به فناوری‌هایی مربوط می‌شود که برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها به منظور ایجاد فرآیندهای بهینه‌سازی، مانند مدیریت ترافیک و مصرف انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند و توجه کمتری به استفاده از هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی شهری و فعالیت‌های مرتبط با تصمیم‌گیری، از جمله برنامه‌ریزی و طراحی سناریوهای مولد معطوف شده‌است (Sanchez, 2023).

علاوه بر این، برنامه‌ریزان می‌توانند در نظر داشته باشند که چگونه داده‌هایی که از کارهای آنها تولید می‌شود، می‌تواند به‌طور بهینه جمع‌آوری و آماده شوند تا تجزیه و تحلیل‌های هوش مصنوعی را برای تصمیم‌گیری بهتر مبتنی بر داده‌های دقیق و شواهد در جهت دستیابی به نتایج پایدار تقویت کند. در عین حال، ما نباید تنها به اتصال فناوری‌های مختلف موجود هوش مصنوعی، به‌عنوان مثال یادگیری عمیق و اینترنت اشیاء، فکر کنیم، بلکه باید به اتصال موثر هوش مصنوعی و عملکرد انسان و توسعه دامنه کاربردهای آن بیاوریم که چگونه می‌تواند به حل مشکلات پیچیده برنامه‌ریزی شهری کمک کند (Yigitcanlar et al., 2022).

بنابراین، در حالی که هوش مصنوعی پتانسیل قابل توجهی در عمل برنامه‌ریزی شهری دارد، با افزایش داده‌های کلان و افزایش پیوسته مسائل پیچیده شهری ضروری است که فناوری‌های هوش مصنوعی هر چه زودتر به‌صورت رسمی تر پذیرفته شوند تا موفقیت در زمینه هوشمندسازی و پایداری شهرها هر چه بیشتر تضمین شود. از سوی دیگر، استفاده از هوش مصنوعی بدون در نظر گرفتن ملاحظات آن، مانند امنیت سایبری، حریم خصوصی، تأمین داده‌های کلان و بکارگیری آنها، نقش متخصص امور شهری در آن و غیره از یک سو و بدون آموزش برنامه‌ریزان شهری برای درک این خطرات، می‌تواند تهدید به‌شمار آید. بنابراین، ضرورت توسعه فرآیندهای پذیرش نوآوری، ارتقاء مهارت‌های برنامه‌ریزان و آموزش آنها برای آشنا شدن با هوش مصنوعی از طریق آموزش‌های دانشگاهی و یا سایر دوره‌های رسمی وجود دارد (Exner et al., 2022). همچنین، هنگام ایجاد توسعه هوشمند و پایدار در شهر از طریق برنامه‌ریزی شهری، درک جامع و انتقادی از فناوری‌های مورد استفاده اهمیت بالایی دارد. به این منظور، انجام بررسی جامع از دانش و عمل موجود در این زمینه نه تنها برای ارزیابی وضعیت فعلی بلکه به عنوان ابزاری برای بررسی خطرات، محدودیت‌ها و فرصت‌های آینده هوش مصنوعی در زمینه برنامه‌ریزی شهری اهمیت دارد (UNhabitat, 2022).

نهایتاً باید گفت که برنامه‌ریزی شهری یک حوزه وسیع است. ممکن است این پژوهش نتوانسته باشد تمام زمینه‌های مورد استفاده یا پذیرش هوش مصنوعی در این حوزه را پوشش دهد. آنچه مهم است این است که ما باید دریابیم که چگونه می‌توانیم کاربرد هوش مصنوعی از سوی انسان و زمینه‌های اجرایی حوزه‌های مختلف برنامه‌ریزی و مدیریت شهری را هر چه بیشتر ادغام کنیم.

- AI & Cities: Risks, Applications and Governance, <https://unhabitat.org/ai-cities-risks-applications-and-governance>.
- Allam, Z., & Dhunny, Z. A. (2019). On big data, artificial intelligence and smart cities. *Cities*, 89, 80-91.
- Ameer, S., & Shah, M. A. (2018, August). Exploiting big data analytics for smart urban planning. In 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall) (pp. 1-5). IEEE.
- Anastasiou, C., Lin, J., He, C., Chiang, Y. Y., & Shahabi, C. (2019, November). Admsv2: A modern architecture for transportation data management and analysis. In Proceedings of the 2nd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Advances on Resilient and Intelligent Cities (pp. 25-28).
- Andrews, C., Cooke, K., Gomez, A., Hurtado, P., Sanchez, T., Shah, S., & Wright, N. (2022). AI in planning: opportunities and challenges and how to prepare. American Planning Association.
- Anthony Jnr, B. (2021). A case-based reasoning recommender system for sustainable smart city development. *AI & society*, 36(1), 159-183.
- Azad, A., & Wang, X. (2021). Land use change ontology and traffic prediction through recurrent neural networks: A case study in Calgary, Canada. *ISPRS international Journal of Geo-information*, 10(6), 358.
- Berawi, M. A. (2019). The role of industry 4.0 in achieving Sustainable Development Goals. *International Journal of Technology*, 10(4), 644-647.
- Canada, J. (2024). AI in Urban Planning and Smart City Development. <https://medium.com/@jam.canda/ai-in-urban-planning-and-smart-city-development-6cefc3e87181>
- Chaturvedi, V., & de Vries, W. T. (2021). Machine learning algorithms for urban land use planning: A review. *Urban Science*, 5(3), 68.
- Conley, G., Zinn, S. C., Hanson, T., McDonald, K., Beck, N., & Wen, H. (2022). Using a deep learning model to quantify trash accumulation for cleaner urban stormwater. *Computers, Environment and Urban Systems*, 93, 101752.
- Corea, F. (2019). AI knowledge map: How to classify AI technologies. *An introduction to data: Everything you need to know about AI, big data and data science*, 25-29.
- Cugurullo, F. (2020). Urban artificial intelligence: From automation to autonomy in the smart city. *Frontiers in Sustainable Cities*, 2, 38.
- Demmler, J. C., Gosztanyi, Á, Du, Y., Leinonen, M., Ruotsalainen, L., Järvi, L., & Ala-Mantila, S. (2021). A novel approach of creating sustainable urban planning solutions that optimise the local air quality and environmental equity in Helsinki, Finland: The CouSCOUS study protocol. *Plos one*, 16(12), e0260009.
- Dhamija, P., & Bag, S. (2020). Role of artificial intelligence in operations environment: a review and bibliometric analysis. *The TQM Journal*, 32(4), 869-896.
- Exner, J. P., Nalbach, O., & Werth, D. (2020). Monitoring Street Infrastructures with Artificial Intelligence. *REAL CORP 2020: SHAPING URBAN CHANGE LIVABLE CITY REGIONS FOR THE 21st CENTURYAt*.
- Fang, Z., Jin, Y., & Yang, T. (2022). Incorporating planning intelligence into deep learning: A planning support tool for street network design. *Journal of urban technology*, 29(2), 99-114.
- Feng, F., Ren, Y., Xu, C., Jia, B., Wu, S., & Laforteza, R. (2024). Exploring the non-linear impacts of urban features on land surface temperature using explainable artificial intelligence. *Urban Climate*, 56, 102045.
- Feng, S., & Xu, L. (1999). An intelligent decision support system for fuzzy comprehensive evaluation of urban development. *Expert Systems with Applications*, 16(1), 21-32.
- Frankenfield, J. (2022). Artificial Intelligence: What it is and how it is used. Investopedia.
- Giuliani, G., Mazzetti, P., Santoro, M., Nativi, S., Van Bemmelen, J., Colangeli, G., & Lehmann, A. (2020). Knowledge generation using satellite earth observations to support sustainable development goals (SDG): A use case on Land degradation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 88, 102068.
- Gray, M., & Kovacova, M. (2021). Internet of Things sensors and digital urban governance in data-driven smart sustainable cities. *Geopolitics, History, and International Relations*, 13(2), 107-120.
- Gulshad, K., Wang, Y., Li, N., Wang, J., & Yu, Q. (2022). Likelihood of Transformation to Green Infrastructure Using Ensemble Machine Learning Techniques in Jinan, China. *Land*, 11(3), 317.
- Gupta, T., Joshi, R., Mukhopadhyay, D., Sachdeva, K., Jain, N., Virmani, D., & Garcia-Hernandez, L. (2022). A deep learning approach based hardware solution to categorise garbage in environment. *Complex & Intelligent Systems*, 1-24.
- He, J., & Zheng, H. (2021). Prediction of crime rate in urban neighborhoods based on machine learning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 106, 104460.

<https://www.aiplusinfo.com/blog/artificial-intelligence-and-urban-design>.

- Ibrahim, M. R., Haworth, J., & Cheng, T. (2021). URBAN-i: From urban scenes to mapping slums, transport modes, and pedestrians in cities using deep learning and computer vision. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 48(1), 76-93.
- Jha, A. K., Ghimire, A., Thapa, S., Jha, A. M., & Raj, R. (2021, January). A review of AI for urban planning: Towards building sustainable smart cities. In 2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT) (pp. 937-944). IEEE.
- Tekouabou, Koumetio, S. C., Diop, E. B., Azmi, R., & Chenal, J. (2023). Artificial intelligence based methods for smart and sustainable urban planning: a systematic survey. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(2), 1421-1438.
- Lan, H., Zheng, P., & Li, Z. (2021). Constructing urban sprawl measurement system of the Yangtze River economic belt zone for healthier lives and social changes in sustainable cities. *Technological Forecasting and Social Change*, 165, 120569.
- Lăzăroiu, G., & Harrison, A. (2021). Internet of things sensing infrastructures and data-driven planning technologies in smart sustainable city governance and management. *Geopolitics, History & International Relations*, 13(2).
- Lee, J., Kim, D., & Park, J. (2022). A machine learning and computer vision study of the environmental characteristics of streetscapes that affect pedestrian satisfaction. *Sustainability*, 14(9), 5730.
- Mahendra, S. (2021). Artificial intelligence and urban design. *Artificial Intelligence+*.
- Milton, N. R. (2008). Knowledge technologies (Vol. 3). Polimetrica sas.
- Mrówczyńska, M., Sztubecka, M., Skiba, M., Bazan-Krzywoszańska, A., & Bejga, P. (2019). The use of artificial intelligence as a tool supporting sustainable development local policy. *Sustainability*, 11(15), 4199.
- Mulligan, K. (2021). Computationally networked urbanism and advanced sustainability analytics in internet of things-enabled smart city governance. *Geopolitics, History, and International Relations*, 13(2), 121-134.
- Nam, T., & Pardo, T. A. (2011, September). Smart city as urban innovation: Focusing on management, policy, and context. In *Proceedings of the 5th international conference on theory and practice of electronic governance* (pp. 185-194).
- Nikitas, A., Michalakopoulou, K., Njoya, E. T., & Karampatzakis, D. (2020). Artificial intelligence, transport and the smart city: Definitions and dimensions of a new mobility era. *Sustainability*, 12(7), 2789.
- Ortega-Fernández, A., Martín-Rojas, R., & García-Morales, V. J. (2020). Artificial intelligence in the urban environment: Smart cities as models for developing innovation and sustainability. *Sustainability*, 12(19), 7860.
- Perveen, S., Kamruzzaman, M., & Yigitcanlar, T. (2017). Developing policy scenarios for sustainable urban growth management: A Delphi approach. *Sustainability*, 9(10), 1787.
- Pham, B. T., Luu, C., Van Phong, T., Nguyen, H. D., Van Le, H., Tran, T. Q. & Prakash, I. (2021). Flood risk assessment using hybrid artificial intelligence models integrated with multi-criteria decision analysis in Quang Nam Province, Vietnam. *Journal of Hydrology*, 592, 125815.
- Popelka, S., Zertuche, L., & Beroche, H. (2023). Urban AI guide. Urban AI: Paris, France.
- Samsurijan, M. S., Ebekozen, A., Azazi, N. A. N., Shaed, M. M., & Badaruddin, R. F. R. (2022). Artificial intelligence in urban services in Malaysia: a review. *PSU Research Review*, (ahead-of-print).
- Sanchez, T. W., Shumway, H., Gordner, T., & Lim, T. (2023). The prospects of artificial intelligence in urban planning. *International Journal of Urban Sciences*, 27(2), 179-194.
- Shen, J., Liu, C., Ren, Y., & Zheng, H. (2020, August). Machine learning assisted urban filling. In *Proceedings of the 25th CAADRIA Conference*, Bangkok, Thailand (pp. 5-6).
- Sideris, N., Bardis, G., Voulodimos, A., Miaoulis, G., & Ghazanfarpour, D. (2019). Using random forests on real-world city data for urban planning in a visual semantic decision support system. *Sensors*, 19(10), 2266.
- Szorenyi, A. (2024). The use of Artificial Intelligence in cities, Global cities hub, Geneva.
- Testi, I. (2021). Computer vision for urban regeneration. <https://medium.com/urban-ai/computervision-for-urban-regeneration-dca4594f6317>.
- Urban planning society of china, <https://en.planning.org.cn/planning/view?id=1449>,
- Yao, Y., Qian, C., Hong, Y., Guan, Q., Chen, J., Dai, L. & Liang, X. (2020). Delineating Mixed Urban “Jobs-Housing” Patterns at a Fine Scale by Using High Spatial Resolution Remote-Sensing Imagery. *Complexity*, 2020(1), 8018629.
- Ye, X., Wang, S., Lu, Z., Song, Y., & Yu, S. (2021). Towards an AI-driven framework for multi-scale urban flood resilience planning and design. *Computational Urban Science*, 1, 1-12.
- Yigitcanlar, T., & Teriman, S. (2015). Rethinking sustainable urban development: towards an integrated planning and development process. *International journal of environmental science and technology*, 12, 341-352.

- Yigitcanlar, T., Li, R. Y. M., Inkinen, T., & Paz, A. (2022). Public perceptions on application areas and adoption challenges of AI in urban services. *Emerging Sciences Journal*, 6(6), 1199-1236.
- Yuan, J., Wang, S., Wu, C., & Xu, Y. (2022). Fine-grained classification of urban functional zones and landscape pattern analysis using hyperspectral satellite imagery: A case study of Wuhan. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 3972-3991.
- Zou, Y., Zhang, S., & Min, Y. (2019). Exploring urban population forecasting and spatial distribution modeling with artificial intelligence technology. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 119(2), 295-310.



ارزیابی عملکرد فضای سبز شهر یزد بر اساس تحلیل ساختار سیمای سرزمین

صدیقه شربت‌دار^۱✉، پرستو پریور^۲، حمیدرضا عظیم‌زاده^۳، احد ستوده^۴، آفاق تابنده ساروی^۵

۱. کارشناس ارشد، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران. نویسنده مسئول: Sd.sharbatdar@stu.yazd.ac.ir

۲. استادیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۳. دانشیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۴. دانشیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۵. استادیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌ها: دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۵ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۱۱	روند گسترش شهری منجر به ایجاد الگوهای پیچیده‌ای از مناطق ساخته شده با تراکم کم و زیاد و تکه تکه شدن چشم‌اندازهای طبیعی شده است. تناسب ترکیب و توزیع فضایی فضاهای سبز و باز به عنوان ساختارهای اکولوژیک شهری می‌تواند بر فرایندهای آب‌وهوایی تأثیر مثبت داشته باشد. هدف از این تحقیق بررسی چگونگی وضعیت ترکیب و توزیع فضایی فضاهای سبز شهر یزد است. در این پژوهش، برای شناسایی نحوه ترکیب و توزیع پوشش گیاهی از نقشه پوشش اراضی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸-۹ استفاده شده است. با استفاده از متریک‌های سیمای سرزمین مربوط به شکل، موقعیت فضایی و اندازه، وضعیت ترکیب و توزیع فضایی پوشش سبز در منطقه مورد مطالعه، به صورت کمی مورد تحلیل قرار گرفته است. محاسبه متریک‌ها بر اساس پهنه‌های شش ضلعی پنج هکتاری در کلاس فضای سبز در پنج طبقه از کمترین تا بیشترین ارزش انجام شده است و هر متریک به صورت مجزا مورد تحلیل قرار گرفته است. به طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که فضاهای سبز در شهر یزد به شکل خوشه‌ای و با توزیع نامنظم پراکنش داشته است. همچنین در بخش‌هایی از شهر، فضای سبز به صورت لکه‌های ریزدانه با تأثیر لبه زیاد و بی‌نظم پراکنده هستند. در نتیجه، ترکیب و توزیع فضایی پوشش سبز شهر یزد، شرایط مطلوبی نداشته و در حال حاضر لکه‌های فضای سبز شهری از وسعت و پیوستگی لازم برای ارائه خدمات اکولوژیکی برخوردار نیست. از این رو، پیشنهاد می‌شود که برای بهبود وضعیت ترکیب و توزیع فضایی پوشش سبز شهر یزد و همچنین ارتقاء عملکردهای اکولوژیکی این لکه‌ها، شبکه‌ای از پوشش سبز طراحی و برنامه‌ریزی شود.

استناد: شربت‌دار، صدیقه، پریور، پرستو، عظیم‌زاده، حمیدرضا، ستوده، احد، تابنده ساروی، آفاق (۱۴۰۴). ارزیابی عملکرد فضای سبز شهر یزد براساس تحلیل ساختار سیمای سرزمین. *رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط*، ۲(۲). ۷۱-۸۴.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045643.1062>

© ۱۴۰۴ (۲۰۲۶) نویسنده‌گان مقاله، نشریه رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط، ناشر: سازمان مطالعه و تدوین کتب دانشگاهی در علوم اسلامی و انسانی (سمت).



Evaluation of the green space performance of Yazd city based on the analysis of the structure of the landscape

Sedighe Sharbatdar ^{1✉}, Parastoo Parivar ², Hamid Reza Azimzadeh ³, Ahad Sotoudeh ⁴, Afagh Tabendeh ⁵

1. Master's degree, Environment Group, School of Natural Resources & Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran.
Corresponding author: Sd.sharbatdar@stu.yazd.ac.ir
2. Assistant Professor, Environmental Group, School of Natural Resources & Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran.
3. Associate Professor, Environmental Group, School of Natural Resources & Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran.
4. Associate Professor, Environmental Group, School of Natural Resources & Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran.
5. Assistant Professor, Environmental Group, School of Natural Resources & Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran.

Article Info

History

Received: December 26, 2025

Accepted: March 02, 2026

Keywords

landscape Metrics
green space
spatial composition and configuration
hexagonal zoning
Yazd

Abstract

The process of urban expansion has led to the creation of complex patterns of built-up areas with varying densities and the fragmentation of natural landscapes. The composition and spatial distribution of green and open spaces, as urban ecological structures, can positively impact climatic processes. The aim of this study is to examine the composition and spatial distribution of green spaces in the city of Yazd. To identify the composition and distribution of vegetation cover, land cover maps derived from Landsat 8-9 satellite images were used. Using landscape metrics related to shape, spatial position, and size, the composition and spatial distribution of green cover in the study area were quantitatively analyzed. The metrics were calculated based on hexagonal grids of five-hectare areas in the green space class, categorized into five levels from lowest to highest values, and each metric was analyzed separately. Overall, the results showed that green spaces in Yazd are clustered with an irregular distribution. Additionally, in some parts of the city, green spaces are fragmented into small patches with high edge effects and irregular shapes. As a result, the composition and spatial distribution of green cover in Yazd is not optimal, and currently, urban green spaces lack the extent and connectivity necessary to provide ecological services. It is therefore recommended that a network of green spaces be designed and planned to improve the spatial composition and distribution of green cover in Yazd, as well as to enhance the ecological functions of these patches.

Citation: Sharbatdar, S., Parivar, P., Azimzadeh, H., Sotoudeh, A., & Tabendeh, A. (2025). Evaluation of the green space performance of Yazd city based on the analysis of the structure of the landscape. *Innovative Approaches in Human–Environment Studies*, 2(2), 71-84.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045643.1062>

© 2025 Authors, Innovative Approaches in Human–Environment Studies.

Publisher: The Organization for Researching and Composing University Textbooks in the Islamic Science and Humanities (SAMT)

مقدمه

گسترش شهرها و تغییر و تحول در اکوسیستم طبیعی آن‌ها با تعارض و تقابل فعالیت‌های انسانی با محیط طبیعی همراه است (محمودزاده و مسعودی، ۱۳۹۶). روند گسترش شهری منجر به ایجاد الگوهای پیچیده‌ای از مناطق ساخته‌شده با تراکم کم و زیاد و تکه‌تکه شدن چشم‌انداز طبیعی شده است. شهرنشینی هم به‌طور مستقیم با تکه‌تکه شدن زیستگاه در سیستم‌های تحت سلطه انسان و هم به‌طور غیرمستقیم با تغییر ویژگی‌های بیوفیزیکی سیمای سرزمین که منجر به انواع تأثیرات محلی و جهانی مرتبط به هم می‌شود، بر فرآیندهای اکولوژیکی تأثیرگذار است (Hutyra et al., 2011) در طول فرایند شهرنشینی لکه‌های باقی‌مانده از پوشش گیاهی طبیعی و نیمه‌طبیعی برای حمایت از جمعیت و رشد اقتصادی حذف و مورد ساخت‌وساز قرار گرفته است که این مسئله منجر به کاهش پوشش سبز در بسیاری از شهرها شده است (2017). Huang et al) به‌طور کلی، عوامل مختلفی ممکن است کم‌وبیش بر ساختار پوشش گیاهی شهرهای سراسر جهان و روشی که پوشش گیاهی خدمات اکوسیستم شهری را ارائه می‌کند، تأثیرگذار باشد. (D. R. Richards & Belcher., 2019) شهرهای اثرات مثبتی در کاهش دمای محلی بالا از طریق سایه‌اندازی و تبخیر و تعرق و همچنین در کاهش جریان باد در روزهای سرد تأثیرگذار است و آلاینده‌ها را به‌طور موثرتری نسبت به سطوح مصنوعی حذف می‌کند و سبب جذب و رسوب آلاینده‌های گازی از طریق روزنه‌ها می‌شود (Rui et al., 2019) و مزایای اکوسیستمی قابل توجهی برای حفظ محیط زیست و ارتقاء کیفیت زندگی شهروندان را فراهم می‌کند. تصفیه هوا، کاهش جزایر حرارتی شهری، ترسیب کربن، خدمات تفریحی و حفاظت از تنوع زیستی از جمله خدمات محیط زیستی فضاهای سبز شهری است که کیفیت محیط زیست شهرها را افزایش داده است و (Chen et al., 2022) جنبه‌هایی مانند «میزان فضای سبز عمومی به ازای هر ساکن»، «پارک‌های عمومی»، «مناطق تفریحی» اغلب به‌عنوان عوامل مهم برای زیست‌پذیری، دلپذیری و جذابیت شهر برای شهروندان بیان (Chiesura., 2004) شده است؛ بنابراین، نیاز به نظارت بر پوشش سبز به‌منظور ارزیابی وضعیت فعلی فضای سبز شهری وجود دارد. همچنین تعیین اهداف برای ایجاد یک برنامه مدیریت مؤثر که بتواند تنوع زیستی، ثبات اکوسیستم و رفاه انسان را در نظر بگیرد، مهم است (Kanniah., 2017). با توجه به اینکه گسترش شهرها و مناطق شهری باعث حذف پوشش گیاهی و افزایش سطوح غیرقابل نفوذ می‌شود (Hutyra et al., 2011). مدیریت شهری در راستای ایجاد تناسب در ترکیب و توزیع فضایی، فضاهای سبز و باز به‌عنوان ساختارهای اکولوژیک اهمیت دارد (پریور و همکاران، ۱۳۸۷). با توجه به مشکلات محیط زیست شهرها، پارک‌ها و چمن‌کاری کوچک و پراکنده نمی‌تواند پاسخگوی حضور پیوسته طبیعت در شهرها باشد (Burel., 2003). به‌طور کلی، پارک‌های شهری به‌عنوان فضاهای باز که عمدتاً شامل پوشش گیاهی و آب هستند و به‌طور عمومی مورد استفاده قرار می‌گیرند، تعریف شده‌اند. فضاهای سبز عمومی شهری به‌عنوان دارایی‌های منابع طبیعی مدیریت‌شده عمومی در یک شهر که شامل درختان خیابانی، پارک‌ها و مناطق طبیعی است، تعریف می‌شود و شامل فضاهای سبز خصوصی نمی‌شود (Selmi et al., 2016). اگر مناطق سبز بتوانند بر رفاه انسان تأثیر بگذارند، راهبردهای مدیریتی این فضاها ممکن است به‌طور متفاوتی بر کیفیت زندگی افراد تأثیرگذار باشد (Ayala-Azcárraga et al., 2019). استفاده از رهیافت اکولوژی سیمای سرزمین نقش گسترده و مؤثری در محیط زیست شهری داشته است (Makhdoum., 2008). علم اکولوژی سیمای سرزمین با تأکید بر ساختار و کارکردها، شهرها را به‌عنوان سیمای سرزمین نا همگن مورد بررسی قرار داده است (داز و همکاران، ۱۳۹۹). یکی از پیش‌شرط‌های مطالعه کارکرد و تغییر سیمای سرزمین، کمی‌سازی ساختار سیمای سرزمین است و متریک‌های مختلفی با توجه به اکولوژی سیمای سرزمین تدوین شده‌اند (McGarigal., 1995). متریک‌ها شکل، هندسه و ماهیت توزیع و پراکنش اجزای ساختاری در سرزمین را کمی و قابل مقایسه با اعداد و ارقام کرده است. همچنین با استفاده از مبانی اکولوژی، ابزار مناسبی برای تحلیل و برنامه‌ریزی سیمای سرزمین و کاربری‌های مختلف فراهم شده است (پریور و همکاران، ۱۳۸۸). از جمله

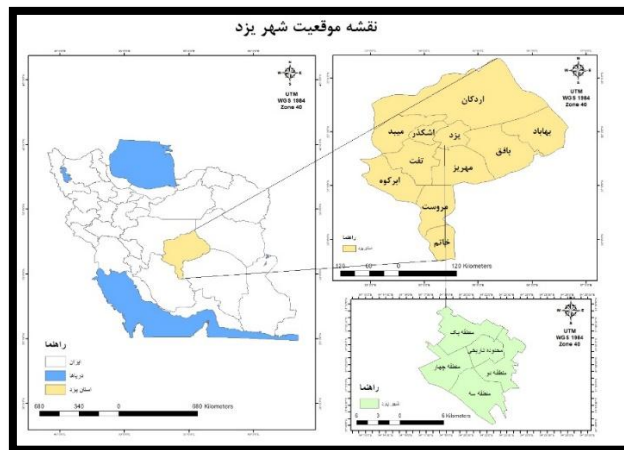
تحقیقات انجام شده در زمینه پژوهش حاضر می‌توان به پژوهش نوحه گر و همکاران (۱۳۹۴) اشاره کرد که به منظور تحلیل کاربری سرزمین در بخش‌های مرکزی گیلان از رویکرد اکولوژی سیمای سرزمین استفاده کردند و دریافتند که لکه‌های انسان ساخت افزایش یافته و سبب کاهش کاربری جنگل و بیشه‌زار شده‌است. همچنین، پیوستگی سیمای سرزمین به دلیل تنوع در کاربری‌ها کاهش یافته‌است. محمودزاده و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای تغییرات ساختاری سیمای سرزمین کلان‌شهر تبریز را با استفاده از مبانی اکولوژی سیمای سرزمین مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که اراضی مورد ساخت‌وساز رو به افزایش و اراضی کشاورزی، باغات و فضای سبز کاهش یافته‌است. همچنین تحلیل متریک‌های سیمای سرزمین حاکی از آن است که شهر تبریز به مرور ریزدانه‌تر، پیچیده‌تر و از نظر شکل هندسی نامنظم‌تر و از هم گسیخته‌تر شده‌است. لاریجانی و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهشی با عنوان تحلیل اکولوژیک ساختار فضای سبز شهر جیرفت با استفاده از متریک‌های سیمای سرزمین نشان دادند که فضای سبز در سه پهنه از شهر جیرفت از ترکیب و توزیع نامناسب برخوردار بوده و دچار خرددانه‌گی و از هم گسیخته‌گی شده‌است.

ساختار سیمای سرزمین شهر یزد طی دهه‌های اخیر به دلیل رشد نامتوازن، دچار آسیب‌های متعددی شده‌است (عباس‌زادگان، ۱۳۸۷)؛ به‌طوری‌که باغات و فضاهای سبز و باز در این شهر در حال خرد شدن و محوشدن هستند. شهر یزد با اقلیم گرم و خشک بیابانی همواره در معرض طوفان‌های گردوغبار قرار دارد. غالب بودن پدیده وزش باد در طول سال، وقوع خشکسالی‌های گسترده، تغییر کاربری و رهاسازی اراضی، همچنین تغییرات جوی، بر شدت اثرات منفی باد به‌صورت فرسایش بادی و شکل‌گیری طوفان‌های گردوغبار افزوده‌است (قایمی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۶). با توجه به این مسئله که پوشش گیاهی، با تغییر زبری سطح، رطوبت خاک، ظرفیت ذخیره‌سازی و سرعت آستانه فرسایش بادی بر کیفیت هوا تأثیر گذار است (Ebrahimi-Khusfi et al., 2021). همچنین پوشش گیاهی می‌تواند به‌طور مؤثر کیفیت هوا را با کاهش آلودگی ناشی از ذرات معلق، از طریق مقاومت در برابر گردوغبار، حفظ کند و با کاهش گردوغبار، کیفیت هوا را بهبود بخشد (Wei et al., 2020). بنابراین، ویژگی‌های ترکیب و توزیع فضایی لکه‌های سبز اهمیت دارد. با توجه به موقعیت جغرافیایی و اقلیم شهر یزد این شهر تحت تأثیر آلودگی ناشی از گردوغبار و ذرات معلق ناشی از آلودگی‌های صنعتی می‌باشد بنابراین ترکیب و توزیع فضایی پوشش سبز در این شهر می‌تواند در جذب آلودگی و بهبود کیفیت محیط زیست شهری مؤثر باشد. بنابراین سوال این پژوهش این است که آیا وضعیت ترکیب و توزیع فضایی پوشش سبز در شهر یزد برای پاسخ‌گویی به نیازهای اکولوژیکی مناسب است؟ از این رو، در پژوهش حاضر هدف تعیین وضعیت ترکیب و توزیع فضایی پوشش سبز و ساختار سیمای سرزمین به‌صورت کمی توسط متریک‌های سیمای سرزمین است.

روش پژوهش

معرفی منطقه مورد مطالعه

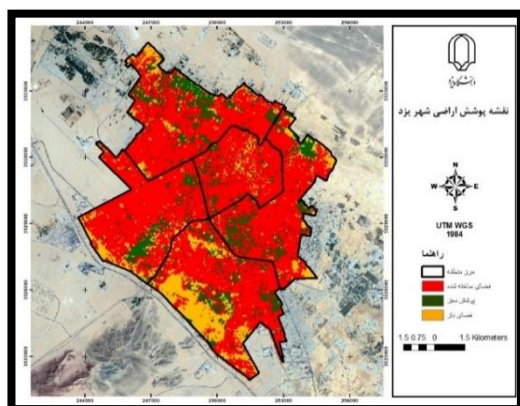
شهر یزد بین دو رشته کوه شیرکوه و خرانق و در ارتفاع ۱۲۰۰ متری از سطح دریا قرار گرفته‌است (شمس‌الدینی و همکاران، ۱۳۹۴). این شهر با وسعتی بالغ بر ۱۳۶/۳۷ کیلومترمربع، در عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۵۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۲۶ دقیقه شرقی واقع است (سلطانی گردفرامرزی، ۱۳۹۹). بر اساس طبقه‌بندی اصلاح شده دو ماراتن، شهر یزد دارای اقلیم فراخشک تا خشک سرد است (جبال‌ی و همکاران، ۱۳۹۸). آب‌وهوای شهر یزد تحت تأثیر شرایط اقلیمی بیابانی و نیمه‌بیابانی، دارای تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد و خشک است (انتظاری و همکاران، ۱۳۹۹). این شهر به دلیل ناهنجاری‌های اقلیمی مانند کاهش میزان بارش، افزایش دما، موقعیت جغرافیایی و وجود اراضی بیابانی همواره در معرض فرسایش بادی و طوفان‌های گردوغبار قرار دارد (میراکبری و همکاران، ۱۳۹۶). نقشه شماره ۱ موقعیت شهر یزد در ایران را نمایش می‌دهد.



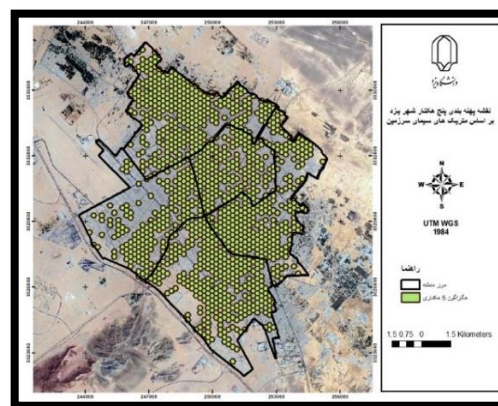
نقشه شماره ۱ منطقه مورد مطالعه شهر یزد (منبع: یافته‌های تحقیق)

تهیه نقشه پوشش اراضی و پهنه بندی شهر یزد

نقشه پوشش اراضی با توجه به هدف تحقیق در سه طبقه سبز، باز و ساخته شده از تصویر ماهواره‌ای ETM و لندست ۸-۹ سال ۲۰۲۲ توسط سنجنده TM تهیه شد. از نقشه‌های پوشش اراضی تهیه شده برای تهیه نقشه پهنه‌بندی شهر یزد استفاده شده است. پس از تهیه تصویر ماهواره‌ای، به منظور آماده‌سازی داده‌ها جهت پردازش و استخراج اطلاعات مفید، عملیات تطابق هندسی با استفاده از نرم‌افزار ERDAS 2015 انجام گرفت. تصحیح طیفی تصاویر به منظور بارز ساختن پدیده‌ها و بالابردن سطح کیفی تصاویر و حذف تأثیرات نامطلوب نور و اتمسفر در تصاویر صورت پذیرفت. نقشه شماره ۲ پوشش اراضی شهر یزد را نشان می‌دهد. در این پژوهش، شش ضلعی‌های پنج هکتاری برای پهنه‌بندی متریک‌ها در کلاس فضای سبز بر اساس نقشه پوشش اراضی حاصل از تصویر ماهواره‌ای و در نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰٫۸ با استفاده از افزونه Patch Analyst و Spatial statistic (by region) ایجاد گردید. در نقشه شماره ۳ پهنه‌بندی پنج هکتار شهر یزد نشان داده شده است. اندازه شش ضلعی‌ها با توجه به کیفیت داده‌ها، دقت و هدف از بررسی انتخاب شده است (White et al., 1992).



نقشه شماره ۲ پوشش اراضی شهر یزد (منبع: یافته‌های تحقیق)



نقشه شماره ۳ پهنه‌بندی پنج هکتار شهر یزد بر اساس متریک‌های سیمای سرزمین (منبع: یافته‌های تحقیق)

جدول مشخصات متریک‌های سیمای سرزمین

جدول شماره ۱ مشخصات متریک‌های سیمای سرزمین (McGarigal et al., 2012; Gustafson, 1998)

متریک‌های سیمای سرزمین	نام فارسی متریک	تعریف
AWMSI	Area Weighted Mean Shape Index	برای ارزیابی پیچیدگی شکل لکه‌ها در یک کلاس یا نوع خاص از پوشش زمینی استفاده می‌شود.
TCA	Total Core Area	این متریک به بررسی مساحت کل نواحی هسته‌ای (core areas) در یک منطقه خاص می‌پردازد. این شاخص می‌تواند به ارزیابی کیفیت زیستگاه‌ها و پتانسیل پشتیبانی از گونه‌های حساس به تأثیرات لبه‌ای کمک کند.
CAD	Core Area Density	توزیع و پراکندگی نواحی هسته‌ای در یک منطقه خاص با استفاده از این متریک اندازه‌گیری می‌شود. معمولاً این متریک به صورت واحد سطح بیان می‌شود. مقدار بالای CAD نشان‌دهنده تراکم بالای نواحی هسته‌ای در منطقه است.
MPS	Mean Patch Size	به بررسی میانگین اندازه لکه‌ها در یک منطقه خاص می‌پردازد. این شاخص می‌تواند اطلاعاتی درباره پویایی اکوسیستم و تنوع زیستی منطقه ارائه دهد.
ED	Edge Density	به بررسی طول کل لبه‌های بین لکه‌ها در یک منطقه مشخص می‌پردازد. این شاخص، اطلاعاتی درباره پیچیدگی و پراکندگی مرزهای بین لکه‌ها ارائه می‌دهد. مقدار بالای ED نشان‌دهنده تعداد زیاد و طول کل بالای مرزها در سیمای سرزمین است.
IJI	Interspersion Juxtaposition Index	میزان پراکندگی، هم‌جواری و توزیع یکنواخت لکه‌های مختلف در سیمای سرزمین را نشان می‌دهد. شاخص IJI به صورت درصدی بیان می‌شود و از صفر (حداقل تداخل) تا صد (حداکثر تداخل) متغیر است. مقدار بالای IJI نشان‌دهنده توزیع یکنواخت‌تر و پراکندگی بیشتر لکه‌ها در سیمای سرزمین است.
LPI	Largest Patch Index	به بررسی اندازه بزرگ‌ترین لکه در یک منطقه خاص می‌پردازد و به صورت درصدی بیان می‌شود و نسبت مساحت بزرگ‌ترین لکه به کل مساحت سیمای سرزمین را نشان می‌دهد.
NUMP	Number of Patches	این متریک برای تحلیل ساختار و تنوع سیمای سرزمین و ارزیابی درجه تکه‌تکه‌شدن و پراکندگی انواع مختلف پوشش‌های زمین استفاده می‌شود.
CA	Class Area	به طور خاص بر مساحت کل هر کلاس (نوع) از پوشش زمینی در یک منظر تمرکز دارد. در واقع، این متریک اندازه‌گیری می‌کند که هر نوع پوشش یا کاربری زمین در یک منطقه خاص چه مقدار فضا را اشغال می‌کند.
PSCOVE	Patch Size Coefficient of Variance	این متریک میزان تغییرات اندازه لکه‌ها را در یک منطقه خاص نشان می‌دهد و به تحلیل ناهمگونی و تنوع اندازه لکه‌ها کمک می‌کند. ضریب تغییرات اندازه لکه (PSCOVE) به صورت درصدی بیان می‌شود.

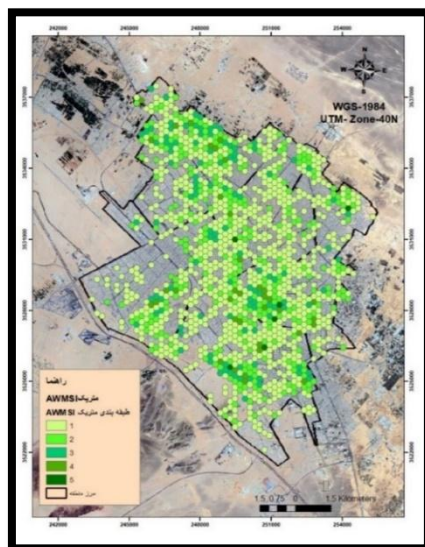
نتایج

متریک‌های سیمای سرزمین در ارزیابی فضاهای سبز شهر یزد

ترکیب و توزیع پوشش سبز در شهر یزد بر اساس متریک‌های سیمای سرزمین شامل TCA, LPI, IJI, ED, CA, AWMSI, NUMP و PSCOVE محاسبه شده است. هر کدام از این متریک‌ها در پنج طبقه مورد طبقه‌بندی و تفسیر قرار گرفته است.

تحلیل متریک AWMSI فضاهای سبز شهر یزد

با توجه به اینکه متریک AWMSI پیچیدگی شکل لکه را نشان می‌دهد و بر اساس مساحت لکه وزن‌گذاری می‌شود، بنابراین لکه‌های بزرگ‌تر وزن بیشتری نسبت به لکه‌های کوچک‌تر دارند. نقشه شماره ۴ پهنه‌بندی متریک AWMSI را نشان می‌دهد.

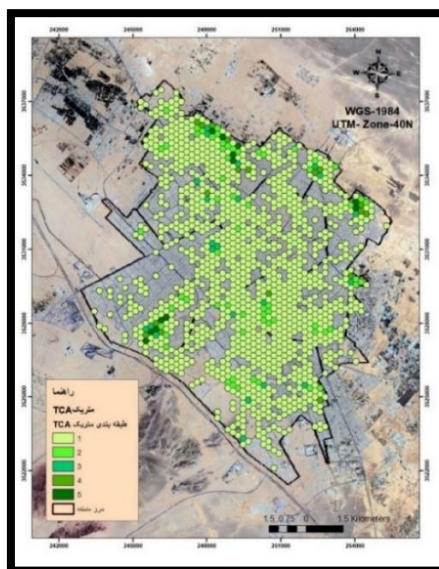


نقشه شماره ۴ پهنه‌بندی متریک AWMSI (منبع: یافته‌های تحقیق)

بر این اساس، پهنه‌هایی که در شمال شهر یزد و همچنین در مرکز، شامل محدوده‌ای در حوالی پارک شادی واقع در منطقه ۲ شهرداری یزد و در محدوده دانشگاه یزد و پارک آزادگان واقع شده‌اند، این شاخص در حداکثر مقدار خود قرار دارد که نشان می‌دهد در این محدوده‌ها لکه‌های سبز بزرگ‌تر و شکل لکه‌ها بی‌نظمی بیشتری داشته است.

تحلیل متریک TCA فضاهای سبز شهر یزد

متریک TCA مربوط به مساحت هسته است که مجموع مساحت‌های هسته در تمامی لکه‌های موجود در یک سیمای سرزمین را محاسبه می‌کند. این متریک زمانی ارزش بزرگ‌تری را نشان می‌دهد که لکه بزرگ و شکل نسبتاً فشرده‌ای داشته باشد و تأثیر لکه کمتر باشد و همچنین تجمع لکه‌ها از نظر توزیع فضایی حداکثر باشد.

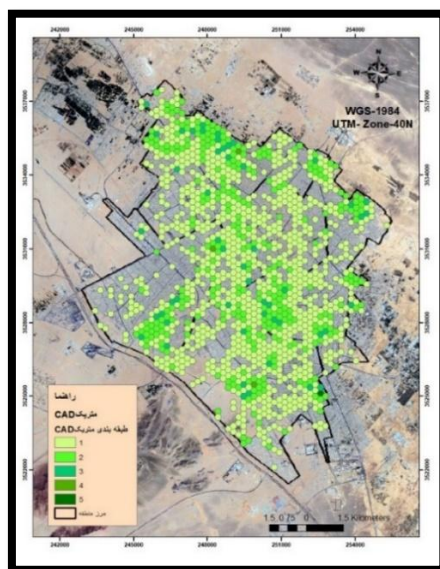


نقشه شماره ۵ پهنه‌بندی متریک TCA (منبع: یافته‌های تحقیق)

همان‌گونه که در نقشه شماره ۵ نشان داده شده‌است، چنین شرایطی، یعنی TCA بیشتر، در پهنه‌های محدودی فقط در بخشی از شمال یزد و به صورت پراکنده در محدوده پارک‌های بزرگ شهر یزد، مانند پارک آزادگان و پارک شادی، دیده شده‌است.

تحلیل متریک CAD فضاهای سبز شهر یزد

این متریک تعداد یا تراکم چگالی نواحی یا مناطق هسته را در سطح لکه، کلاس یا سیمای سرزمین نشان می‌دهد. در این مطالعه، سطح کلاس برای اندازه‌گیری این متریک انتخاب شده است؛ یعنی درصدی از طبقه فضای سبز که از هسته لکه‌ها تشکیل شده است. با توجه به اینکه این شاخص بر اساس نسبت مساحت لبه به داخل لکه محاسبه می‌شود، به‌نوعی شکل لکه را نشان می‌دهد.

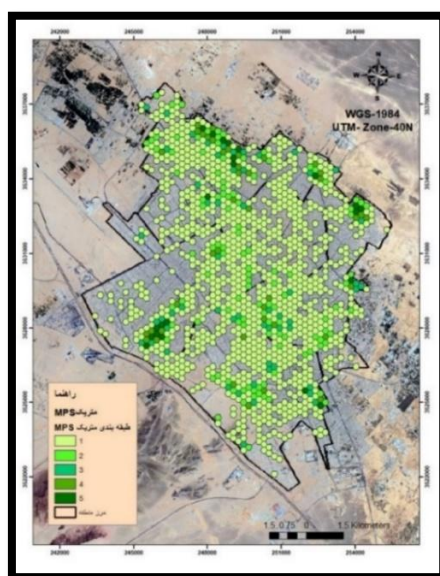


نقشه شماره ۶ پهنه‌بندی متریک CAD (منبع: یافته‌های تحقیق)

همان‌گونه که در نقشه شماره ۶ نشان داده شده است، در شهر یزد، در پهنه‌های بسیار محدودی مانند محدوده‌هایی از شمال شهر و پهنه‌های مرکزی در محدوده پارک شادی، این متریک بالاترین ارزش را نشان داده است.

تحلیل متریک MPS فضاهای سبز شهر یزد

متریک MPS متوسط اندازه لکه‌های سبز را در شهر یزد نشان می‌دهد. نقشه شماره ۷ پهنه‌بندی متریک MPS را نشان می‌دهد.

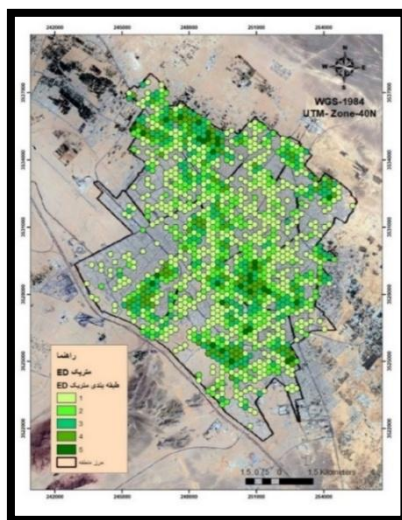


نقشه شماره ۷ پهنه‌بندی متریک MPS (منبع: یافته‌های تحقیق)

همان‌طور که در نقشه شماره ۷ نشان داده شده است، متریک متوسط اندازه لکه در محدوده‌هایی از شمال یزد و شمال غربی بیشترین ارزش را نشان می‌دهد. این به معنای آن است که فقط در این محدوده‌ها، متوسط اندازه لکه‌های فضای سبز زیاد است و لکه‌های فضای سبز درشت‌دانه هستند. در مقابل، در بیشتر مناطق شهر یزد، پوشش سبز ریزدانه است.

تحلیل متریک ED فضاهای سبز شهر یزد

متریک ED تراکم لکه در ارتباط با لکه‌های سبز و میزان آسیب‌پذیری لکه‌ها را در شهر یزد بیان می‌کند. نقشه شماره ۸ پهنه‌بندی متریک ED را نشان می‌دهد.

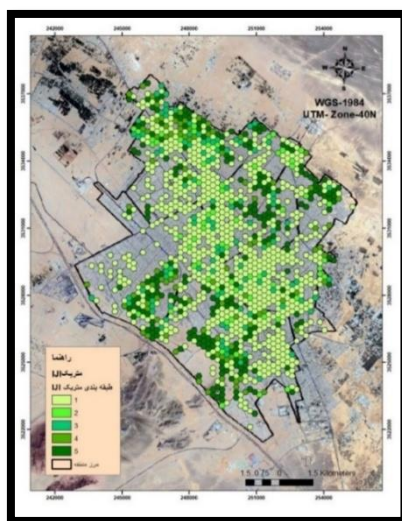


نقشه شماره ۸ پهنه‌بندی متریک ED (منبع: یافته‌های تحقیق)

همان‌طور که در نقشه شماره ۸ نشان داده شده است، متریک تراکم لکه در تمامی پهنه‌هایی که در شهر یزد پوشش سبز وجود دارد، در یک دامنه یا طیف متوسط به بالا دیده می‌شود. این نشان می‌دهد که تراکم لکه در طبقه فضای سبز زیاد است؛ بنابراین، تأثیر لکه می‌تواند آسیب‌پذیری فضای سبز شهری در شهر یزد را افزایش دهد.

تحلیل متریک IJI فضاهای سبز شهر یزد

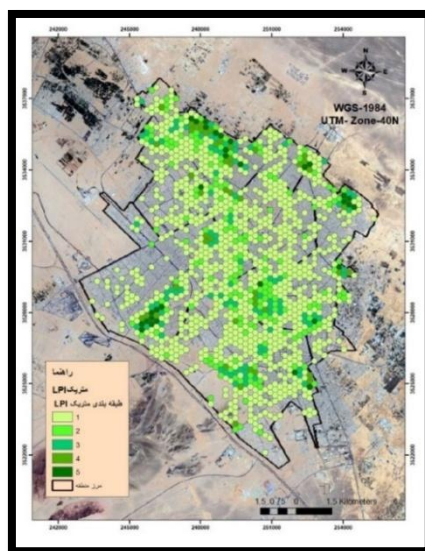
این متریک میزان و نحوه پراکندگی لکه‌های سبز را نشان می‌دهد. هرچه میزان یکنواختی و نظم در پراکندگی لکه‌ها بیشتر باشد، این متریک ارزش عددی بالاتری را نشان می‌دهد. نقشه شماره ۹ پهنه‌بندی متریک IJI را نشان می‌دهد.



نقشه شماره ۹ پهنه‌بندی متریک IJI (منبع: یافته‌های تحقیق)

با توجه به نقشه شماره ۹، در محدوده‌هایی از شهر یزد، به‌ویژه در شمال و جنوب غربی شهر، ارزش این متریک نسبت به سایر محدوده‌ها بیشتر بوده است.

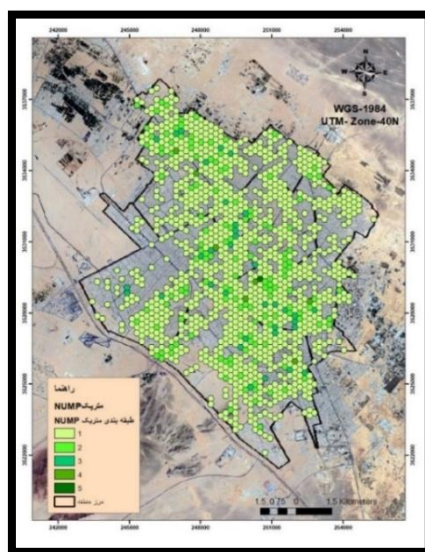
تحلیل متریک **LPI** فضاهای سبز شهر یزد
متریک **LPI** در طبقه متریک‌هایی قرار دارد که توزیع فضایی یک سیمای سرزمین را نشان می‌دهد. بر اساس این متریک، درصدی از کل سیمای سرزمین که توسط بزرگ‌ترین لکه فضای سبز اشغال شده است، محاسبه می‌شود.



نقشه شماره ۱۰ پهنه‌بندی متریک **LPI** (منبع: یافته‌های تحقیق)

نقشه شماره ۱۰ پهنه‌بندی متریک **LPI** را نشان می‌دهد. با توجه به این که لکه‌های فضای سبز در شهر یزد ریزدانه هستند، در پهنه‌های محدودی، به‌ویژه در شمال و جنوب غربی، ارزش عددی این متریک نسبتاً بالا است.

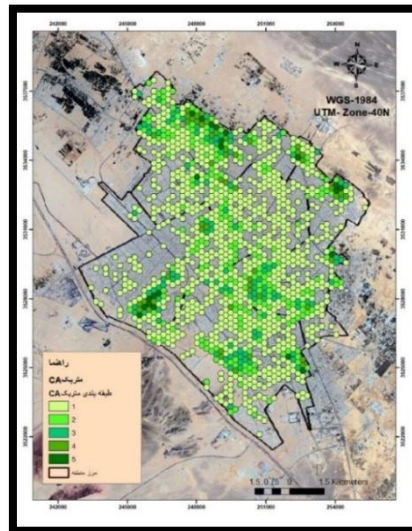
تحلیل متریک **NUMP** فضاهای سبز شهر یزد
همان‌طور که در نقشه پهنه‌بندی متریک **NUMP** نشان داده شده است، متریک تعداد لکه در شهر یزد در تمامی پهنه‌هایی که پوشش سبز پراکندگی دارد، حداکثر مقدار را نشان می‌دهد.



نقشه شماره ۱۱ پهنه‌بندی متریک **NUMP** (منبع: یافته‌های تحقیق)

همان‌طور که نقشه شماره ۱۱ پهنه‌بندی متریک NUMP را نشان می‌دهد. با توجه به این متریک و تحلیل آن با سایر متریک‌ها، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که فضای سبز در شهر یزد خرددانه و پراکنده است.

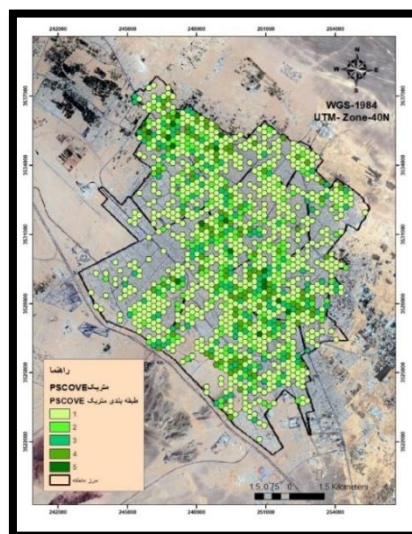
تحلیل متریک CA فضاهای سبز شهر یزد
این متریک مساحت هر نوع پوشش یا کاربری زمین که در یک سیمای سرزمین اشغال می‌شود را محاسبه می‌کند.



نقشه شماره ۱۲ پهنه‌بندی متریک CA (منبع: یافته‌های تحقیق)

همان‌طور که در نقشه شماره ۱۲ پهنه‌بندی متریک CA نشان داده شده است، در محدوده‌هایی از شمال، جنوب غربی، شمال شرق و پهنه‌های محدودی از مرکز، مجموعه مساحت لکه‌های سبز بیشتر است. اما در بیشتر مناطق در محدوده مرز یزد، فضای سبز یا اصلاً وجود ندارد یا مجموعه مساحت پایینی دارد.

تحلیل متریک PSCOVE فضاهای سبز شهر یزد
همان‌طور که در نقشه شماره ۱۳ نشان داده شده است، میزان تنوع اندازه لکه‌ها نسبت به متوسط اندازه آن‌ها در پهنه‌های دارای پوشش سبز، متوسط به بالا است؛ یعنی از نظر شاخص اندازه، لکه‌های سبز تنوع و عدم یکنواختی قابل توجهی دارند.



نقشه شماره ۱۳ پهنه‌بندی متریک PSCOVE (منبع: یافته‌های تحقیق)

با تفسیر این متریک در کنار متریک MPS، می توان دریافت که پوشش سبز در بیشتر مناطق شهر یزد ریزدانه است ولی اندازه های متنوعی دارد.

جمع بندی تحلیل ساختار فضاهای سبز شهر یزد

پوشش سبز در شهر یزد از توزیع یا پراکنش یکنواخت برخوردار نبوده است، به این معنی که بسیاری از مناطق در شهر یزد خالی از فضاهای سبز هستند. در محدوده هایی که فضای سبز وجود دارد، این لکه ها ریزدانه، با تأثیر لبه زیاد و با بی نظمی شکلی پراکنده اند؛ بنابراین، از نظر ترکیب و توزیع فضایی، وضعیت مطلوبی ندارد. نتایج تحلیل متریک های سیمای سرزمین در جدول شماره ۲ نشان داده شده است.

جدول شماره ۲ نتایج تحلیل متریک های سیمای سرزمین (منبع: یافته های تحقیق)

نام متریک	نتایج
AWMSI	تحلیل این شاخص در مناطق شمال و مرکز یزد (محدوده پارک شادی و دانشگاه یزد)، و پارک آزادگان نشان می دهد که این مناطق دارای لکه های سبز بزرگ و با شکل های پیچیده و نامنظم هستند.
TCA	مجموع مساحت هسته ها در تمامی لکه های موجود در یک سیمای سرزمین را محاسبه می کند و زمانی ارزش بالاتری دارد که لکه ها بزرگ، با شکل فشرده و با تأثیر کمتر از لبه ها باشند، و تجمع لکه ها از نظر توزیع فضایی بالا باشد. مناطق با TCA بیشتر فقط در بخش هایی از شمال یزد و به طور پراکنده در پارک های بزرگ شهر یزد مانند پارک آزادگان و پارک شادی مشاهده شده است.
CAD	این شاخص بر اساس نسبت مساحت لبه به داخل لکه محاسبه می شود و به نوعی شکل لکه را نشان می دهد. در شهر یزد، بالاترین ارزش های این متریک در پهنه های محدودی مانند شمال شهر و در محدوده پارک شادی مشاهده شده است.
MPS	در شمال یزد و شمال غربی بیشترین ارزش این متریک مشاهده می شود، به این معنا که در این مناطق، متوسط اندازه لکه های فضای سبز بزرگ است و لکه های سبز درشت دانه اند. در مقابل، در بیشتر مناطق دیگر شهر یزد، پوشش سبز ریزدانه بوده است.
ED	در مناطق دارای پوشش سبز در شهر یزد این متریک در دامنه ای متوسط به بالا مشاهده می شود که نشان دهنده تراکم بالای لبه ها در فضاهای سبز است. این وضعیت می تواند به افزایش آسیب پذیری فضای سبز شهری در یزد منجر شود. به عبارت دیگر، وجود تراکم بالای لبه ها در فضاهای سبز می تواند خطراتی برای این فضاها ایجاد کند.
IJI	میزان و نحوه توزیع لکه های سبز در شهر یزد را بررسی می کند. هرچه پراکندگی و نظم در این لکه ها بیشتر باشد، مقدار این متریک بالاتر خواهد بود. به طور خاص، در محدوده های شمال و جنوب غربی شهر یزد، ارزش این متریک نسبت به سایر نواحی بیشتر است.
LPI	به بررسی توزیع فضایی سیمای سرزمین می پردازد و درصد مساحت کل که توسط بزرگ ترین لکه فضای سبز اشغال شده را محاسبه می کند. در شهر یزد، با توجه به ریزدانه بودن لکه های فضای سبز، تنها در نواحی خاصی، عمدتاً در شمال و جنوب غربی، ارزش عددی این متریک نسبتاً بالا است.
NUMP	در تمامی مناطق دارای پوشش سبز در شهر یزد، این متریک حداکثر مقدار را نشان می دهد. این وضعیت، به همراه تحلیل های سایر متریک ها، نشان می دهد که فضای سبز در شهر یزد خرددانه و پراکنده است.
CA	در محدوده های شمال، جنوب غربی، شمال شرق، و برخی پهنه های محدود مرکز شهر یزد، مساحت لکه های سبز بیشتر است. با این حال، در اکثر مناطق مرزی یزد فضای سبز یا وجود ندارد یا مساحت آن بسیار کم است.
PSCOVE	میزان تنوع اندازه لکه های سبز نسبت به متوسط اندازه آنها در پهنه های دارای پوشش سبز، متوسط به بالا است. این بدان معناست که لکه های سبز از نظر اندازه، تنوع و به صورت غیر یکنواخت است. با تفسیر این متریک در کنار متریک MPS، می توان نتیجه گرفت که پوشش سبز در بیشتر مناطق شهر یزد ریزدانه ولی با اندازه های متنوع است.

بحث و نتیجه گیری

ویژگی های اقلیمی می تواند اهمیت زیادی در کارکرد فضاهای سبز شهری داشته باشد. در کارایی پوشش سبز شهری ویژگی های ترکیب و توزیع فضایی لکه های سبز مؤثر است. هرچند که در ارتباط با تأثیر پوشش سبز بر کاهش آلاینده

ذرات معلق می‌توان چنین نتیجه گرفت که توزیع فضایی لکه‌های سبز شهری اهمیت بیشتری نسبت به ویژگی‌های ترکیب لکه‌های سبز داشته‌است. در مقاله‌ای با عنوان «بررسی روند تغییرات فضای سبز در سه دهه گذشته با استفاده از سنجش از دور در شهر یزد» تغییرات فضای سبز روند کاهشی داشته‌است. همچنین پیشنهاد شد نسبت به معیارهای مکان‌یابی در برنامه‌ریزی اراضی (سه عامل سازگاری، آسایش، مطلوبیت، سلامتی و استانداردهای ایمنی توجه شود که نتایج این تحقیق با پژوهش حاضر مطابقت داشته‌است (زاده و همکاران، ۱۳۹۶). در پژوهشی با عنوان «کاربرد سنجش از دور در ارزیابی ساختار سیمای سرزمین شهری مناطق خشک در مطالعه شهر یزد» کاهش پوشش گیاهی و افزایش ساخت‌وساز شهری را دریافت. همچنین افزایش تعداد لکه نشانه تجزیه و کاهش پیوستگی است و کاهش میانگین مساحت بیانگر تخریب و از هم گسستگی پوشش گیاهی که در اثر ساخت‌وساز، تغییر کاربری کشاورزی و باغداری به مناطق مسکونی و زیرساخت‌های شهری و تأثیر خشکسالی بوده‌است (ابوالحسنی و همکاران، ۱۳۹۹). اما تاکنون پژوهش در زمینه بررسی و تحلیل ترکیب و توزیع پوششی سبز شهر یزد با استفاده از متریک‌های سیمای سرزمین انجام نشده است. بنابراین نتایج پژوهش حاضر نشان داد که پوشش سبز برای کارایی بیشتر در کاهش ذرات معلق باید از توزیع فضایی منظم، گسترده و یکنواخت برخوردار باشد. توزیع فضایی به شکل خوشه‌ای برای پوشش سبز، عملکرد آن را در کاهش آلودگی ذرات معلق کاهش می‌دهد. همچنین لکه‌های کوچک و پراکنده فضاهای سبز شهری نقشی در کاهش آلاینده ذرات معلق نداشته‌است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به حجم و فراوانی پدیده ریزگرد در شهر یزد، فضاهای سبز در این منطقه که به شکل خوشه‌ای و با توزیع نامنظم، سهم اندکی در کاهش اثرات منفی ناشی از پدیده گرد و غبار داشته‌است. از سوی دیگر با توجه به نوع گونه‌های گیاهی و تراکم پوشش سبز در شهر یزد با توجه به اقلیم خشک در این شهر، نمی‌توان عملکرد فضای سبز این شهر را با شهرهایی با اقلیم نیمه خشک و مرطوب مقایسه کرد. با توجه به نتایج پژوهش، فضای سبز در شهر یزد باید توزیع یکنواخت و نظم در پراکنش داشته‌باشد؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود مکان‌یابی فضای سبز به صورتی انجام شود که پیوستگی فضای سبز در سراسر شهر یزد حفظ شود.

مراجع

- ابوالحسنی؛ ستوده، پریور؛ پرستو. (۱۳۹۹). کاربرد سنجش‌ازدور در ارزیابی ساختار سیمای سرزمین شهری مناطق خشک (مطالعه موردی: شهر یزد، ایران). سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۴(۳)، ۲۲.
- انتظاری، علیرضا، میوانه، فاطمه، و خزاعی نژاد، فروغ. (۱۳۹۹). استراتژی‌های طراحی در معماری همساز با اقلیم مطالعه موردی: شهر یزد. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، ۲۰(۵۶)، ۲۲۳-۲۴۰. <https://sid.ir/paper/375121/fa240-223>. SID.
- پریور؛ پرستو، یآوری؛ رضا، ستوده؛ احد. (۱۳۸۷). تحلیل تغییرات زمانی و توزیع مکانی فضاهای سبز شهری تهران در مقیاس سیمای سرزمین. محیط‌شناسی، ۳۴(۴۵).
- پریور؛ پرستو، یآوری؛ رضا، فریادی؛ شهرزاد، ستوده؛ احد. (۱۳۸۸). تحلیل ساختار اکولوژیک سیمای سرزمین شهر تهران برای تدوین راهکارهای ارتقای کیفیت محیط‌زیست. محیط‌شناسی، ۳۵(۵۰).
- جبال؛ عاطفه، زارع؛ محمد، اختصاصی؛ محمد رضا، جعفری؛ رضا. (۱۳۹۸). بررسی گستره تغییرپذیری دید افقی مناطق متأثر از رخدادهای گردوغبار در استان یزد. مدیریت بیابان، ۸(۱۵)، ۲۱-۳۶.
- داز؛ بی‌بی سارا، غفاری گیلانده؛ عطا، عزیزی؛ علی. (۱۳۹۹). تحلیل تغییرات فضای سبز شهر گرگان با استفاده از متریک‌های سیمای سرزمین. خوانین زاده؛ علیرضا، سرباز؛ محمد، احمدیان؛ شادی. (۱۳۹۶). بررسی روند تغییرات فضای سبز در سه دهه گذشته با استفاده از سنجش از دور (مطالعه موردی: شهر یزد). جغرافیا و توسعه فضای شهری، ۴(۲)، ۹۹-۱۱۵.
- سلطانی گردفرامری؛ سمیه، قاسمی؛ محسن، قانعی بافقی؛ محمد جواد. (۱۳۹۹). تغییرات مکانی و زمانی نرخ فرونشست گرد و غبار شهر یزد و ارتباط آن با برخی پارامترهای اقلیمی. نشریه محیط زیست طبیعی، ۷۳(۴)، ۷۱۴-۷۰۱.
- شمس‌الدینی؛ علی، رستمی؛ منا، رستمی؛ مارال. (۱۳۹۴). تحلیل استراتژی‌های مؤثر بر نوسازی و بهسازی بافت تاریخی شهر یزد با استفاده از تکنیک SWOT. جغرافیای اجتماعی شهری، ۵(۲)، ۶۱-۷۸.

عباس‌زادگان؛ مصطفی، رستم یزدی؛ بهمن. (۱۳۸۷). بهره‌گیری از رشد هوشمندانه در ساماندهی رشد پراکنده شهرها. فناوری آموزش (فناوری و آموزش)، ۳(۱)، ۳۳-۴۸. SID. <https://sid.ir/paper/155548/fa>.

قایمی‌نیا؛ علی محمد، حکیم زاده اردکانی؛ محمدعلی، تقی‌زاده مهرجردی؛ روح‌الله، دهقانی؛ فرهاد. (۱۳۹۶). بررسی میزان نمک‌های محلول در گرد و غبار رسوب یافته شمال دشت یزد اردکان، *مجله علمی پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۷(۲۰)، ۴۴-۳۳.

لاریجانی؛ مریم، قسامی؛ فاطمه، یوسفی رویات؛ الهام. (۱۳۹۳). تحلیل اکولوژیک ساختار فضای سبز شهر جیرفت با استفاده از متریک‌های سیمای سرزمین. *آمایش محیط*، ۷(۲۵)، ۴۹-۶۴. SID. <https://sid.ir/paper/130612/fa>.

محمودزاده، حسن، مسعودی؛ حسن. (۱۳۹۶). اکولوژی شهری و شهرسازی اکولوژیک (بررسی مفاهیم، کارکردها و ارائه راهکارها) همایش ملی شهر سبز با محوریت تکنولوژی و انرژی‌های پاک در عمران، معماری و شهرسازی، <https://civilica.com/doc/755106>.

محمودزاده؛ حسن، مسعودی؛ حسن. (۱۳۹۸). تحلیلی بر تغییرات ساختاری سیمای سرزمین کلان‌شهر تبریز با استفاده از مبانی اکولوژی سیمای سرزمین و با تأکید بر مفهوم پیوستگی. *آمایش سرزمین*، ۱۱(۲)، ۱۷۹-۲۰۴. SID <https://sid.ir/paper/377595/fa>.

میراکبری؛ مریم، مصباح‌زاده؛ طیبه، محسنی ساروی؛ محسن. (۱۳۹۶). تحلیل دومتغیره دوره بازگشت توفان گردوغبار بر اساس تئوری کاپولا در استان یزد. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۲(۴۰)، ۱۱۵-۱۲۴.

نوحه‌گر؛ احمد، جباریان امیری؛ بهمن، افراخته؛ روشنک. (۱۳۹۴). تحلیل کاربری سرزمین در بخش مرکزی گیلان با رویکرد اکولوژی سیمای سرزمین. *جغرافیا و آمایش شهری - منطقه‌ای*، ۵(۱۵)، ۱۹۷-۲۱۳. SID. <https://sid.ir/paper/236733/fa>.

Ayala-Azcárraga, Cristina; Diaz, Daniel & Zambrano, Luis. (2019). Characteristics of urban parks and their relation to user well-being. *Landscape and urban planning*, ۱۸۹, ۲۷-۳۵.

Burel, Françoise. (2003). *Landscape ecology: concepts, methods, and applications*. CRC Press.

Chen, Yuanyuan; Ke, Xinli; Min, Yue; Dai, Yaqiang & Tang, Lanping. (2022). Do we need more urban green space to alleviate PM2.5 pollution? A case study in Wuhan, China. *Land* ۱۱(6), ۷۷۶.

Chiesura, Anna. (2004). The role of urban parks for the sustainable city. *Landscape and urban planning*, ۶۸.

Ebrahimi-Khusfi, Zohre & Roustaei, Fatemeh. (2021). Dust storm index anomaly for sand-dust events monitoring in western Iran and its association with the NDVI and LST anomalies. *Environmental Science and Pollution Research*, ۱-۱۵.

Gustafson, Eric J. (1998). Quantifying Landscape Spatial Pattern: What Is the State of the Art? *Ecosystems* ۱(2), ۱۵۶-۱۴۳. <https://doi.org/10.1007/s100219900011>.

Huang, Conghong; Yang, Jun; Lu, Hui; Huang, Huabing & Yu, Le. (2017). Green spaces as an indicator of urban health: Evaluating its changes in 28 mega-cities. *Remote Sensing* ۹(12), ۱۲۱۶.

Hutyra, Lucy R; Yoon, Byungman; Hepinstall-Cymerman, Jeffrey & Alberti, Marina. (2011). Carbon consequences of land cover change and expansion of urban lands: A case study in the Seattle metropolitan region. *Landscape and urban planning* ۱۰۳(1), ۸۳-۹۳.

Kanniah, Kasturi Devi. (2017). Quantifying green cover change for sustainable urban planning: A case of Kuala Lumpur, Malaysia. *Urban Forestry & Urban Greening* ۳۰(۴-۲۸۷), ۲۷.

Makhdom, M. F. (2008). Landscape ecology or environmental studies (Land Ecology) (European Versus Anglo-Saxon schools of thought). *J. Int. Environmental Application & Science*, 3(3), 147-160.

Mcgarigal, K; Cushman, Sa & Ene, E. (2012). Spatial pattern analysis program for categorical and continuous maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. FRAGSTATS v4. See <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.

Mcgarigal, Kevin. (1995). FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure (Vol. 351). US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.

Richards, Daniel R & Belcher, Richard N. (2019). Global changes in urban vegetation cover. *Remote Sensing* ۱۲(1), ۲۳.

Rui, Liyan; Buccolieri, Riccardo; Gao, Zhi; Gatto, Elisa & Ding, Wowo. (2019). Study of the effect of green quantity and structure on thermal comfort and air quality in an urban-like residential district by ENVI-met modelling. *Building simulation*.

Selmi, Wissal; Weber, Christiane; Rivière, Emmanuel; Blond, Nadège; Mehdi, Lotfi & Nowak, David. (2016).

Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. *Urban forestry & urban greening* ۱۹۲, ۱۷, ۲۰۱.

Wei, W.; Wang, B. & Niu, X. (2020). Forest Roles in Particle Removal during Spring Dust Storms on Transport Path. *Int J Environ Res Public Health* ۱۷(2). <https://doi.org/10.3390/ijerph17020478>.

White, Denis; Kimerling, Jon A & Overton, Scott W. (1992). Cartographic and geometric components of a global sampling design for environmental monitoring. *Cartography and geographic information systems* ۱۹(1), ۲۲-۵.



پایش پراکنش مکانی و زمانی گاز دی اکسید گوگرد جو با به کارگیری سری زمانی محصول ماهواره سنتینل - 5P (مطالعه موردی: استان تهران)

نادیا عباس زاده طهرانی^۱، کیمیا خنسه^۲، سیده ندا رسولی^۳، میلاد جانعلی پور^۴ 

۱. استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم و تحقیقات و فناوری، تهران، ایران.
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه محیط زیست شهری، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه محیط زیست شهری، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۴. استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم و تحقیقات و فناوری، تهران، ایران. نویسنده مسئول: milad_janalipour@ari.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌ها: دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۷	دی اکسید گوگرد یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های هوای شهرهای ایران به‌ویژه شهر تهران است که سلامت شهروندان را تهدید می‌کند. میزان آسیب‌رسانی این آلاینده به میزان پراکنش آن در جو بستگی دارد. هدف این پژوهش، تحلیل مکانی و زمانی میزان گاز دی اکسید گوگرد در استان تهران در سال ۲۰۲۳ با استفاده از اطلاعات اخذشده از سری زمانی محصول سنجش‌ازدور و تحلیل آن در نرم‌افزارهای مرتبط است. پس از اخذ محصول دی اکسید گوگرد از ماهواره سنتینل - 5P، تحلیل داده‌های مربوطه در محیط نرم‌افزار ENVI انجام شد. برای تعیین خودهمبستگی مکانی در داده‌ها و خوشه‌بندی داده‌ها، از تحلیل آماره موران I و شاخص موران محلی و برای تعیین لکه‌های داغ و سرد این آلاینده از آماره گتیس آرد-جی در استان تهران استفاده شد و نهایتاً با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی تأثیر کاربری بر میزان غلظت آلاینده‌ها به دست آمد. نتایج حاصل از پهنه‌بندی و خودهمبستگی مکانی محلی و جهانی به همراه تحلیل لکه‌های داغ غلظت آلاینده دی اکسید گوگرد نشان داد که غلظت این آلاینده در مناطق جنوب و جنوب شرق استان در فصول سرد سال روند افزایشی دارد. استفاده هم‌زمان از چند تحلیل مکانی نشان داد که استان تهران به دو بخش شرقی تقریباً غیر آلوده و غرب و جنوب آلوده تقسیم می‌شود و در بخش‌های مرکزی آلودگی کمتری دیده می‌شود. همچنین در بین انواع کاربری اراضی، بیشترین میزان غلظت آلاینده دی اکسید گوگرد و بیشینه پراکنش نقاط داغ متعلق به کاربری صنعتی و کارخانه‌هاست.
واژگان کلیدی: استان تهران دی اکسید گوگرد سنتینل سنجش‌ازدور شاخص موران	

استناد: عباس زاده طهرانی، نادیا، خنسه، کیمیا، رسولی، سیده ندا، جانعلی پور، میلاد (۱۴۰۴). پایش پراکنش مکانی و زمانی گاز دی اکسید گوگرد جو با به کارگیری سری زمانی محصول ماهواره سنتینل - 5P (مطالعه موردی: استان تهران). *رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط*، ۲(۲)، ۹۸۸۵.
<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045629.1061>

© ۱۴۰۴ (۲۰۲۶) نویسندگان مقاله، نشریه رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط، ناشر: سازمان مطالعه و تدوین کتب دانشگاهی در علوم اسلامی و انسانی (سمت).



Monitoring the distribution of atmosphere pollutants by using time series of the sulfur dioxide product of Sentinel-5P satellite (Case Study: Tehran province)

Nadia Abbaszadeh Tehrani¹, Kimai Khamseh², Seyedeh Neda Rasouli³, Milad Janalipour⁴ ✉ 

1. Assistant Professor, Aerospace Research Institute (ARI), Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran.

2. MSc Student, Department of Urban Environment, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

3. MSc Student, Department of Urban Environment, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

4. Assistant Professor, Aerospace Research Institute (ARI), Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran.

Corresponding Author: milad_janalipour@ari.ac.ir

Article Info

History

Received: September 02, 2025

Accepted: November 28, 2025

Keywords

Moran Index

Remote Sensing

Sulfur Dioxide

Sentinel

Tehran Province

Abstract

Sulfur dioxide is one of the most important pollutants in Iranian cities, especially in Tehran, which threatens the health of its citizens. The degree of damage of this pollutant depends on its temporal-spatial distribution in the atmosphere. The purpose of this research is to analyze the spatial and temporal amount of sulfur dioxide gas in Tehran province in 2023 using the time series of remote sensing products. After obtaining the sulfur dioxide product from the Sentinel-5p satellite, the relevant data analysis was performed. The presence of spatial autocorrelation and data clustering by analyzing Moran's I statistic and local Moran's index, and to determine the hot and cold spots of this pollutant, Getis-Ord Gi statistic was used in Tehran province, and finally, using the Geographic Information System, the impact of land use on the concentration of pollutants was obtained. The results of zoning and local and global spatial autocorrelation along with hot spot analysis of sulfur dioxide pollutant concentration showed that the concentration of this pollutant in the south and southeast regions of the province is increasing in the cold seasons of the year. The simultaneous use of several spatial analyzes showed that Tehran province was divided into two parts, the east, which was almost unpolluted, and the west and south, which were polluted, and less pollution was seen in the central parts. Also, among the types of land use, the highest concentration of sulfur dioxide pollutant and the maximum distribution of hot spots belong to industrial use and factories.

Citation: Abbaszadeh Tehrani, N., Khamseh, K., Rasouli, N., & Janalipour, M. (2025). Monitoring the distribution of atmosphere pollutants by using time series of the sulfur dioxide product of Sentinel-5P satellite (Case Study: Tehran province). *Innovative Approaches in Human–Environment Studies*, 2(2), 85-98.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045629.1061>

© 2025 Authors, Innovative Approaches in Human–Environment Studies.

Publisher: The Organization for Researching and Composing University Textbooks in the Islamic Science and Humanities (SAMT)

مقدمه

رشد سریع شهرهای بزرگ و افزایش فعالیت‌های شهری، موجب افزایش بی‌رویه آلودگی هوا در اکثر کشورهای جهان شده است. از آنجاکه آلودگی هوا تأثیر مستقیم بر سلامت انسان‌ها و موجودات دیگر دارد، شدت یافتن مشکلات مربوط به افزایش آلاینده‌ها در شهرها، توجه مدیران و محققان را به این معضل جلب کرده است (Alireza & Feyz, 2014). به‌طور کلی آلاینده‌های هوا را می‌توان بر اساس منشأ، ترکیب شیمیایی و حالت فیزیکی‌شان طبقه‌بندی کرد. آلاینده‌ها بسته به منشأ آن‌ها به دو گروه اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند (Pourmollaei, Mohammadi, Bazrafshan, Ismailnejad, & Lahijanian, 2021). آلاینده‌های اولیه مانند دی اکسید گوگرد (SO_2)، اکسیدهای نیتروژن (NO_2) و هیدروکربن‌ها (HC) آن دسته از آلاینده‌هایی هستند که مستقیماً وارد اتمسفر شده و به همان شکل آزادشده نیز در اتمسفر یافت می‌شوند. آلاینده‌های ثانویه نظیر اوزون و پراکسی استیل نترات (PAN) آن دسته از آلاینده‌ها هستند که در اتمسفر توسط یک واکنش فتوشیمیایی در اثر هیدرولیز و یا اکسیداسیون تشکیل می‌شوند (Atai & Hashemi Nasab, 2011). در شهرهای بزرگ دی اکسید گوگرد یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های هوا محسوب می‌شود. دی اکسید گوگرد، گازی است بی‌رنگ، غیرقابل انفجار، حلال در آب و خفه‌کننده که تقریباً دو برابر هوا وزن دارد و روی سطوح بسیاری از مواد جامد مایع و ذرات هوا واکنش نشان می‌دهد و به تری اکسید گوگرد و نهایتاً اسید سولفوریک تبدیل می‌شود. همچنین تخمین زده می‌شود که دی اکسید گوگرد به‌طور متوسط بین ۲ تا ۴ روز در هوا باقی می‌ماند. ایالات متحده روسیه و چین، نیمی از کل دی اکسید گوگرد انسان‌ساخت را وارد جو نیمکره شمالی می‌کنند (Khan & Siddiqui, 2014). بیش از ۸۰ درصد دی اکسید گوگرد عمدتاً از مصرف سوخت‌های فسیلی به دست بشر وارد جو می‌شود. از جمله شایع‌ترین آثار دی اکسید گوگرد بر روی انسان‌ها، می‌توان به تنگ شدن راه‌های هوایی تنفس، اسپاسم برونش، سوزش چشم و مجاری تنفسی، کاهش کارایی تنفسی و تنگی نفس و کم شدن عمق تنفس، کاهش سیستم دفاعی ریه و در نهایت تشدید عوارض قلبی و تنفسی اشاره کرد (Goudarzi et al., 2015). یکی از ابزارهای اندازه‌گیری گوگرد دی اکسید جو، استفاده از محصولات سنجش از دور است. مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد.

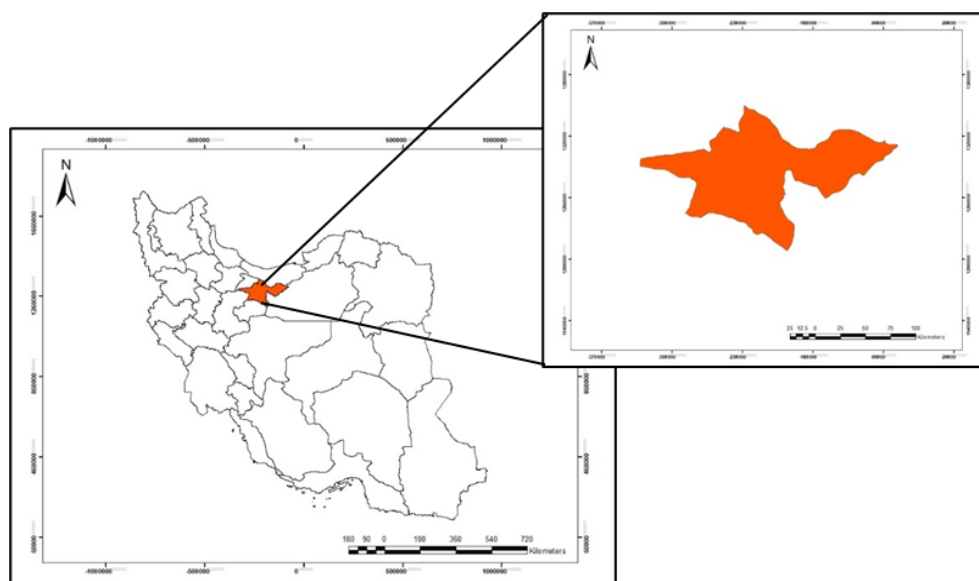
با توجه به مطالعات شمسی‌پور و همکاران در سال ۱۳۹۲، با واکاوی آماری حجم ترافیک در واحد زمان، میزان مصرف بنزین و حجم گاز خروجی CO محاسبه شده و به شبیه‌سازی الگوی پراکنش CO بخش‌هایی از تهران در محیط ENVI-met پرداختند. نتایج به‌دست آمده گویای تمرکز بیشینه آلودگی در بخش‌های با تراکم بالای بافت شهری مانند چهارراه ولیعصر و ضلع شرقی میدان آزادی به‌ویژه در ساعت‌های آغازین روز و کمترین مقادیر در معبرهای باز مانند ضلع غربی میدان آزادی، ضلع جنوبی سهراب تهران‌پارس، فضاهای سبز و نواحی دور از کانون انتشارات به‌خصوص ساعات میانی روز است (شمسی‌پور & امینی, ۲۰۱۳).

نورپور و همکاران در سال ۱۳۹۳ روش‌های مختلف درون‌یابی جهت تولید نقشه‌های کیفیت هوای حاصل از آلاینده‌های ذرات معلق دی اکسید گوگرد و دی اکسید نیتروژن را ارزیابی کردند. سپس با استفاده از روش‌های درون‌یابی بهینه، نقشه‌های کیفیت هوای حاصل از این آلاینده‌ها برای روزهای سال ۱۳۹۱ تولید شد. نتایج حاصل نشان داد که برای درون‌یابی داده آلاینده‌های دی اکسید گوگرد و دی اکسید نیتروژن، روش کوکریجینگ همراه با سه پارامتر دما، جهت باد و سرعت باد، مناسب‌ترین روش است. درحالی‌که برای آلاینده‌های ذرات معلق PM2.5 و PM10 روش Spline نتایج بهتری ارائه می‌دهد (Alireza & Feyz, 2014). محمدی و همکاران ۱۳۹۷ با استفاده از مدل خرد آب و هوایی ENVI-met، تأثیر پارامترهای جوی در پراکنش آلاینده PM2.5 در محدوده‌هایی از خیابان ولیعصر موردبررسی قرار دادند نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در پراکنش آلاینده‌های منتشرشده در خیابان ولیعصر بین تجمع و پراکنش آلاینده‌ها با سرعت و جهت باد رابطه محسوسی وجود دارد (محمدی & یاسیان, ۲۰۱۸). نادیان و همکاران ۱۳۹۷ به‌منظور پهنه‌بندی غلظت PM از درون‌یابی وزن دهی معکوس فاصله استفاده کردند. وجود خودهمبستگی مکانی در داده‌ها توسط شاخص موران

بررسی شد و خوشه‌بندی داده‌ها توسط شاخص‌های موران جهانی و محلی صورت پذیرفت و نهایتاً جهت تعیین لکه‌های داغ این آلاینده در شهر تهران از شاخص Getis-Ord-Gi استفاده شد. یافته‌ها نتایج حاصل از پهنه‌بندی و خودهمبستگی مکانی محلی و جهانی به همراه تحلیل لکه‌های داغ غلظت آلاینده‌ی PM نشان داد که غلظت این آلاینده از سمت شمال به جنوب تهران روند افزایشی دارد (Nadian, Mirzaei, & Soltani Mohammadi, 2018). Yanti و همکاران در سال ۲۰۲۴ با استفاده از محصولات سنتینل 5-p به بررسی تغییرات آلاینده SO₂ در یکی از شهرهای کشور اندونزی پرداختند. نتایج بدست آمده نشان دهنده کاهش حدود ۴۰ درصدی این آلاینده در بازه مورد مطالعه است (Yanti et al., 2024). Shikwambana و همکاران در سال ۲۰۲۰ با استفاده از تحلیل سری زمانی من-کندال و محصولات سنتینل 5-p به بررسی پراکنش گوگرد دی اکسید و سولفور دی اکسید در آفریقای جنوبی پرداختند. بر اساس نتایج بدست آمده بیشترین پراکنش این آلاینده‌ها در فصل زمستان مشاهده می‌شود (Shikwambana, Mhangara, & Mbatha, 2020). طی سال‌های گذشته از محصولات سنجش‌ازدور برای پایش وضعیت آلودگی هوای شهرها مکرر استفاده شده است. تهرانی و همکاران، جهت پایش سلامت اکوسیستم شهر سندج از محصول گوگرد دی اکسید سنتینل 5-p استفاده کردند (N Abbaszadeh Tehrani, Janalipour, & Hosseini, 2024). همچنین، تهرانی و همکاران از محصول گوگرد دی اکسید سنتینل 5-p برای بررسی اثر فعالیت انسانی بر شهر تهران استفاده کردند (Nadia Abbaszadeh Tehrani, Farhanj, & Janalipour, 2023). در مطالعات دیگری، تأثیر محصول گوگرد دی اکسید در نرخ بیماری کووید-۱۹ و ریسک آن مورد بررسی قرار گرفته است (Tehrani, Mollalo, Farhanj, Pahlevanzadeh, & Janalipour, 2021). در این مقاله، هدف بررسی تغییرات مکانی و زمانی آلاینده دی اکسید گوگرد در استان تهران و ماه‌های مختلف سال ۲۰۲۳ میلادی با محصولات سنجش‌ازدور سنتینل 5-p است.

روش پژوهش

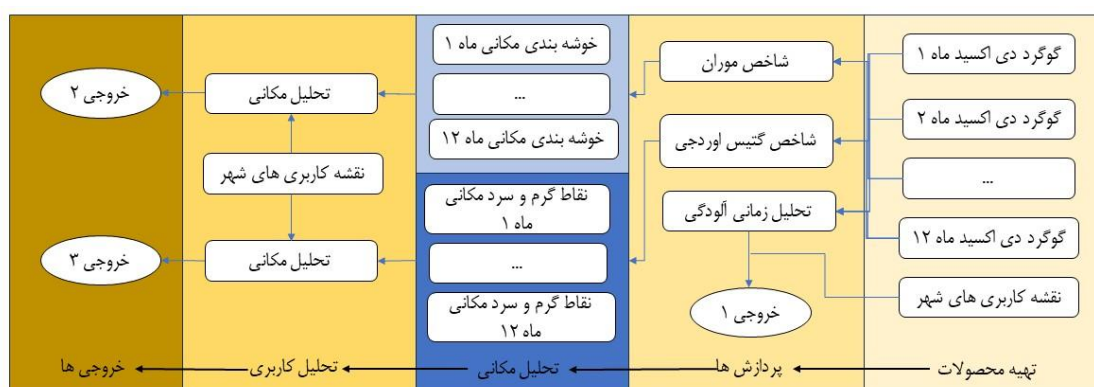
استان تهران به عنوان منطقه مورد مطالعه در این پژوهش انتخاب شده است. استان تهران به عنوان پایتخت کشور ایران، درصد زیادی از جمعیت آن کشور را در خود جای داده است. به دلیل وجود مراکز صنعتی و تجاری زیاد و همچنین جمعیت بالا در محدوده مکانی حدود ۱۳۰۰۰ کیلومتر مربع انواع آلاینده‌های هوا روزانه وارد جو می‌شوند که ضرورت پایش آن را برای اخذ تصمیمات مدیریتی اجتناب ناپذیر می‌کند. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی استان تهران را نشان می‌دهد.



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی استان تهران

sentinel_5p یک ماهواره دیده بان زمین است که توسط آژانس فضایی اروپا توسعه یافته است تا فاصله بین پایان ماموریت ENVISAT و پرتاب سنتینل-۵ را پر کند. این ماهواره ابزار نظارت تروپوسفریک (TROPOMI) را حمل می کند که یک طیف سنجی تصویربرداری در حال مشاهده نادر است که برای نظارت بر آلودگی هوا با اندازه گیری طول موج های طیفی الکترومغناطیسی از ماورای بنفش (UV) تا مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) طراحی شده است (Reshi, Pichuka, & Tripathi, 2024; Veeffkind et al., 2012)).

هدف این پژوهش، بررسی تغییرات آلاینده دی اکسید گوگرد در استان تهران در بازه ۱۲ ماهه سال ۲۰۲۳ هست. لذا ابتدا میانگین ماهانه محصولات ماهواره sentinel_5p در بازه یک ساله دریافت شد. بدین منظور محصولات از طریق سامانه گوگل ارث انجین اخذ شده و سپس، تحلیل تغییرات زمانی و مکانی با به کارگیری نرم افزار ENVI انجام شد. در محیط نرم افزار ENVI با استفاده از آماره های گتیس آرد جی^۱ و موران I^۲، نقشه های پراکنش مکانی آلاینده تولید و تحلیل های لازم انجام شد. توسعه فناوری ها و مدل های آماری و تحلیلی جدید، باعث ارتقاء توانمندی پژوهشگران در واکاوی های علمی از جمله آلودگی هوا شده است؛ از این رو به کارگیری روش های تحلیلی توأمان آماری-فضایی کاربرد وسیعی پیدا کرده است. مهم ترین ویژگی تحلیل فضایی تأکید بر بعد فضایی داده هاست (بهلول، ۲۰۱۵). در شکل ۲ فلوچارت مراحل تحقیق نمایش داده شده است.



شکل ۲ فلوچارت مراحل تحقیق

در این تحقیق به منظور تحلیل فضایی لکه های داغ^۳ غلظت SO₂، از تحلیل خودهمبستگی فضایی موران استفاده شد. خودهمبستگی فضایی روشی مبتنی بر آمار فضایی است که برای شناسایی شباهت پدیده های نزدیک به هم از طریق ارزیابی توزیع جغرافیایی مجموعه مشخصی از ویژگی ها به صورت خوشه ای، پراکنده یا تصادفی استفاده می کند. از خودهمبستگی فضایی به عنوان یک ابزار مهم تحلیلی در علوم محیط زیست برای شناسایی لکه های داغ آلاینده های مختلف استفاده می شود (Nadian et al., 2018).

جهت محاسبه خودهمبستگی فضایی موران ابتدا باید نمره استاندارد Z score و P value به دست آید تا در مرحله بعد به ارزیابی و معنادار بودن تحلیل خودهمبستگی فضایی موران پرداخته شود. دو نوع شاخص موران جهت مشخص نمودن همبستگی فضایی بین متغیرها وجود دارد که کارایی آن ها از یکدیگر متفاوت هست. شاخص موران

1. Getis-Ord Gi
2. Moran I
3. Hot spots

جهانی^۱، پارامتر جهانی جهت اندازه گیری همبستگی فضایی است و شاخص موران محلی^۲ که برای کشف توزیع فضایی محلی استفاده می شود. رابطه شماره ۱ فرمول آماره موران محلی را نمایش می دهد (Anselin, 1995).

$$I_i = n(X_i - \bar{X}) \sum_{j=1, j \neq i}^n W_{ij} (X_j - \bar{X})$$

N تعداد کل متغیرها، X_i و X_j مقادیر SO2 در مکانهای i و j و W_{ij} مقدار وزن فضایی عارضه های i و j را نشان می دهد. مقدار ضریب خودهمبستگی فضایی محلی باید بزرگتر از ضریب مورد انتظار باشد تا الگوی پراکنش فضایی مورد قبول باشد. ضریب مورد انتظار موران توسط رابطه ی زیر به دست می آید:

$$E(I_i) = -W / (N - 1)$$

آزمون اهمیت موران توسط نمره ی z اندازه گیری می شود تا از آن برای آزمون معنی داری آماری نتایج استفاده شود. نمره ی z به عنوان مقدار استاندارد شده ی I در نظر گرفته می شود که توسط رابطه ی زیر به دست می آید.

$$Z_i = \frac{I - E(I)}{SD(I)}$$

SD (I) و E (I)

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} X_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n W_{ij}}{S \sqrt{\left[n \sum_{j=1}^n W_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n W_{ij} \right)^2 \right] / (n-1)}}$$

در این فرمول X_j ، مقدار خصیصه برای عارضه j، W_{ij} وزن فضایی بین عارضه i و j و n تعداد کل عارضه ها را نشان می دهد.

نتایج و بحث

در این مطالعه به منظور شناسایی خوشه بندی آلاینده SO2 در سطح استان تهران از آماره موران محلی و برای شناسایی لکه های داغ و سرد از آماره گنیس اردجی استفاده شد. به دلیل اینکه هدف بررسی مکانی تمامی پیکسل های محدوده استان تهران است، از آماره موران و گنیس اردجی محلی استفاده شد.

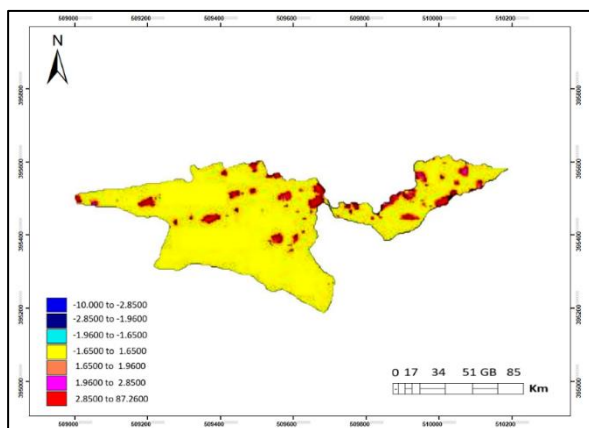
غلظت آلاینده ی SO₂، با توجه به نتایج به دست آمده در فصل های پاییز و زمستان در مناطق جنوب و جنوب غربی استان دارای پراکنش و غلظت بالایی است. همچنین با توجه به آمار توصیفی و پهنه بندی غلظت آلاینده می توان به این نتیجه رسید که شهرستان های قرچک، شمیرانات و شهر تهران دارای بیشترین میزان غلظت آلاینده SO₂ هستند.

نتایج نشان می دهد که مناطق محدوده قرچک دارای بار آلودگی بیشتری است. همچنین بررسی میزان تأثیر غلظت آلاینده در کاربری اراضی نیز نشان دهنده ی آلودگی بیشتر در مناطق دارای کاربری صنعتی شامل کارخانه ها هست که در ماه های آخر سال روند افزایشی آلاینده در آن مناطق مشاهده می شود. این پژوهش تنها برای یک آلاینده هوا انجام شده است و نیاز است وضعیت سایر آلاینده ها نیز مشخص شود تا شناخت جامع تری از وضعیت آلودگی هوای استان تهران به دست آید. میزان غلظت آلاینده در ۱۶ شهرستان استان به صورت جدول ۱ جمع آوری شده است.

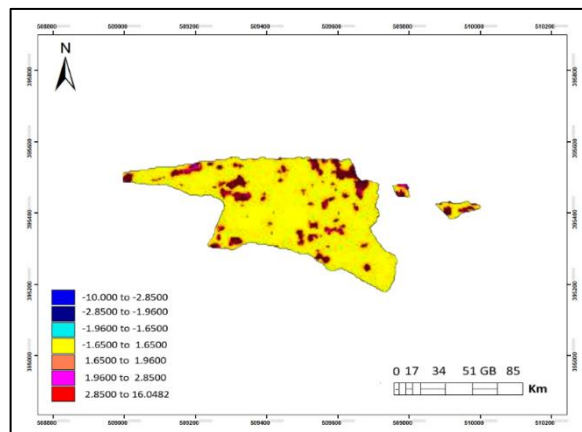
جدول ۱ توصیف آماری غلظت آلاینده SO₂ در شهرستان های استان تهران در سال ۲۰۲۳

شهرستان	میانگین غلظت SO ₂ (مول بر مترمربع)	حداکثر غلظت SO ₂ (مول بر مترمربع)	حداقل غلظت SO ₂ (مول بر مترمربع)
بهارستان	0.001002	0.001854	0.000035
دماوند	0.001185	0.003526	-0.000253
اسلامشهر	0.001246	0.002216	0.000236
فیروزکوه	0.001331	0.005311	-0.000725
قرچک	0.001580	0.002352	0.000495
قدس	0.001341	0.002230	0.000708
ملارد	0.001286	0.002822	0.000022
پاکدشت	0.001149	0.002523	-0.000155
پردیس	0.000837	0.002001	-0.000452
پیشوا	0.001442	0.002523	0.000213
ری	0.001146	0.002520	-0.000200
رباط کریم	0.000997	0.001802	-0.000155
شهریار	0.001206	0.002423	0.000194
شمیرانات	0.000908	0.002568	-0.000210
تهران	0.001026	0.002940	-0.000842
ورامین	0.001029	0.002274	-0.000294

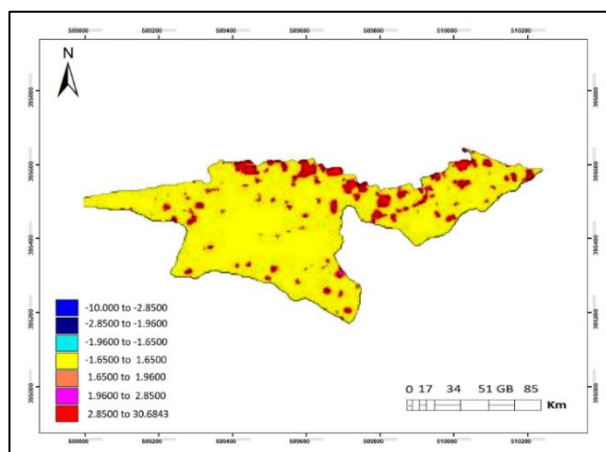
نتایج حاصل از تحلیل خودهمبستگی فضایی محلی برای غلظت ماهانه ی آلاینده SO₂ نشان داد بالاترین میانگین غلظت در تمامی شهرستان های استان تهران در ماه دسامبر (۱۱ آذر تا ۱۱ دی ماه) است، به جز شهرستان پردیس که بیشترین غلظت آلاینده آن در ماه ژانویه (۱۱ دی تا ۱۱ بهمن) است. همچنین بیشترین میانگین آن در بین تمامی شهرستان ها مربوط به شهرستان قرچک و کمترین آن مربوط به شهرستان پردیس است و همین طور کمترین میزان پراکنش بین این شهرستان ها مربوط به شهر تهران است. پس می توان نتیجه گرفت بالاترین غلظت SO₂ در شهرستان قرچک قابل ملاحظه است (جدول ۱). شکل شماره ۳ پراکنش غلظت SO₂ در هوای استان تهران در ماه های مختلف سال ۲۰۲۳ را نمایش می دهد.



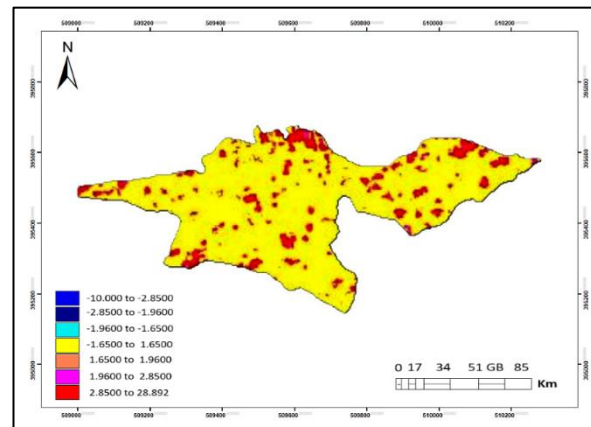
ژانویه



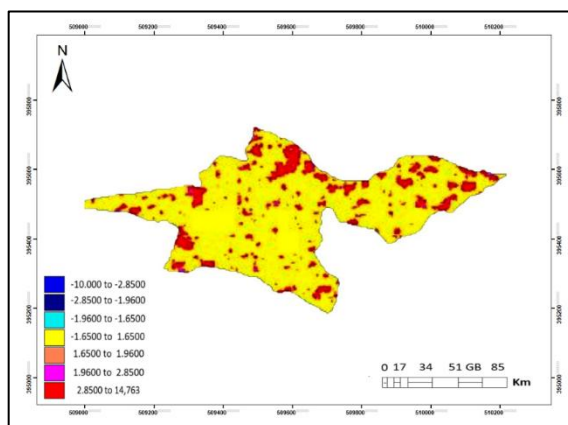
فوریه



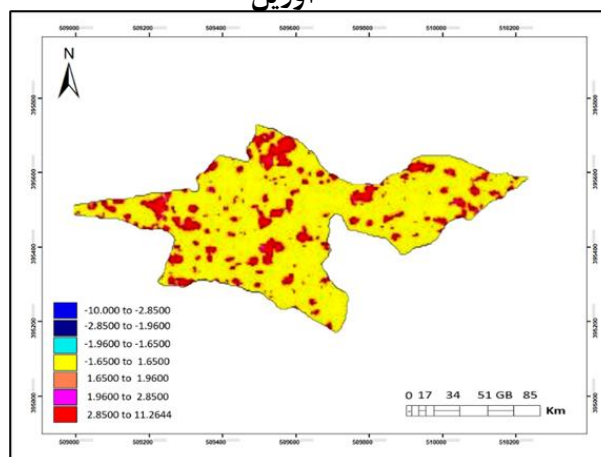
مارچ



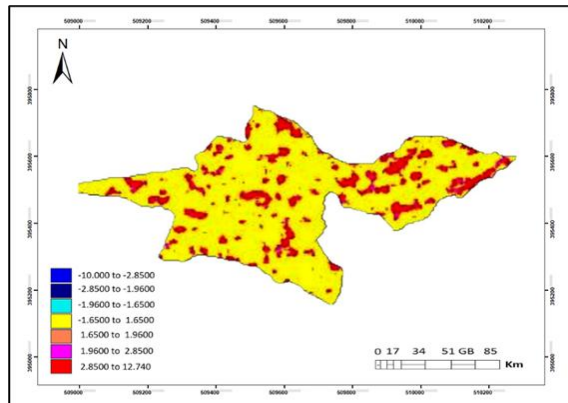
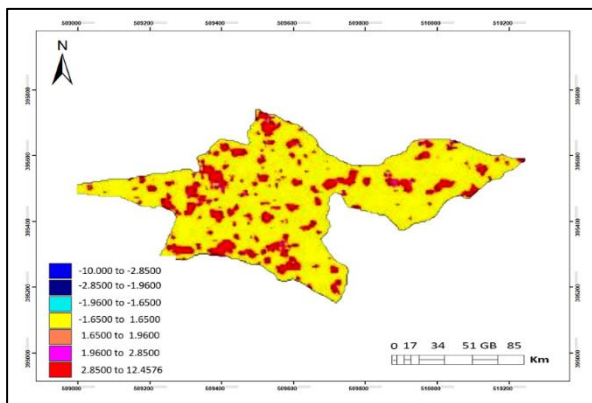
آوریل



می

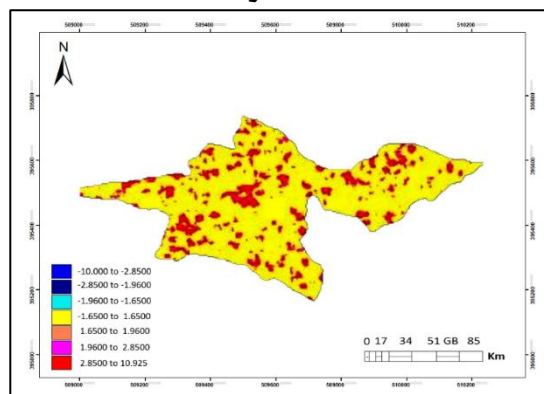
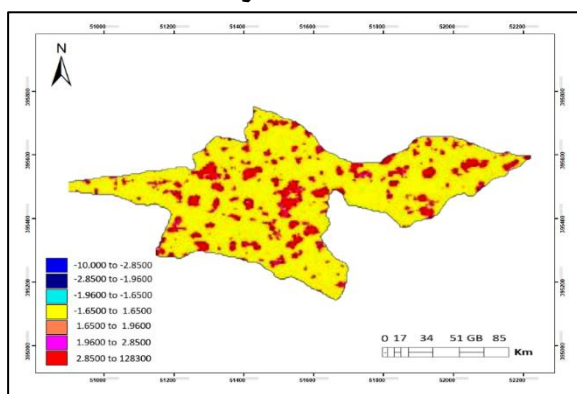


ژوئن



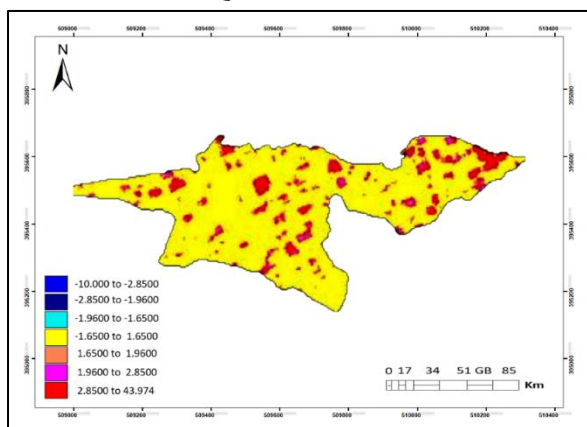
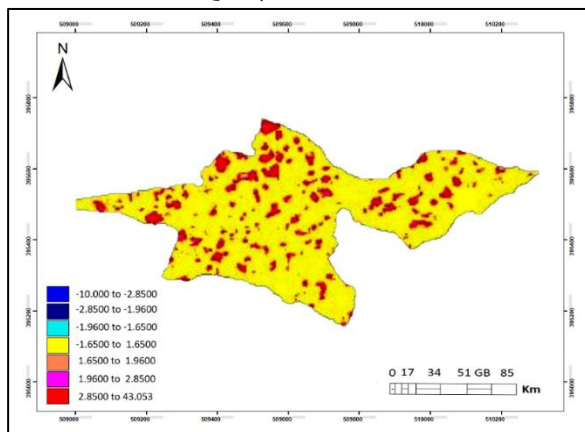
جولای

آگوست



سپتامبر

اکتبر



نوامبر

دسامبر

شکل ۳ پهنه بندی غلظت SO₂ در هوای استان تهران در ماه های مختلف

توصیف لکه های داغ

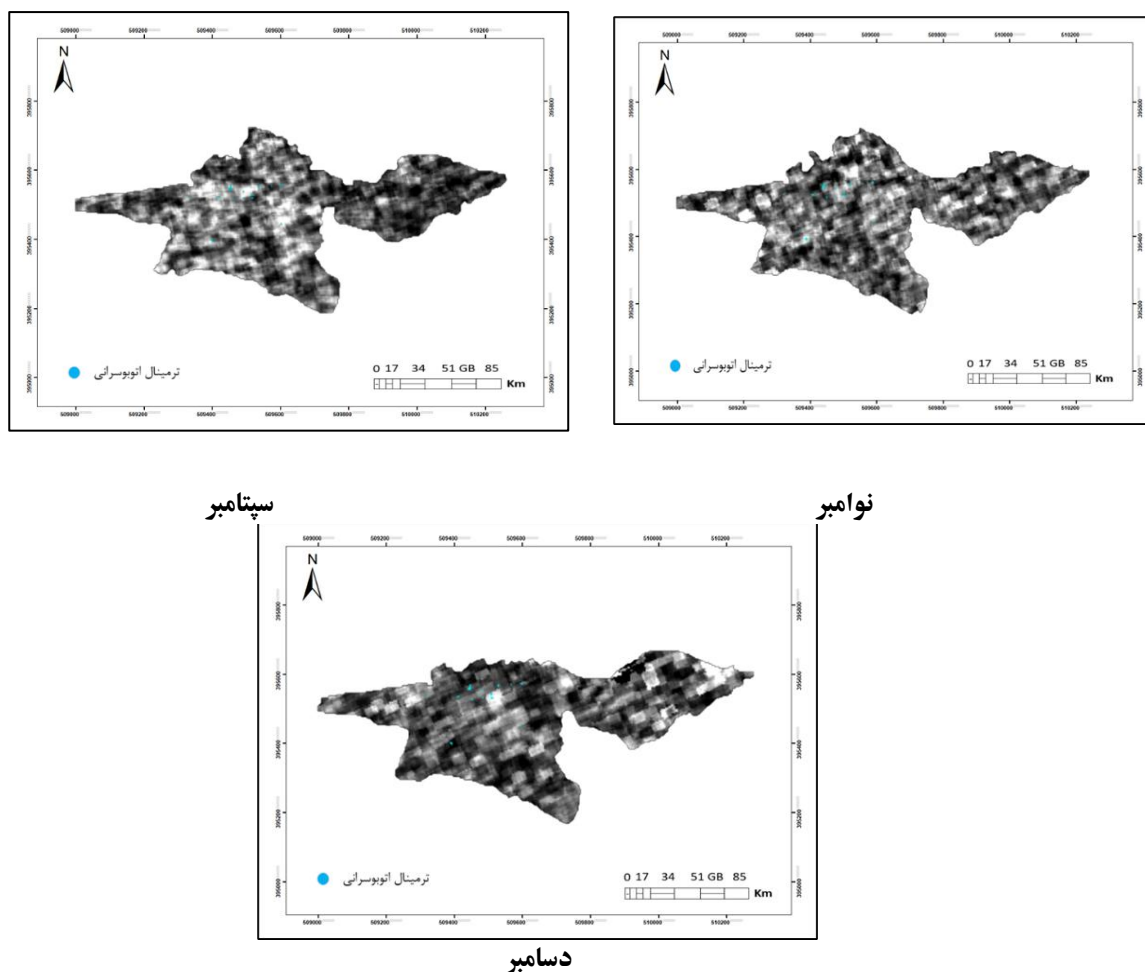
نتایج پهنه بندی غلظت گوگرد دی اکسید در استان تهران با توجه به نقشه های به دست آمده در فصول مختلف سال نیز نشان داد بیشترین لکه های داغ (بیشترین میزان معنی دار آلاینده SO₂) متعلق به شهر تهران، شمیرانات و در بعضی فصول، بخش های جنوبی استان هست. همین طور نقاط سرد (کمترین میزان معنی دار آلاینده SO₂) فقط در ماه دسامبر و در

قسمتی از شمیرانات، فیروزکوه و بخش کوچکی از جنوب استان دیده می‌شود. همچنین نتایج نشان داد غلظت این آلاینده در دو فصل سرد سال افزایش می‌یابد. در ماه‌های ژوئیه تا اکتبر بیشترین میزان آلاینده را در محدوده مکانی جنوب و جنوب شرق استان همچنین بخش‌های غربی استان مشاهده می‌شود. همچنین شکل ۲ نشان‌دهنده روند افزایشی غلظت SO_2 از شمال به جنوب استان است. نتایج به‌دست آمده از تحلیل فضای همبستگی گتیس-ارد-جی نشان داد در فصل‌های سرد سال (پاییز و زمستان) میزان پراکنش آلاینده نسبت به فصل‌های گرم‌تر افزایش می‌یابد.

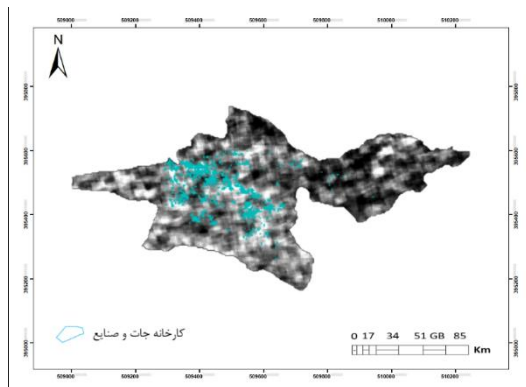
بررسی کاربری اراضی و میزان آلاینده گوگرد دی‌اکسید

با توجه به شکل‌ها و نمودارها که به تفکیک ۱۲ ماه سال ۲۰۲۳ استخراج شده است از میان کاربری‌های اثرگذار که از منابع پخش آلاینده دی‌اکسید گوگرد در استان هستند، فرودگاه‌ها، مراکز صنعتی و کارخانه‌ها و پایانه اتوبوس‌رانی بیشترین نقش را دارند.

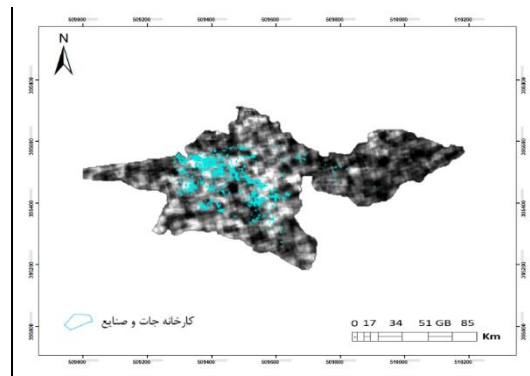
شکل ۴ نشان می‌دهد که میزان پراکنش کارخانه‌ها در بخش مرکزی و غربی استان تهران هست و غلظت آلاینده SO_2 بین ماه‌های سوم تا هشتم روند تقریباً ثابت و نزدیک به هم دارند (۰,۰۰۰۳۴۲ تا ۰,۰۰۰۳۵۴ مول بر مترمربع) و در ماه نهم تا دوازدهم روند به‌شدت افزایشی دارد و در ماه دوازدهم به اوج خود می‌رسد (۰,۰۰۲۱۱۷ مول بر مترمربع) و کمترین میزان آلاینده در ماه دوم مشاهده می‌شود. شکل شماره ۳ و ۴ و ۵ به ترتیب پراکندگی کاربری پایانه‌های اتوبوس‌رانی، کاربری صنعتی و کاربری فرودگاه و غلظت SO_2 در سطح استان تهران در ماه‌های مختلف نشان می‌دهند.



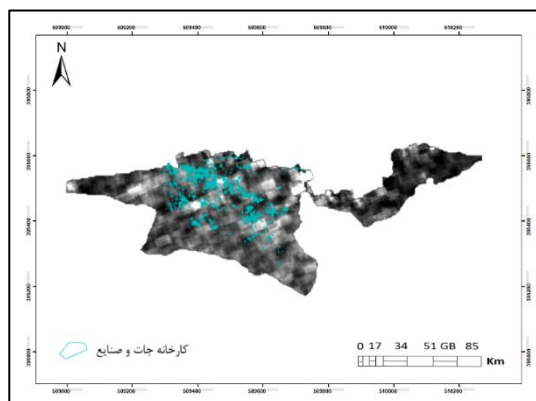
شکل ۳ پراکندگی کاربری پایانه‌های اتوبوس‌رانی و غلظت SO_2 در سطح استان تهران در ماه‌های مختلف



آگوست

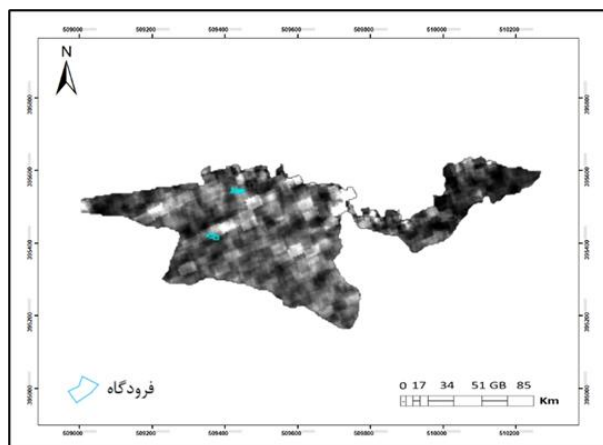


سپتامبر

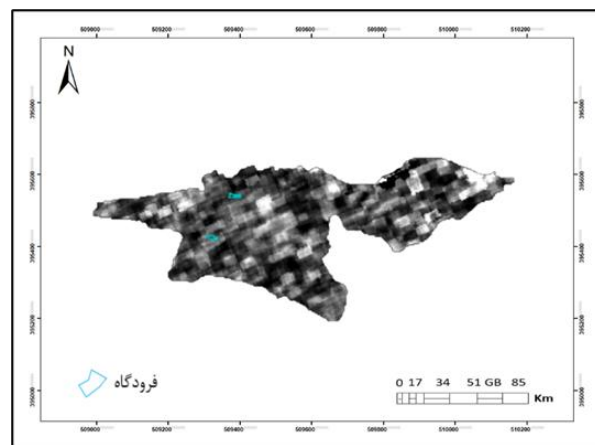


نوامبر

شکل ۴ پراکندگی کاربری صنعتی و غلظت SO_2 در سطح استان تهران در ماه‌های مختلف



ژانویه

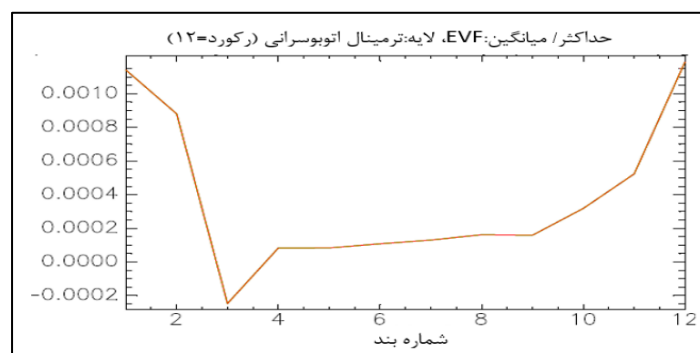


دسامبر

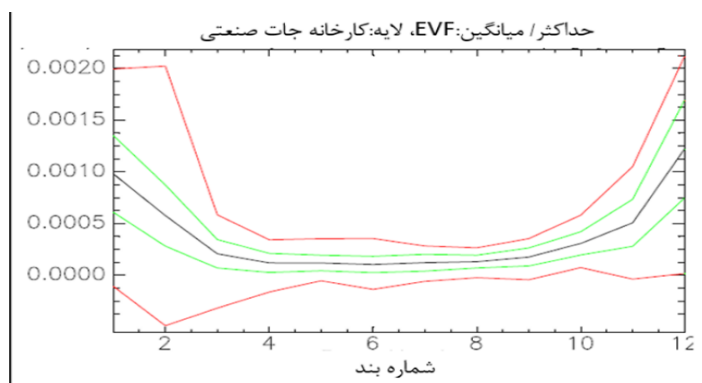
شکل ۵ پراکندگی کاربری فرودگاه و غلظت SO_2 در سطح استان تهران در ماه‌های مختلف

نمودار ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب روند تغییرات آلاینده SO_2 در کاربری پایانه اتوبوس رانی، کارخانه‌ها/صنایع و فرودگاه‌ها را در ماه‌های سال ۲۰۲۳ را نمایش می‌دهند. با توجه به آن‌ها، فقط در ماه‌های ژانویه و فوریه میزان غلظت آلاینده‌ی SO_2 روند کاهشی دارد و از ماه می تا ماه سپتامبر روند نوسانی دارد و در دو ماه آخر به شدت روند افزایشی هست و از میزان ۰,۰۰۰۲۵۹ به ۰,۰۰۷۳۶ مول بر مترمربع در این ماه می‌رسد. به‌طور کلی در بین پلیگونی‌های کاربری اراضی، بیشترین میزان غلظت آلاینده و

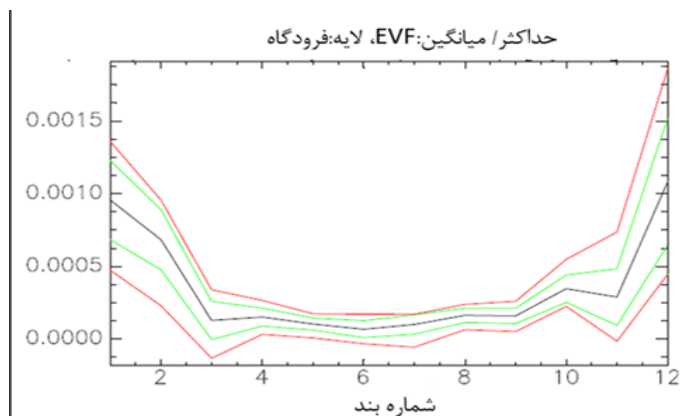
بیشینه پراکنش نقاط داغ متعلق به کاربری صنعتی و کارخانه‌ها هست. نقشه‌های به‌دست آمده همچنین نشان می‌دهد پراکنش پایانه اتوبوس‌رانی در شهرستان‌های پاکدشت، ری، شمیرانات و تهران است که تغییرات میزان غلظت آلاینده در پلیگن شهر ری در ماه‌های اول کم و در ماه پنجم تا هفتم روند افزایشی دارد تا در ماه یازده و دوازده به اوج خود یعنی میزان $0,001189$ مول بر مترمربع می‌رسد. در پاکدشت نیز در اواخر سال میزان غلظت آلاینده بیشینه است. در شهر تهران نیز در ماه‌های اول میزان آلاینده به‌صورت پراکنده است و در ماه‌های آخر سال میزان غلظت SO_2 روند افزایشی دارد. به‌طور کلی روند میزان غلظت آلاینده SO_2 در ماه‌های اول تا سوم کاهشی، از ماه چهارم تا هشتم تقریباً ثابت و از ماه نهم تا آخر سال افزایشی بوده و بیشترین میزان آلاینده و تغییرات آن در شهر تهران و ری بوده‌است.



نمودار ۱ روند تغییرات آلاینده SO_2 در کاربری پایانه‌های اتوبوس‌رانی



نمودار ۲ روند تغییرات آلاینده SO_2 در کاربری‌های صنعتی



نمودار ۳ روند تغییرات آلاینده SO_2 در کاربری فرودگاه

نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، جهت تحلیل مکانی- زمانی آلاینده گوگرد دی اکسید سطح استان تهران از روش خوشه بندی فضایی موران استفاده شد. همچنین به منظور شناسایی لکه های داغ آلاینده SO₂ در سطح استان تهران از آماره موران و گتیس اوردجی محلی استفاده شد. با توجه به نتایج به دست آمده غلظت آلاینده SO₂ در فصل های پاییز و زمستان در مناطق جنوب و جنوب غربی استان دارای پراکنش و غلظت بالایی است. همچنین با توجه به آمار توصیفی و پهنه بندی غلظت آلاینده می توان به این نتیجه رسید که شهرستان های قرچک، شمیرانات و شهر تهران در سال ۲۰۲۳ دارای بیشترین میزان غلظت آلاینده SO₂ هستند. نتایج روش های مختلف استفاده شده در این پژوهش نشان داد که مناطق جنوبی استان به ویژه مناطق محدوده قرچک دارای بار آلودگی بیشتری است. همچنین بررسی میزان تأثیر غلظت آلاینده در کاربری اراضی نیز نشان دهنده آلودگی بیشتر در مناطق دارای کاربری صنعتی من جمله کارخانه هاست که در ماه های آخر سال روند افزایشی آلاینده در آن مناطق به بیشینه خود می رسد. نتایج حاصل از تحقیق حاضر می تواند توسعه داده شده و با افزودن اطلاعات مربوط به سایر آلاینده های هوا به صورت یک سامانه پشتیبان تصمیم گیری مکانمند جهات پایش پراکنش آلاینده های هوا، مورد استفاده برنامه ریزان و مدیران شهری قرار گیرد.

منابع

- بهلول، ع. ج. (۲۰۱۵). تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۷(۲)، ۱-۱۴.
- شمسی پور، ع. ا.، & امینی، ژ. (۲۰۱۳). شبیه سازی الگوی پراکنش CO با مدل خرد اقلیمی Envi-met در مسیر آزادی - تهران پارس. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۰(۲)، ۲۳۵۸۲. doi:10.22067/geo.v0i0.235882
- محمدی، ح. و، & یاسیان، ا. (۲۰۱۸). تأثیر عناصر جوی در پراکنش آلاینده PM_{2.5} مطالعه موردی: خیابان ولیعصر تهران. نشریه مطالعات علوم محیط زیست، ۳(۱)، ۶۳۲-۶۴۲. Retrieved from <https://www.magiran.com/paper/1919698642>
- Abbaszadeh Tehrani, N., Farhanj, F., & Janalipour, M. (2023). Monitoring the Impacts of Human Activities on Urban Ecosystems Based on the Enhanced UCCLN (EUCCLN) Model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(4), 170.
- Abbaszadeh Tehrani, N., Janalipour, M., & Hosseini, S. B. (2024). Monitoring the urban ecosystem health by introducing a spatial model based on pressure-state-impact-response framework (study area: Sanandaj city). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-18.
- Alireza, N., & Feyz, S. M. A. (2014). Determining the spatial and temporal changes of sulfur dioxide, nitrogen dioxide and suspended particles using GIS technique in Tehran. *Quarterly Journal of Environmental Studies*(3), 723-738.
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical analysis*, 27(2), 93-115.
- Atai, H., & Hashemi Nasab, S. (2011). Identification and analysis of atmospheric mid-level patterns affecting air pollution in Isfahan. *Journal of Research and Urban Planning*, 2(4), 97-113.
- Goudarzi, G., Geravandi, S., Mohammadi, M. J., Salmanzadeh, S., Vosoughi, M., & Sahebzamani, M. (2015). The relationship between air pollution exposure and chronic obstructive pulmonary disease in Ahvaz, Iran. *Chronic Diseases Journal*, 3(1), 14-20.
- Khan, R. R., & Siddiqui, M. (2014). Review on effects of particulates: sulfur dioxide and nitrogen dioxide on human health. *Int Res J Environl Sci*, 3(4), 70-73.
- Nadian, M., Mirzaei, R., & Soltani Mohammadi, S. (2018). Application of Moran's I Autocorrelation in Spatial-Temporal Analysis of PM_{2.5} Pollutant (A case Study: Tehran City). *Journal of Environmental Health Engineering*, 5(3), 197-213. doi:10.29252/jehe.5.3.197
- Pourmollaei, N., Mohammadi, A., Bazrafshan, E., Ismailnejad, M., & Lahijanian, A. A.-M. (2021). Investigation of Temporal Changes in the Dust Particle Concentration in Zabol City Air Using Air Quality Index. *Journal of health research in community*, 6(4), 40-50.
- Reshi, A. R., Pichuka, S., & Tripathi, A. (2024). Applications of sentinel-5p tropomi satellite sensor: A review. *IEEE Sensors Journal*, 24(13), 20312-20321.

- Shikwambana, L., Mhangara, P., & Mbatha, N. (2020). Trend analysis and first time observations of sulphur dioxide and nitrogen dioxide in South Africa using TROPOMI/Sentinel-5 P data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 91, 102130.
- Tehrani, N. A., Mollalo, A., Farhanj, F., Pahlevanzadeh, N., & Janalipour, M. (2021). Time-series analysis of COVID-19 in Iran: A remote sensing perspective. In *COVID-19 pandemic, geospatial information, and community resilience* (pp. 277-290): CRC Press.
- Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., De Vries, J., Otter, G., . . . Kleipool, Q. (2012). TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*, 120, 70-83.
- Yanti, J., Tampubolon, T., Liu, C.-Y., Alonge, T. A., Qaiyimah, D., Abidin, M. R., . . . Saputra, R. R. (2024). Measuring The Spatio-Temporal Distribution of Sulfur Dioxide (SO₂) with Copernicus Sentinel-5P Near Real Time in Medan City. *Jurnal Geografi-Vol*, 16(1), 101-110.



کاربرد هوش مصنوعی و سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی زیست شهری

سیده بهاره حسینی^۱ ✉، الهام یوسفی روییات^۲

۱. دانشجوی دکتری، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. نویسنده مسئول: baharhs1377@gmail.com
۲. استادیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌ها: دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۷ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶	حفاظت مؤثر از محیط‌زیست تا حد زیادی به کیفیت اطلاعاتی که برای تصمیم‌گیری استفاده می‌شود بستگی دارد. تلاش‌های بسیاری در جهت توسعه فناوری‌های لازم برای آگاهی سازمان‌های مدیریت و سیاست‌گذاری محیط‌زیست و کمک به آن‌ها در یافتن راه‌حل مسائل پیچیده صورت پذیرفته است و در نهایت به معرفی سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری محیط‌زیستی ختم شده‌است. مشکلات زمانی رخ می‌دهند که اطلاعات زیاد باشند و هماهنگ نباشند، یعنی از منابع مختلف و علوم گوناگون جمع‌آوری شده باشند و کیفیت این اطلاعات قابل ارزیابی نباشد. یکی دیگر از چالش‌ها، ماهیت پویای مشکلات محیط‌زیستی است. رایانه‌ها در حفاظت از محیط‌زیست در دوران معاصر نقش حیاتی دارند و در وظایفی همچون نظارت، تحلیل داده‌ها، ارتباطات، ذخیره و بازیابی اطلاعات به کار می‌روند؛ بنابراین، استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی برای یکپارچه‌سازی و بهبود این وظایف طبیعی است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی تأثیر هوش مصنوعی بر سیستم‌های تصمیم‌یار محیطی در سال‌های اخیر و تحلیل ویژگی‌های نمونه ایده‌آل آن است و نمونه‌هایی از کاربردهای موفق در مسائل محیط‌زیستی را معرفی می‌کند. این تحقیق به تحلیل فنون مختلف هوش مصنوعی که در جهت بهبود و یکپارچه‌سازی فرآیندهای مربوط به مدیریت محیط‌زیست به کار می‌روند پرداخته است. علاوه بر این، چالش‌هایی مانند حجم بالای اطلاعات غیر هماهنگ و پیچیدگی‌های تصمیم‌گیری در مواجهه با مسائل محیط‌زیست و تغییرات جهانی بررسی شده‌است. با توجه به نقش حیاتی رایانه‌ها در حفاظت از محیط‌زیست، استفاده از فنون هوش مصنوعی برای یکپارچه‌سازی وظایف نظارتی و تحلیلی در راستای بهبود عملکرد سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری محیط‌زیستی بسیار ضروری به نظر می‌رسد. این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از این فنون می‌تواند به سازمان‌ها در حل مسائل پیچیده محیط‌زیست کمک کند و در نتیجه، به توسعه پایدار محیط‌زیست کمک کند. نمونه‌هایی از کاربردهای موفق این سیستم‌ها در مسائل محیط‌زیستی نیز در این تحقیق مطرح شده‌است.

استناد: حسینی، سیده بهاره، یوسفی روییات، الهام (۱۴۰۴). کاربرد هوش مصنوعی و سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی زیست شهری. *رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط*، ۲(۲)، ۹۹-۱۱۰.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045796.1063>

© ۱۴۰۴ (۲۰۲۶) نویسندگان مقاله، نشریه رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط، ناشر: سازمان مطالعه و تدوین کتب دانشگاهی در علوم اسلامی و انسانی (سمت).



The application of artificial intelligence and decision support systems in urban environmental planning

Seyedeh Bahareh Hosseini ¹✉, Elham Yousefi Robiat

1. PhD student, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran .Corresponding author: baharhs1377@gmail.com
2. Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran.

Article Info

History

Received: October 09, 2025

Accepted: February 15, 2025

Keywords

Artificial Intelligence

Decision Support

Decision Systems

Environment

Problem Solving

Abstract

Effective environmental protection largely depends on the quality of the information used for decision-making. Significant efforts have been made to develop technologies that inform environmental management and policy-making organizations, helping them find solutions to complex environmental issues. These efforts have led to the introduction of Environmental Decision Support Systems. Problems arise when there is an abundance of uncoordinated information, meaning data is collected from different sources and scientific fields, making it difficult to assess the quality of this information. Another challenge is the dynamic nature of environmental problems. Computers play a crucial role in modern environmental protection, performing tasks such as monitoring, data analysis, communication, storage, and retrieval of information. Therefore, employing artificial intelligence techniques to integrate and enhance these tasks is a natural step. The primary goal of this study is to review the impact of artificial intelligence on Environmental Decision Support Systems in recent years. It also explores the key features of an ideal and presents successful applications in solving environmental issues. This research analyzes various AI techniques used to improve and integrate processes in environmental management. It also addresses challenges such as the high volume of uncoordinated data and the complexities of decision-making when dealing with environmental problems and global changes. Considering the critical role of computers in environmental protection, the use of AI techniques to integrate monitoring and analytical tasks is crucial for enhancing the performance of Environmental Decision Support Systems. This study shows that AI can assist organizations in solving complex environmental problems and, ultimately, contribute to sustainable environmental development.

Citation: Hosseini, B., & Yousefi Robiat, E. (2025). The application of artificial intelligence and decision support systems in urban environmental planning. *Innovative Approaches in Human–Environment Studies*, 2(2), 99-110.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045796.1063>

© 2025 Authors, Innovative Approaches in Human–Environment Studies.

Publisher: The Organization for Researching and Composing University Textbooks in the Islamic Science and Humanities (SAMT)

مقدمه

توسعه انسانی به‌طور فزاینده‌ای به محیط طبیعی پیرامون وابسته شده و ممکن است در آینده به دلیل تخریب‌های محیط‌زیستی محدود شود. افزایش جمعیت، شهرنشینی و صنعتی شدن که سیاره ما در این قرن با آن مواجه بوده است، جامعه را به این تأمل واداشته که آیا انسان‌ها شرایط ضروری برای حیات بر روی زمین را تغییر داده‌اند یا خیر. دانش محیط‌زیست، به‌عنوان یک حوزه میان‌رشته‌ای به بررسی تأثیرات انسان بر فرآیندهای محیطی می‌پردازد و هم فعالیت‌های انسانی و هم فرآیندهای محیطی را در نظر می‌گیرد (Uygun et al., 2024). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که محیط‌زیست یک سیستم پیچیده و پویاست که در آن جنبه‌های مختلف ممکن است به یک تأثیر مشابه منجر شوند (مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای که منجر به گرم شدن کره زمین می‌شود)، درحالی‌که برخی از اقدامات به‌صورت هم‌افزا عمل کرده و تأثیرات بسیار بزرگ‌تری از پیش‌بینی‌های معمول به‌همراه دارند (مانند واکنش دی‌اکسید نیتروژن و هیدروکربن‌ها که منجر به تولید اوزون تروپوسفری می‌شود)؛ بنابراین، برای ارزیابی دقیق تأثیرات این جنبه‌های مهم، تحلیل‌های بیشتری موردنیاز است. مسئله تغییرات جهانی پیچیده است و با تعاملات متعددی که در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف عمل می‌کنند، نمایان می‌شود. مواجهه با این مسائل نیازمند در نظر گرفتن تعاملات مرتبط بین انسان‌ها و محیط‌زیست به شکلی یکپارچه است (Uygun., 2024). فناوری‌های اطلاعاتی نقش مهمی در برنامه‌ریزی، پیش‌بینی، نظارت و کنترل فرآیندهای محیطی در مقیاس‌های مختلف و دوره‌های زمانی متنوع ایفا کرده‌اند. در همین زمان، سازمان‌ها، صنایع (مانند سازمان بین‌المللی استانداردسازی^۱ و طرح مدیریت و حسابرسی محیط‌زیست اروپا^۲) و دولت‌ها (همچون قانون سیاست محیط‌زیست ملی ایالات متحده) رابطه فعال‌تری با محیط‌زیست برقرار کرده‌اند و با تصویب قوانین مناسب، الزام به در نظر گرفتن اثرات محیط‌زیستی در فرآیندهای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری برای پروژه‌های بزرگ (مانند اجلاس کیوتو، دستور کار ۲۱ یا اعلامیه ریودوژانیرو) را مطرح کرده‌اند (Ostrom., 1990). در دو دهه اخیر، پیشرفت‌های فناوری اطلاعات و توسعه سخت‌افزارهای جدید، امکان ایجاد پیوندهای پژوهشی میان‌رشته‌ای بین دانشمندان محیط‌زیست و علوم رایانه را فراهم کرده و نتایج بسیار مثبتی به همراه داشته‌است.

یک حوزه جدید به نام "انفورماتیک محیط‌زیست" در حال ظهور است که ترکیبی از زمینه‌های تحقیقاتی مانند هوش مصنوعی، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی^۳، مدل‌سازی و شبیه‌سازی و واسطه‌های کاربری را در بر می‌گیرد. یکی از وظایف مهم و دشوار این حوزه جدید، تسهیل ادغام داده‌ها، اطلاعات و دانش از منابع مختلف در بخش محیط‌زیست است (Oguanobi et al., 2024).

هدف از این مطالعه بررسی نقش مؤثر هوش مصنوعی در توسعه ابزارهای نوین برای مدل‌سازی، طراحی، شبیه‌سازی، پیش‌بینی، برنامه‌ریزی و ایجاد سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری^۴ به‌منظور مدیریت و حفاظت از محیط‌زیست است. این تحقیق به دنبال تحلیل شیوه‌هایی است که هوش مصنوعی توانسته با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته، راه‌حل‌های عملی و مؤثری برای چالش‌های محیط‌زیست ارائه دهد. مشکلات محیط‌زیستی زیادی مانند آسیب به زیست‌کره، آلودگی هوای محلی، انتشار مواد مضر در آب و تغییرات آب‌وهوایی جهانی وجود دارند که نمی‌توان آن‌ها را از طریق آزمایش‌ها سنتی مطالعه کرد. به همین دلیل، مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای به‌عنوان ابزارهای مناسب برای درک بهتر این مشکلات به کار گرفته می‌شوند. فنون هوش مصنوعی که در حل مشکلات محیط‌زیستی به‌کاررفته‌اند، در سه دسته کلی سازمان‌دهی می‌شود:

1. International Organization for Standardization
2. Eco-Management and Audit Scheme
3. Geographic information system
4. Expanded Disability Status Scale

۱. تفسیر داده و داده کاوی: از ابتدا، تفسیر داده‌ها یکی از زمینه‌های اصلی تحقیق در حوزه هوش مصنوعی بوده است. بزرگ‌ترین چالش در زمینه ارزیابی‌های محیط‌زیستی، استخراج اطلاعات موردنیاز از داده‌های موجود است. این داده‌ها ممکن است از منابع و فرمت‌های مختلفی به دست آیند و اغلب به صورت ناهماهنگ و پراکنده باشند (Chakraborty et al., 2022). بازنمایی دانش به سیستم‌ها امکان می‌دهد تا انواع مختلف داده‌ها را تعریف و مدیریت کنند و همچنین با استفاده از الگوریتم‌های مناسب داده‌ها را به اطلاعات مفید تبدیل کنند. این کار نیازمند داشتن یک نظریه مناسب از حوزه کاربرد است. ممکن است لازم باشد مدل‌ها اندازه‌گیری و تعیین مقیاس شوند و الگوریتم‌ها تنظیم شوند. این وظایف نیازمند پردازش گسترده دانش و دسترسی به یک پایگاه مدل مناسب هستند. علاوه بر این، یکپارچه‌سازی داده‌ها به معنای غلبه بر ناهمگونی ناشی از انواع سیستم‌های داده، فرمت‌های مختلف داده و پروتکل‌های اسناد است. ابزارهای نرم‌افزاری و رابط‌های برنامه‌نویسی باید قادر به مدیریت این ناهمگونی‌ها باشند تا فرآیندهای داده کاوی و تحلیل داده به خوبی انجام شوند.

۲. تشخیص مشکل: بر اساس نظریه ارائه‌شده توسط سایمون، هر فرآیند تصمیم‌گیری شامل چهار مرحله اساسی است (Demigha, 2021). هوشمندی: در این مرحله اطلاعات موردنیاز برای فرآیند تصمیم‌گیری جمع‌آوری می‌شود و مسئله به دقت تعریف می‌شود. طراحی: در این مرحله، راه‌حل‌های متفاوت و امکان‌پذیر برای حل مسئله ایجاد و بررسی می‌شوند تا مشخص شود که هر راه‌حل چقدر به حل مشکل کمک می‌کند و چه هزینه‌ای در بر دارد. انتخاب: در این مرحله، بهترین راه‌حل از میان راه‌حل‌های موجود انتخاب و اجرا می‌شود. اجرا: در این مرحله، عملکرد راه‌حل نظارت و در صورت نیاز اصلاحات لازم انجام می‌شود.

۳. سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط‌زیستی: از روش‌های مختلفی برای تشخیص مشکلات استفاده می‌کنند. این روش‌ها شامل استفاده از سیستم‌های خبره (از الگوریتم‌های مبتنی بر قواعد ساده تا الگوریتم‌های پیشرفته منطق فازی) و نظریه‌های تجربی (بر اساس داده‌های آماری) هستند. همچنین ممکن است از شبکه‌های بی‌زنی و نظریه‌های فرآیندی استفاده شود که به سیستم‌ها کمک می‌کنند تا مشکلات محیط‌زیستی را به طور دقیق شناسایی و تجزیه و تحلیل کنند (Nyimbili et al., 2018).

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

همان‌طور که بیان شد، در این مقاله، هدف اصلی بررسی و مرور منابع و مطالعات اخیر در زمینه سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری مبتنی بر هوش مصنوعی است. این تحقیق به تحلیل پیشرفت‌های اخیر در این حوزه می‌پردازد و سعی دارد تأثیرات به کارگیری فنون هوش مصنوعی بر بهبود کیفیت تصمیم‌گیری‌ها در مسائل محیط‌زیستی را مشخص کند.

دو و همکاران در سال ۲۰۲۱ به نوآوری‌های جدید در استفاده از فناوری‌های نوین برای بهبود مدیریت کشاورزی، به ویژه در زمینه آبیاری و کوددهی، اشاره کردند. به طور خاص، این تحقیق به طراحی و توسعه یک سیستم کنترل آب و کود مبتنی بر آستانه هدایت الکتریکی خاک پرداخته است. در این سیستم، از شبکه‌های حسگر بی‌سیم با هزینه کم برای جمع‌آوری و انتقال داده‌ها استفاده می‌شود و این داده‌ها به یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری منتقل می‌شوند. سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری با در نظر گرفتن تغییرات هدایت الکتریکی خاک و محتوای رطوبت، به کاربر کمک می‌کند تا میزان دقیق آب و کود لازم را تنظیم کند و در نتیجه، دقت کوددهی افزایش می‌یابد. آزمایش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که این سیستم نسبت به روش‌های سنتی، به طور متوسط ۸۹٪، ۱۰٪ در مصرف کود صرفه‌جویی می‌کند و می‌تواند در طول دوره رشد کامل پنبه ۰٫۷۶ تا ۰٫۸۷ تن کود کمتری مصرف کند.

اسمیت و همکارانش (سال ۲۰۲۲) به بررسی استفاده از سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری مبتنی بر هوش مصنوعی^۱ در بهبود پایداری پروژه‌های ساختمانی پرداختند. در این تحقیق، از مرور سیستماتیک ادبیات علمی برای تحلیل استفاده از هوش مصنوعی در طول دوره زندگی پروژه‌های ساختمانی استفاده شد و اهداف اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی پایداری موردبررسی قرار گرفتند. از میان ۲۶۸۸ مقاله پژوهشی، ۷۷ مقاله به‌طور دقیق‌تر تحلیل شدند و نتایج نشان داد که بیشتر مطالعات بر پیش‌بینی مراحل اولیه پروژه (۵۰ درصد از مقالات) متمرکز هستند. شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی از محبوب‌ترین الگوریتم‌های مورد استفاده بودند. همچنین، نظریه‌های ترکیبی هوش مصنوعی در ۴۶ درصد از مقالات به کار گرفته شدند. اگرچه هدف پایداری اقتصادی در ۸۷ درصد از مقالات مطرح شده بود، اما شواهد نشان می‌دهند که توجه به اهداف محیط‌زیستی و اجتماعی در سال‌های اخیر افزایش یافته است.

جهانی و همکارانش (در سال ۲۰۱۹) در تحقیق خود به بررسی مدیریت فضای سبز پرداخته و از سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری برای طبقه‌بندی و اولویت‌بندی درختان پرخطر استفاده کردند. این پژوهش بر اساس مدل‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی^۲ و بررسی عوامل فیزیکی و بیولوژیکی مرتبط با احتمال شکست درختان، به‌ویژه درختان چنار (*Platanus orientalis*)، صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد که نظریه طبقه‌بندی خطر شکست درختان چنار از دقت بالایی برخوردار است. با استفاده از تحلیل حساسیت، تغییرات در عوامل درختی با حداکثر اولویت شناسایی شد که می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا خطر شکست درختان را کاهش دهند. در نهایت، این تحقیق یک سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط‌زیستی کاربردی را برای مدیران فضای سبز طراحی کرده است که به آن‌ها امکان می‌دهد تا معیارها را در خطر شکست درختان چنار اولویت‌بندی کنند و برنامه‌ریزی‌های بهینه‌ای برای کاهش خطر انجام دهند.

جهانی و همکاران (در سال ۲۰۱۶) به مدل‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی با استفاده از عوامل اکولوژیکی و مرتبط با تخریب جنگل پرداخته‌اند تا تخریب اکوسیستم را پیش‌بینی کنند و به این ترتیب تأثیرات محیط‌زیستی پروژه‌های جنگلی را به‌عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری محیطی ارزیابی کنند. نتایج شبکه چندلایه پیشرو که برای نظریه بهینه‌سازی تخریب جنگل آموزش دیده است، نشان می‌دهد که عملکرد مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد^۳ از سایر نظریه‌های تخریب بیشتر است. تغییرات در فعالیت‌های مدیریت جنگل با ارزش بالاتر در تحلیل حساسیت به مدیران جنگل کمک می‌کند تا تأثیرات محیطی مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد را کاهش دهند. این سیستم به‌عنوان یک سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط‌زیستی هوشمند، به تصمیم‌گیرندگان این امکان را می‌دهد که معیارهای مرتبط با تخریب جنگل را مدل‌سازی کرده و به برنامه‌ریزی بهینه تخصیص منابع بپردازند. با توجه به نتایج، رویکردهای تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی یک روش امیدوارکننده و قوی برای حل مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره^۴ به شمار می‌روند.

در تحقیقی که توسط دی و همکاران در سال ۲۰۱۹ انجام شد، رابطه بین آلاینده‌های پساب‌های صنعتی و کیفیت آب‌های سطحی در حوضه رودخانه یانگ تسه بررسی شد. این مطالعه نشان داد که اکثر پساب‌های صنعتی در چین بدون درمان مناسب به محیط‌های آبی تخلیه می‌شوند. با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین غیرنظارت شده، نتایج نشان داد که سایت‌های شدیداً آلوده دارای غلظت‌های بالای اکسیژن مورد نیاز شیمیایی و آمونیاک-نیتروژن هستند. این تحقیق به نقش مؤثر الگوریتم‌های یادگیری ماشین در تحلیل روابط بین آلاینده‌های پساب و آب‌های سطحی به‌عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری محیطی اشاره می‌کند.

1. artificial intelligence

2. Artificial Neural Networks

3. Orthogonal frequency-division multiplexing

4. Multi-Criteria Decision Analysis

پانتی و همکاران (سال ۲۰۱۶) در پژوهش خود از هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی مدیریت تقاضای آب^۱ استفاده کردند. آن‌ها یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری هوشمند طراحی کردند که با بهره‌گیری از رویکرد چندعاملی، به‌طور لحظه‌ای مقدار مناسب آب را از مخازن به نقاط مصرف منتقل می‌کند. این سیستم با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و فنون پیشرفته پیش‌بینی، به کاهش هزینه‌های مدیریت تقاضای آب کمک می‌کند. نتایج تحقیق نشان داد که این سیستم نه تنها می‌تواند به بهبود پیش‌بینی تقاضای آب کمک کند، بلکه هزینه‌های مربوط به پمپاژ و توزیع آب را نیز به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. روش چندعاملی هم چارچوبی مؤثر برای حل چالش‌های مربوط به مدیریت بهینه منابع آب ارائه داده‌است.

کاکلوسکاس و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی که انجام داده‌اند، به بررسی قابلیت هوش مصنوعی به‌عنوان نظریه-ای پیش‌بینی‌کننده برای تحلیل جامع آلودگی‌های محیطی در جنگل‌های حرا پرداخته شد. با توجه به نقش حیاتی جنگل‌های حرا به‌عنوان یکی از پربارترین اکوسیستم‌های زیستی جهان و تهدیدات ناشی از آلودگی‌های محیطی و تغییرات اقلیمی، این پژوهش به کمبود داده‌ها و شواهد کافی برای تحلیل و پیش‌بینی دقیق مشکلات محیطی اشاره کرد. محققان، نشانگرهای آلودگی در سه حوزه خاک، آب‌وهوا را بررسی و ارتباط آن‌ها را با پایداری اکوسیستم‌های حرا تحلیل کردند. نتیجه‌گیری این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از یک سیستم پیش‌بینی محیطی یکپارچه می‌تواند با ترکیب داده‌های هواشناسی، اقلیمی، هیدرولوژیکی و غلظت فلزات سنگین، به‌عنوان ابزاری مؤثر برای تصمیم‌گیری‌های محیط‌زیستی و کاهش آلودگی در این جنگل‌ها به کار گرفته شود.

روش پژوهش

یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری به‌عنوان یک ابزار مبتنی بر کامپیوتر طراحی شده است تا به مدیران پروژه در فرآیند تصمیم‌گیری در شرایط پیچیده کمک کند. سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری‌های اولیه معمولاً غیرفعال بودند و تنها دستورات صریح کاربر را اجرا می‌کردند و توانایی محدودی در تصمیم‌گیری داشتند؛ اما در سال‌های اخیر، ورود فنون هوش مصنوعی به این سیستم‌ها، توانایی‌های آن‌ها را به‌ویژه در صنعت ساخت‌وساز به طرز چشمگیری افزایش داده‌است. ساختار اصلی یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری شامل اجزای زیر است (Phillips et al., 2021):

۱. رابط کاربری: این بخش به کاربران امکان می‌دهد تا داده‌ها را برای تحلیل وارد کنند و نتایج یا توصیه‌ها را به‌صورت قابل فهم دریافت کنند.

۲. سیستم نرم‌افزاری: این بخش که به‌عنوان مغز سیستم عمل می‌کند، از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای انجام استدلال و محاسبات استفاده می‌کند. بدین ترتیب، با توجه به داده‌های تاریخی موجود در پایگاه دانش و داده‌های ورودی کاربر، تصمیمات یا راه‌حل‌هایی برای مشکلات ارائه می‌دهد.

۳. دانش‌محور: در این بخش، داده‌های تاریخی و منطق‌های تصمیم‌گیری مفید ذخیره می‌شوند تا از موتور استنتاج پشتیبانی کنند. این پایگاه دانش همچنین با دریافت اطلاعات جدید از تعاملات با کاربران و حل مسائل واقعی به‌روز می‌شود که به‌نوبه خود به افزایش پیچیدگی و هوش سیستم کمک می‌کند.

هوش مصنوعی به‌عنوان "نظریه و توسعه سیستم‌های کامپیوتری که قادر به انجام وظایفی هستند که معمولاً به هوش انسانی نیاز دارند، مانند درک بصری، تشخیص گفتار، تصمیم‌گیری و ترجمه بین زبان‌ها" تعریف می‌شود (Ertel., 2024).

استفاده از هوش مصنوعی در سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری، بهترین گزینه‌ها را برای تصمیم‌گیری فراهم می‌کند. یکی از روش‌های اصلی استفاده از هوش مصنوعی در این سیستم‌ها، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین است. با تحلیل داده‌های ذخیره‌شده، این الگوریتم‌ها می‌توانند الگوهایی را در میان اطلاعات مشاهده‌شده شناسایی کنند و بر اساس آن، تصمیم‌های بهتری را پیشنهاد دهند. یادگیری ماشین به‌عنوان یک حوزه کلیدی در هوش مصنوعی، به توسعه الگوریتم‌ها و سیستم‌های کامپیوتری می‌پردازد که می‌توانند از داده‌های تاریخی بهره‌برداری کرده و پیش‌بینی‌هایی را بدون نیاز به برنامه‌نویسی صریح انجام دهند. این فرآیند شامل چندین روش اصلی است (Chakraborty et al., 2022):

۱. یادگیری نظارت‌شده: این روش از داده‌های برچسب‌گذاری‌شده برای آموزش مدل استفاده می‌کند، به‌طوری‌که سیستم قادر به شناسایی روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌های مطلوب باشد.

۲. یادگیری بدون نظارت: در این نوع یادگیری، الگوریتم‌ها به تحلیل داده‌های بدون برچسب پرداخته و به شناسایی الگوها و ساختارهای داخلی موجود در داده‌ها می‌پردازند.

۳. یادگیری تقویتی^۱: این رویکرد بر مبنای یادگیری از تعامل با محیط استوار است، جایی که الگوریتم‌ها اقداماتی را انتخاب می‌کنند تا پاداش بیشتری کسب کنند و به‌این ترتیب، استراتژی‌های بهینه را توسعه دهند.

الگوریتم‌های متداول در یادگیری ماشین شامل رگرسیون خطی چندمتغیره^۲، رگرسیون لجستیک^۳، ماشین بردار پشتیبان^۴، درخت تصمیم‌گیری^۵، جنگل تصادفی^۶، استنباط بیزی^۷ و شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌شوند. این الگوریتم‌ها نقش بسزایی در تحلیل داده‌های پیچیده و استخراج اطلاعات مفید از آن‌ها دارند. پردازش زبان طبیعی^۸ یکی دیگر از حوزه‌های کلیدی در هوش مصنوعی و یادگیری ماشین است که به تعامل بین کامپیوترها و زبان انسانی می‌پردازد. درواقع، پردازش زبان طبیعی به ماشین‌ها توانایی می‌دهد تا زبان انسان را درک، تحلیل، تولید و پاسخ‌دهی کنند (Phillips et al., 2021).

این حوزه به طراحی و توسعه مدل‌های محاسباتی می‌پردازد که قابلیت‌های زبانی انسان‌ها را شبیه‌سازی کنند و شامل فرآیندهایی چون خواندن، نوشتن، شنیدن و گفتن است. پردازش زبان طبیعی به تبدیل زبان طبیعی به فرمی که برای کامپیوتر قابل خواندن باشد، کمک می‌کند و در زمینه‌های متنوعی از جمله رسانه‌های اجتماعی، خدمات مشتری، تجارت الکترونیک، آموزش، سرگرمی، مالی و بهداشت و درمان کاربردهای گسترده‌ای دارد (Hagiwara et al., 2021). در زمینه مدیریت پروژه‌های ساختمانی، پردازش مستندات تایپ‌شده و تولید گزارش‌ها می‌تواند به‌طور خودکار انجام شود و از طریق این فرآیند، دانش ارزشمندی استخراج گردد. به‌عنوان نمونه، ارزیابی گزارش‌های حوادث در صنعت ساخت‌وساز می‌تواند به شناسایی عوامل پیش‌آمده کمک کند و در نتیجه، به بهبود ایمنی و کاهش خطرات در پروژه‌های آینده منجر شود (Baker et al., 2020).

همچنین الگوریتم‌های تکاملی^۹ بخشی از هوش مصنوعی و زیرمجموعه‌ای از روش‌های بهینه‌سازی هستند، اما به‌طور خاص جزو الگوریتم‌های یادگیری ماشین به حساب نمی‌آیند، اگرچه در برخی موارد می‌توانند در کنار یادگیری ماشین مورد استفاده قرار گیرند.

این الگوریتم‌ها از فرآیندهای تکاملی طبیعی الهام گرفته‌اند و بر اساس اصولی مانند انتخاب طبیعی، جهش و ترکیب ژنتیکی عمل می‌کنند تا بهترین راه‌حل‌ها را برای مسائل پیچیده پیدا کنند. الگوریتم‌های تکاملی ابزاری هستند که

-
1. Reinforcement learning
 2. Multiple Linear Regression
 3. Logistic regression
 4. Support Vector Machine
 5. Decision Tree
 6. Random forest
 7. Bayesian inference
 8. Natural Language Processing
 9. Evolutionary Algorithms

ارتباطی میان بیولوژی، هوش مصنوعی، بهینه‌سازی عددی و پشتیبانی تصمیم‌گیری در زمینه‌های متنوع مهندسی برقرار می‌کنند. این الگوریتم‌ها از مدل‌های مبتنی بر تکامل ارگانیسم برای بهینه‌سازی هوشمند استفاده می‌کنند. فرآیند بهینه‌سازی هوشمند شامل جستجو برای بهترین نتیجه به منظور حداقل سازی یا حداکثر سازی یک تابع هدف تحت شرایط مشخص شده است (Pan et al., 2021).

یکی از نمونه‌های این نوع الگوریتم‌ها، الگوریتم ژنتیکی^۱ است. این الگوریتم می‌تواند برای بهینه‌سازی نتایج یک سیستم به کار گرفته شود و به بهبود عملکرد مدل در فرآیند تصمیم‌گیری در مدیریت پروژه‌های ساختمانی کمک کند. با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی، می‌توان به تحلیل دقیق‌تر و کارآمدتری از پارامترهای مختلف پروژه دست‌یافت و نتایج بهتری را در راستای تصمیم‌گیری‌های مؤثر و بهینه ارائه کرد (Sohail., 2023). در سال‌های اخیر، تحقیقات هوش مصنوعی بیشتر به سمت توسعه سیستم‌های مبتنی بر دانش^۲ معطوف شده است. هنگامی که سیستم مبتنی بر دانش برای مسائل محیط‌زیستی به کار برده می‌شود، از آن‌ها با نام‌های مختلفی مانند سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری، سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط زیستی یا سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری چندهدفه^۳ یاد می‌شود. سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری محیط‌زیست به عنوان فناوری‌هایی کلیدی در مدیریت مشکلات پیچیده محیط‌زیستی شناخته می‌شوند. این سیستم‌ها به طور خاص برای کمک به سازمان‌ها و ذینفعان در یافتن راه‌حل‌هایی برای چالش‌های محیطی طراحی شده‌اند. هدف اصلی سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری محیط‌زیست، تسهیل فرآیند تصمیم‌گیری با استفاده از داده‌ها و مدل‌های تحلیلی است تا تصمیم‌گیرندگان بتوانند گزینه‌های بهینه‌تری را در مواجهه با مشکلات پیچیده انتخاب کنند (Jahani et al., 2016).

سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری محیط‌زیست بر مبنای ترکیب داده‌های علمی و تجربی و به کارگیری روش‌های تحلیلی پیشرفته، از جمله مدل‌سازی، شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل حساسیت، طراحی شده‌اند. این سیستم‌ها به کاربران این امکان را می‌دهند که از طریق شفافیت در فرآیند تصمیم‌گیری، اطلاعات مربوط به گزینه‌های مختلف را بررسی کرده و تأثیرات هر گزینه را به دقت تحلیل کنند. یکی از مزایای کلیدی سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری محیط‌زیست، بهبود شفافیت در تصمیم‌گیری است. با فراهم کردن توضیحات منطقی و مستند برای تصمیمات، ذینفعان می‌توانند فرآیند تصمیم‌گیری را بازتولید کنند و با تغییر پارامترها، تأثیرات مختلف گزینه‌ها را بررسی کنند. این ویژگی به بهبود اعتماد عمومی و پذیرش تصمیمات کمک می‌کند. بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط ریزولی، سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط‌زیستی به دودسته اصلی تقسیم می‌شوند (Rizzoli., 1997):

سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری محیط‌زیست مشکل خاص: این سیستم‌ها برای حل مشکلات محیط‌زیستی خاص طراحی شده‌اند (برای مثال آلودگی آب یا مدیریت منابع طبیعی) اما می‌توانند در مکان‌های مختلف به کار گرفته شوند. سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری محیط‌زیست موقعیت و مشکل خاص: این سیستم‌ها به طور خاص برای یک مشکل محیط‌زیستی خاص در یک موقعیت جغرافیایی خاص طراحی شده‌اند. چنین سیستم‌هایی قابل انتقال به مکان‌های دیگر نیستند، در حالی که سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری محیط‌زیست مشکل خاص معمولاً می‌توانند در شرایط مختلف به کار گرفته شوند. در همان مطالعه، مجموعه‌ای از ویژگی‌های مطلوب برای یک سیستم ایده‌آل را معرفی می‌کنند. این ویژگی‌ها در هر سیستم مبتنی بر دانش کلاسیک یافت می‌شود. این ویژگی‌ها شامل:

۱. توانایی کسب، بازنمایی و ساختاردهی دانش: سیستم باید بتواند دانش مربوط به حوزه مورد مطالعه را به درستی ثبت و سازمان‌دهی کند.

1. Genetic Algorithm
2. Knowledge-Based System
3. Multi-Objective Programming Decision Support System

۲. توانایی تفکیک داده‌ها از مدل‌ها: تفکیک داده‌ها از مدل‌ها برای استفاده مجدد از مدل‌ها و نمونه‌سازی بسیار مهم است.

۳. مدیریت داده‌های مکانی: سیستم باید بتواند داده‌های جغرافیایی و مکانی را مدیریت کند که این ویژگی با ترکیب آن با سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی امکان‌پذیر می‌شود.

۴. ارائه دانش تخصصی: سیستم باید بتواند دانش تخصصی مربوط به حوزه مورد مطالعه را ارائه دهد.

۵. تشخیص، برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی: سیستم باید قادر باشد در فرآیند تشخیص مشکلات، برنامه‌ریزی برای حل آن‌ها و بهینه‌سازی منابع و فرآیندها کمک کند.

۶. کمک به کاربران در فرمول‌بندی مشکل و انتخاب روش‌های حل: سیستم باید کاربران را در تعریف مشکلات و انتخاب بهترین روش‌های حل مسئله یاری کند.

در این بخش، به بررسی برخی از کاربردهای سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط زیستی می‌پردازیم. این سیستم‌ها در طیف وسیعی از حوزه‌ها، از مدیریت منابع آب تا ارزیابی کیفیت هوا و پیش‌بینی آب‌وهوا، به کار گرفته شده‌اند.

دستیار عملیات و سیستم هوشمند شبیه‌سازی شده^۱: این سیستم هوش مصنوعی برای مدیریت آب در فلوریدای جنوبی طراحی شده است. دستیار عملیات و سیستم هوشمند شبیه‌سازی شده بیش از ۲۰۰ سازه آبی را در امتداد ۳۲۰۰ کیلومتر کانال اصلی در منطقه‌ای به وسعت ۴۶۰۰۰ کیلومتر مربع مدیریت می‌کند. این سیستم با استفاده از سیستم‌های خبره که با زبان List Processing نوشته شده‌اند، به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا مشکلات مربوط به مدیریت آب را حل کنند (Salmoral et al., 2019).

پیش‌بینی طوفان^۲: این سیستم هوش مصنوعی به‌طور خاص برای پیش‌بینی طوفان در شبه‌جزیره اسکاندیناوی طراحی شده است. از یک سری عوامل همکار استفاده می‌کند که به‌طور مداوم داده‌های آب‌وهوایی را از مناطق مختلف جمع‌آوری و پردازش می‌کنند. این سیستم به‌طور ویژه بر پیش‌بینی طوفان‌های شدید تمرکز دارد و به‌صورت محلی و منطقه‌ای اطلاعات را تحلیل می‌کند تا پیش‌بینی‌های دقیق ارائه دهد (Ovesen et al., 2021).

مدل ارزیابی کیفیت آب و خاک^۳: این ابزار به تحلیل کیفیت و کمیت منابع آب در یک حوزه آبخیز کمک می‌کند. مدل ارزیابی کیفیت آب و خاک می‌تواند تأثیرات استفاده از زمین، تغییرات آب‌وهوایی و دیگر عوامل محیط‌زیستی را بر کیفیت آب شبیه‌سازی و پیش‌بینی کند (Borrelli et al., 2021). این مثال‌ها تنها بخشی از کاربردهای موفق سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط زیستی هستند که به‌عنوان ابزارهای کلیدی در مدیریت و تحلیل داده‌های محیط‌زیستی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

یافته‌های پژوهش

این مقاله به‌مرور مطالعات و بررسی چگونگی استفاده از فنون هوش مصنوعی برای حل مسائل محیط‌زیستی و نحوه ایجاد فرصت‌های جدید برای طراحی و کاربرد ابزارهای هوش مصنوعی، به‌ویژه سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط زیستی، پرداخته است. بسیاری از این سیستم‌ها به‌ویژه برای ارزیابی اثرات محیط‌زیستی در زمینه‌های مختلف مانند کیفیت آب، پیش‌بینی طوفان و مدیریت منابع طبیعی به کار گرفته شده‌اند. در مقایسه با مرورهای پیشین، این مطالعه گامی بزرگ

به سمت توسعه کاربردهای عملی سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط زیستی است. تحقیقات مربوط به این سیستم به تدریج به یکی از اجزای اصلی ارزیابی‌های محیط زیستی تبدیل شده است و نیازمند همکاری میان‌رشته‌ای برای تطبیق با تغییرات سریع این حوزه است (Barreira et al., 2024).

یکی از نکات مهم در استفاده از فنون هوش مصنوعی در این حوزه، تکیه بر سیستم‌های مبتنی بر دانش است که در تشخیص سریع مشکلات و ارائه راه‌حل‌های مناسب کمک می‌کنند. همچنین، ادغام فنون مختلف هوش مصنوعی با مدل‌های عددی و آماری، دقت و کارایی سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری را افزایش داده است. در بسیاری از کاربردهای واقعی، این سیستم‌ها به عنوان ابزارهای اساسی برای تصمیم‌گیری بهتر به کار می‌روند (Oguanobi et al., 2024). کلید موفقیت سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری مبتنی بر رایانه، یکپارچه‌سازی منابع مختلف داده‌ها و مدل‌ها است. یک سیستم سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط زیستی یکپارچه می‌تواند با ترکیب مدل‌های شبیه‌سازی عددی، قوانین مبتنی بر دانش و داده‌های مکانی جغرافیایی، به حل مشکلات پیچیده محیط زیستی کمک کند. با این حال، تصمیم‌گیری نهایی همچنان به عهده انسان است و این سیستم‌ها تنها ابزارهایی برای کمک به تصمیم‌گیرندگان محسوب می‌شوند (Deloyde et al., 2023).

بحث و نتیجه‌گیری

سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط زیستی به عنوان ابزارهای مؤثر در مقابله با چالش‌های پیچیده محیط‌زیستی، نشان‌دهنده پیشرفت‌های قابل توجهی در عرصه مدیریت منابع طبیعی و ارزیابی ریسک هستند. این سیستم‌ها با ایجاد یک پایگاه داده جامع که شامل دانش محیط‌زیستی و اجتماعی-اقتصادی است، امکان تحلیل دقیق‌تر و تصمیم‌گیری بهینه‌تری را فراهم می‌آورند.

تحقیقات متعدد نشان می‌دهند که رویکرد مبتنی بر دانش در طراحی و توسعه این سیستم‌ها، نقش کلیدی در موفقیت آن‌ها ایفا می‌کند. به‌ویژه در مراحل کسب دانش، شناسایی فازهای کلیدی تصمیم‌گیری و طراحی گرافیکی، می‌تواند به طراحی سیستم‌های کاربرپسند و مؤثر کمک کند. با توجه به پیشرفت‌های پیش‌بینی‌شده در زمینه پایگاه‌های داده مکانی و فنون پیشرفته محاسباتی، انتظار می‌رود که سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط زیستی به زودی به ابزاری جامع‌تر و کارآمدتر تبدیل شود. با این حال، چالش‌های کلیدی مانند جلب مشارکت ذینفعان و طراحی سیستم‌های کاربرپسند نیازمند توجه بیشتری هستند. تحقیقات آینده باید بر روی توسعه مشارکت‌های فعال کاربران و افزایش اعتماد به این سیستم‌ها متمرکز شوند. این اقدامات نه تنها به افزایش کارایی این سیستم کمک می‌کند، بلکه به بهبود مدیریت مسائل محیط‌زیستی و تحقق اهداف پایدار توسعه نیز منجر خواهد شد. با در نظر گرفتن اهمیت سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط‌زیستی، تلاش برای ایجاد و تقویت آن‌ها باید در اولویت برنامه‌های مدیریتی و پژوهشی قرار گیرد. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و تحلیل داده‌ها در سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط زیستی کمک کند. این مطالعات به‌ویژه در حوزه‌های مدیریت منابع آبی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی به کاررفته و به توسعه مدل‌های هوشمند برای بهینه‌سازی تصمیم‌گیری‌های محیط‌زیستی منجر شده است (Jiang et al., 2023). مدل‌سازی سیستم‌های طبیعی و شبیه‌سازی رفتارهای اکوسیستم یکی دیگر از زمینه‌های تحقیقاتی فعال در سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط زیستی است. این مدل‌ها به محققان کمک می‌کنند تا تأثیرات مختلف سیاست‌ها و تغییرات محیط‌زیستی را بررسی کنند و استراتژی‌های مؤثری برای مدیریت منابع طبیعی پیشنهاد دهند (Peng et al., 2024). همچنین پژوهش‌ها نشان می‌دهند که یکی از چالش‌های اصلی در پذیرش سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط زیستی، عدم اطمینان و اعتماد کاربران به این سیستم‌هاست. مطالعاتی که در این زمینه

انجام‌شده، به شناسایی عوامل مؤثر بر پذیرش و استفاده از این سیستم پرداخته‌اند و به ارائه راهکارهایی برای جلب اعتماد کاربران و ذینفعان پرداخته‌اند (Zhen et al., 2021). برخی از پژوهش‌ها به مقایسه کاربرد سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری محیط زیستی در کشورهای مختلف پرداخته و به شناسایی بهترین شیوه‌ها و تجربیات موفق در این زمینه پرداخته‌اند. این مطالعات به تبادل دانش و تجربیات بین‌المللی کمک می‌کند و می‌تواند به بهبود طراحی و اجرای این سیستم‌ها در کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته منجر شود (Ogvanobi et al., 2024).

منابع

- Awad, A., & Fayek, A. R. (2012). A decision support system for contractor prequalification for surety bonding. *Automation in Construction*, 21, 89-98.
- Baker, H., Hallowell, M. R., & Tixier, A. J. P. (2020). Automatically learning construction injury precursors from text. *Automation in Construction*, 118, 103145.
- Barreira, A. P., Andraz, J., Ferreira, V., & Panagopoulos, T. (2023). Relevance of ecosystem services and disservices from green infrastructure perceived by the inhabitants of two Portuguese cities dealing with climate change: implications for environmental and intersectional justice. *Journal of Environmental Planning and Management*, 1-31.
- Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., ... & Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of the Total Environment*, 780, 146494.
- Chakraborty, S., Islam, S. H., & Samanta, D. (2022). Data classification and incremental clustering in data mining and machine learning. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.
- Chen, L., & Pan, W. (2021). Review fuzzy multi-criteria decision-making in construction management using a network approach. *Applied soft computing*, 102, 107103.
- DeLoyde, C. N., & Mabey, W. E. (2023). Ecosystem service values as an ecological indicator for land management decisions: A case study in southern Ontario, Canada. *Ecological Indicators*, 151, 110344.
- Demigha, S. (2021, June). Decision Support Systems (DSS) and Management Information Systems (MIS) in Today's Organizations. *European Conference on Research Methodology for Business and Management Studies (pp. 92-IX)*. Academic Conferences International Limited.
- Di, Z., Chang, M., Guo, P., Li, Y., & Chang, Y. (2019). Using real-time data and unsupervised machine learning techniques to study large-scale spatio-temporal characteristics of wastewater discharges and their influence on surface water quality in the Yangtze River Basin. *Water*, 11(6), 1268.
- Du, C., Zhang, L., Ma, X., Lou, X., Shan, Y., Li, H., Zhou, R. (2021). A cotton high-efficiency water-fertilizer control system using wireless sensor network for precision agriculture. *Processes*, 9, 1693.
- Ertel, W. (2024). Introduction to artificial intelligence. Springer Nature.
- Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., & Rockström, J. (2010). Resilience thinking: integrating resilience, adaptability, and transformability. *Ecology and Society*, 15(4).
- Hagiwara, M. (2021). Real-world natural language processing: practical applications with deep learning. Simon and Schuster.
- Jahani, A. (2019). Sycamore failure hazard classification model (SFHCM): An environmental decision support system (EDSS) in urban green spaces. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(2), 955-964.
- Jahani, A., Feghhi, M. F., Makhdoum, J., & Omid, M. (2016). Optimized forest degradation model (OFDM): An environmental decision support system for environmental impact assessment using an artificial neural network. *Journal of Environmental Planning and Management*, 59(2), 222-244.
- Jiang, J., Men, Y., Pang, T., Tang, S., Hou, Z., Luo, M., ... & Zheng, Y. (2023). An integrated supervision framework to safeguard the urban river water quality supported by ICT and models. *Journal of Environmental Management*, 331, 117245.
- Kaklauskas, A., Dzemyda, G., Tupenaite, L., Voitu, I., Kurasova, O., Naimaviciene, J., ... & Kanapeckiene, L. (2018). Artificial neural network-based decision support system for development of an energy-efficient built environment. *Energies*, 11(8), 1994.
- Lautenbach, S., Berlekamp, J., Graf, N., Seppelt, R., & Matthies, M. (2009). Scenario analysis and management options for sustainable river basin management: application of the Elbe-DSS. *Environmental Modeling and Software*, 24, 26-43.
- Nyimbili, P. H., Erden, T., & Karaman, H. (2018). Integration of GIS, AHP, and TOPSIS for earthquake hazard analysis. *Natural Hazards*, 92, 1523-1546.

- Ogvanobi, V. U., & Joel, O. T. (2024). Scalable business models for startups in renewable energy: strategies for using GIS technology to enhance SME scaling. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(5), 1571-1587.
- Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press.
- Ovesen, A. B., Nordmo, T. A. S., Johansen, H. D., Riegler, M. A., Halvorsen, P., & Johansen, D. (2021). File system support for privacy-preserving analysis and forensics in low-bandwidth edge environments. *Information*, 12(10), 430.
- Pan, Y., & Zhang, L. (2021). Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. *Automation in Construction*, 122, 103517.
- Peng, Q., Shen, L., Lin, W., Fan, S., & Su, K. (2024). Land-Use Transitions Impact the Ecosystem Services Value in a Coastal Region by Coupling the Geo-Informatic Tupu and Benefit-Transfer Method: The Case of Ningde City, China. *Applied Sciences*, 14(9), 3643.
- Phillips-Wren, G., Daly, M., & Burstein, F. (2021). Reconciling business intelligence, analytics, and decision support systems: More data, deeper insight. *Decision Support Systems*, 146, 113560.
- Ponte, B., De la Fuente, D., Parreño, J., & Pino, R. (2016). Intelligent decision support system for real-time water demand management. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 9(1), 168-183.
- Rizzoli, A. E., & Young, W. J. (1997). Delivering environmental decision support systems: software tools and techniques. *Environmental Modeling and Software*, 12, 237-249.
- Salmoral, G., Schaap, N. C., Walschebauer, J., & Al-Khateeb, J. (2021). Intelligent decision support systems for smart city development: A systematic review. *Environmental Impact Assessment Review*, 86, 106432.
- Shen, L., & Tam, V. W. Y. (2015). A review of the implementation of sustainability in construction projects in China. *Environmental Impact Assessment Review*, 55, 18-30.
- Sohail, A. (2023). Genetic algorithms in the fields of artificial intelligence and data sciences. *Annals of Data Science*, 10(4), 1007-1018.
- Smith, E. A., Horan, W. P., Demolle, D., Schueler, P., Fu, D. J., Anderson, A. E., ... & Alphs, L. D. (2022). Using artificial intelligence-based methods to address the placebo response in clinical trials. *Innovations in Clinical Neuroscience*, 19(1-3), 60.
- Thangamani, M. (2021). Role of big data and machine learning in sustainable agriculture: A review. *Data Science for Sustainable Development*, 1, 100-115.
- Torfi, K. A., & Amirteimoori, A. (2021). Decision making under fuzzy environments: applications in supply chain and logistics. *Springer, Berlin, Germany*.
- Uygun, D., Aktaş, I., Duygulu, İ., & Köseer, N. (2024). Exploring teachers' artificial intelligence awareness. *Advances in Mobile Learning Educational Research*, 4(2), 1093-1104.
- Wang, R., Zhang, L., & Wang, J. (2022). Artificial intelligence-assisted water resources management: A systematic review. *Water Resources Management*, 36(12), 4553-4572.
- Wang, X., Jin, J., & Zhu, H. (2021). Intelligent construction systems: An overview. *Automation in Construction*, 127, 103713.
- Wu, Y., Huang, S., Li, L., Zhang, J., & Hu, Y. (2023). A hybrid intelligent decision support system for transportation network resilience optimization. *Reliability Engineering & System Safety*, 235, 109575.
- Zhen, H., Gao, W., Yuan, K., Ju, X., & Qiao, Y. (2021). Internalizing externalities through net ecosystem service analysis—A case study of greenhouse vegetable farms in Beijing. *Ecosystem Services*, 50, 101323.
- Zhang, C., Cheng, X., & Zhang, Y. (2022). Machine learning-based decision support for smart water management: A review. *Water*, 14(8), 1162.



معیارهای مؤثر بر ارزیابی تاب‌آوری شهری در برابر تغییرات اقلیمی با روش تحلیل سلسله مراتبی

فرانک لک زاده^۱✉، احد ستوده^۲، پرستو پریور^۳، آفاق تابنده ساروی^۴

۱. کارشناسی ارشد، محیط زیست، منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران. نویسنده مسئول: lakzadefarank@gmail.com
۲. دانشیار، محیط زیست، منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
۳. استادیار، محیط زیست، منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
۴. استادیار، محیط زیست، منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌ها: دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۶	تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از چالش‌های بزرگ عصر حاضر، تأثیرات عمیقی بر ساختار و عملکرد شهرها دارند و تأکید بر لزوم افزایش تاب‌آوری شهری را دوچندان می‌کند. تاب‌آوری شهری به عنوان قابلیت یک شهر برای مقاومت، بهبود و بازایی در برابر بحران‌های محیطی و اجتماعی، در مقابل تغییرات اقلیمی، یک نیاز ضروری برای توسعه پایدار محسوب می‌شود. این پژوهش به شناسایی و تحلیل معیارهای مؤثر در تاب‌آوری شهری با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) پرداخته و به دنبال تعیین الویت‌های کلیدی برای بهبود تاب‌آوری در برابر اثرات منفی تغییرات اقلیمی می‌باشد. در این تحقیق، معیارهای کلیدی تاب‌آوری شامل: منابع آب، ساختار شهری، قوانین و مقررات، آموزش و آگاهی عمومی، شرایط اقلیمی، فضای سبز و وضعیت اقتصادی شناسایی شدند. برای جمع‌آوری داده‌ها، پرسشنامه‌هایی طراحی و بین کارشناسان حوزه برنامه ریزی محیط زیست توزیع گردید که منجر به ایجاد ماتریس‌های مقایسه زوجی و محاسبه وزن‌های نسبی برای هر یک از معیارها شد. نتایج این تحقیق نشان داد که برخی معیارها نسبت به دیگران تأثیر بیشتری در تقویت تاب‌آوری شهری دارند. به‌ویژه، معیارهای قوانین و مقررات، شفافیت و قابل فهم بودن و تغییر الگوی مصرف آب و سرمایه‌گذاری در آموزش عمومی به عنوان مهم‌ترین عوامل شناسایی شدند. پژوهش حاضر می‌تواند به عنوان راهنمایی برای تصمیم‌گیرندگان و برنامه‌ریزان شهری در طراحی و پیاده‌سازی استراتژی‌های مؤثر در راستای افزایش تاب‌آوری شهری در برابر چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی عمل نماید. این مقاله به عمیق‌تر کردن درک ما از تاب‌آوری شهری و نیاز به ایجاد یک رویکرد جامع و چندجانبه برای مدیریت بحران‌های ناشی از تغییرات اقلیمی کمک می‌کند و به اهمیت هم‌افزایی بین معیارهای مختلف تأکید دارد.
واژگان کلیدی: تغییر اقلیم معیار تاب‌آوری پرسشنامه AHP	

استناد: لک‌زاده، فرانک، ستوده، احد، پریور، پرستو، تابنده ساروی، آفاق (۱۴۰۴). معیارهای مؤثر بر ارزیابی تاب‌آوری شهری در برابر تغییرات اقلیمی با روش تحلیل سلسله مراتبی. *رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط*، ۲(۲)، ۱۱۱-۱۲۰.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045591.1060>

© ۱۴۰۴ (۲۰۲۶) نویسندگان مقاله، نشریه رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط، ناشر: سازمان مطالعه و تدوین کتب دانشگاهی در علوم اسلامی و انسانی (سمت).



Effective criteria on the assessment of urban resilience against climate change with the hierarchical analysis method

Frank Lakzadeh^{1✉}, Ahad Sotudeh², Parastoo Pariour³, Afaq Tabandeh Saravi⁴

1. Master of Science in Environmental Science, Natural Resources and Desert Studies, University of Yazd, Yazd, Iran.

Corresponding author: lakzadefarank@gmail.com

2. Associate Professor, Environmental Science, Natural Resources and Desert Studies, University of Yazd, Yazd, Iran.

3. Assistant Professor, Environmental Science, Natural Resources and Desert Studies, University of Yazd, Yazd, Iran.

4. Assistant Professor, Environmental Science, Natural Resources and Desert Studies, University of Yazd, Yazd, Iran.

Article Info

History

Received: January 07, 2026

Accepted: March 17, 2026

Keywords

Climate change

Criteria

Resilience

Questionnaire

AHP

Abstract

Climate change, as one of the great challenges of the present era, has profound effects on the structure and performance of cities, and emphasizes the need to increase urban resilience. Urban resilience, as the ability of a city to resist, improve, and recover from environmental and social crises, is considered an essential requirement for sustainable development in the face of climate change. This research identifies and analyzes effective criteria in urban resilience using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method and seeks to determine key priorities for improving resilience against the negative effects of climate change. In this research, key resilience criteria including: water resources, urban structure, laws and regulations, education and public awareness, climatic conditions, green space, and economic status were identified. To collect data, questionnaires were designed and distributed among experts in the field of environmental planning, which led to the creation of pairwise comparison matrices and the calculation of relative weights for each of the criteria. The results of this study showed that some measures have a greater impact than others in strengthening urban resilience. In particular, the measures of laws and regulations, transparency and understandability, changing water consumption patterns, and investment in public education were identified as the most important factors. The present study can serve as a guide for decision-makers and urban planners in designing and implementing effective strategies to increase urban resilience to the challenges of climate change. This article helps to deepen our understanding of urban resilience and the need to develop a comprehensive and multifaceted approach to managing crises caused by climate change, and emphasizes the importance of synergies between different measures.

Citation: Lakzadeh, F., Sotudeh, A., Pariour, P., & Tabandeh Saravi, A. (2025). Effective criteria on the assessment of urban resilience against climate change with the hierarchical analysis method. *Innovative Approaches in Human–Environment Studies*, 2(2), 111-120.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045591.1060>

© 2025 Authors, Innovative Approaches in Human–Environment Studies.

Publisher: The Organization for Researching and Composing University Textbooks in the Islamic Science and Humanities (SAMT)

مقدمه

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی در قرن حاضر، تأثیرات عمیق و گسترده‌ای بر ساختار و عملکرد شهرها دارد. این تغییرات، شامل افزایش دما، تغییر الگوهای بارش و وقوع حوادث طبیعی شدید، به تهدیدی جدی برای تاب‌آوری شهری تبدیل شده‌اند. تاب‌آوری شهری به توانایی شهرها در مواجهه، سازگاری و بهبود از تأثیرات منفی ناشی از تغییرات اقلیمی اشاره دارد و شامل فرایندهای مدیریت ریسک، برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی زیرساخت‌ها می‌شود. شناسایی و ارزیابی معیارهای مؤثر بر تاب‌آوری شهری از اهمیت بالایی برخوردار است. این معیارها می‌توانند شامل جنبه‌هایی چون منابع آب، ساختار، قوانین و مقررات، آموزش و آگاهی، اقلیم، فضای سبز و اقتصاد باشند (Naghbi, Faizi, & Ekhlassi, 2023). با استفاده از روش‌های تحلیلی مانند فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، امکان ارزیابی و اولویت‌بندی این معیارها وجود دارد که می‌تواند به درک بهتری از چگونگی تقویت تاب‌آوری شهری در برابر تغییرات اقلیمی کمک کند (Naseer, Song, Aslam, 2022). این مقاله به بررسی و تحلیل معیارهای مؤثر بر تاب‌آوری شهری می‌پردازد و با ارائه داده‌ها و تحلیل‌های لازم، راهکارهایی برای بهبود وضعیت تاب‌آوری در برابر چالش‌های اقلیمی ارائه خواهد کرد. هدف نهایی این تحقیق، ارتقاء کیفیت زندگی شهروندان و حفاظت از زیرساخت‌های شهری در برابر پیامدهای ناشی از تغییرات اقلیمی است.

ادبیات پژوهش

مفهوم تاب‌آوری شهری به دلیل مشکلات فزاینده‌ای که شهرهای سراسر جهان در مورد تغییرات آب و هوایی، بلایای طبیعی و حوادث غیرمترقبه با آن مواجه هستند، به عنوان یک موضوع بسیار مهم مطرح شده است. با توجه به روند سریع شهرنشینی در سرتاسر جهان، شهرها نقش برجسته‌ای در رویارویی با طیف گسترده‌ای از مسائل زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی ایفا می‌کنند (Zeng, Yu, Yang, Lv, & Sarker, 2022). اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد بر اهمیت تقویت ظرفیت تاب‌آوری شهرها تأکید نموده‌اند، بطوری که یک هدف اختصاصی، با عنوان ایجاد شهرها و سکونتگاه‌های انسانی فراگیر، ایمن، تاب‌آور و پایدار، در این مجموعه اهداف مشخص شده است. اهمیت تاب‌آوری شهری در افزایش زنده ماندن و بهبود کیفیت زندگی بلندمدت در شهرهای سراسر جهان به طور گسترده‌تری مورد پذیرش قرار گرفته است (Krellenberg, Bergsträßer, Bykova, 2019). چارچوب جهانی برای تاب‌آوری شهری اجرای برنامه‌های توسعه شهری و حکمرانی است که چندین ذینفع از بخش‌های عمومی، خصوصی و غیرانتفاعی را دربر می‌گیرد (Krellenberg et al., 2019). مطالعات نشان داده‌اند که اجرای اقدامات تاب‌آوری شهری به طور قابل توجهی بر کاهش آسیب‌پذیری و افزایش ظرفیت تاب‌آوری شهرها تأثیر می‌گذارد و بر پتانسیل آنها برای مقاومت و شکوفایی در مواجهه با انواع تغییرات تأثیرگذار است (Tong, 2021). در حقیقت، تاب‌آوری شهری به عنوان یک پارادایم حیاتی برای مدیریت موثر چالش‌های مرتبط با گسترش و پیچیدگی شهری ظاهر شده است (Chelleri & Baravikova, 2021). تاب‌آوری شهری به عنوان توانایی شهرها برای مقاومت موثر و بازایی از شوک‌ها و فشارهای مختلف و در عین حال تضمین تداوم عملیات حیاتی تعریف می‌شود (Meerow, Newell, & Stults, 2016). علاوه بر این، توانایی شهرها باید به گونه‌ای با اختلال‌های وارد بر محیط‌زیست تطبیق داده شود و تکامل یابد که پایداری شهر را تقویت کند. تاب‌آوری شهری فراتر از بازگشت به شرایط قبلی پس از تجربه شوک‌ها و فشارها است. همچنین شامل یادگیری از این رویدادها و قوی‌تر شدن و مجهز شدن برای رویارویی با مشکلات آینده است (Büyükközan, Ilıcak, & Feyzioğlu, 2022). اهمیت اقدامات تاب‌آوری شهری در طیف وسیعی از تکنیک‌های مدیریت شهرها دیده می‌شود. عوامل فوق شامل طیفی از استراتژی‌ها مانند طراحی شهری تاب‌آور، زیرساخت‌های سبز، توسعه ظرفیت جامعه، و تغییرات قانونی (Tyler & Moench, 2012) است. درک اثربخشی این تکنیک‌ها در کاهش حساسیت و تقویت ظرفیت انطباقی شهرها، علی‌رغم اهمیتشان، پراکنده و ناسازگار است در نتیجه نیاز به مجموعه‌ای از معیارهای منسجم دارد. استراتژی‌های تاب‌آوری شهری در اجرای مفهوم تاب‌آوری در محیط شهری از اهمیت بالایی برخوردار هستند (Kammouh, Zamani Noori, Cimellaro, & Mahin, 2019).

طیف متنوعی از سیاست‌ها، از جمله اقدامات زیرساخت فیزیکی و اجتماعی و نهادی فعالیت‌ها، نقش بسزایی در شکل‌گیری تاب‌آوری شهرها دارند. با اجرای اقداماتی برای کاهش آسیب‌پذیری، که به میزان مستعد بودن سیستم‌های شهری به شوک‌ها و عوامل استرس‌زا اشاره دارد، این تکنیک‌ها می‌توانند تاب‌آوری و دوام شهرها را بهبود بخشند (Tyler & Moench, 2012)، ارتقای انعطاف‌پذیری و خلاقیت و تسهیل تغییرات پایدار در مناطق شهری ممکن است با افزایش ظرفیت سازگاری سیستم‌های شهری محقق شود. از این رو، درک اثربخشی تکنیک‌های مختلف تاب‌آوری شهری برای تسهیل پیشرفت پایدار و تاب‌آور شهرهای جهانی بسیار مهم است. سیستم‌های شهری در حال حاضر تحت فشار قابل توجهی در نتیجه چندین چالش از جمله تغییرات آب و هوا، تخریب محیط زیست، رشد جمعیت، نابرابری‌های اجتماعی-اقتصادی و مسائل بهداشتی قرار دارند (Naghibi et al., 2023). ارزیابی اقدامات با هدف افزایش تاب‌آوری شهری، پتانسیل ارائه اطلاعات مفید در مورد مقرون به صرفه بودن روش‌های مختلف را دارد. این ممکن است شهرها را قادر سازد تا تصمیمات آگاهانه‌ای در مورد تخصیص منابع بگیرند و کارایی کلی را بهبود بخشند (Tyler & Moench, 2012). مفهوم تاب‌آوری شهری تکاملی است و به طور مداوم در طول زمان در حال تغییر بوده است. اثربخشی استراتژی‌های تاب‌آوری شهری ممکن است متفاوت باشد زیرا شهرها تحول‌های مختلفی را تجربه می‌کنند و با چالش‌های جدید مواجه می‌شوند. بنابراین، انجام منظم ارزیابی‌ها به منظور ارزیابی اثربخشی این رویکردها، شناسایی زمینه‌های آینده‌نگر برای بهبود، و تطبیق استراتژی‌ها مطابق با شرایط در حال تحول، بسیار مهم است. با وجود شناخت گسترده از اهمیت تاب‌آوری شهری، هنوز پیشرفت مداوم در عملیاتی کردن و بهبود تاب‌آوری به طور عملی وجود دارد (Kong, Mu, Hu, & Zhang, 2022). شهرهای مختلف تکنیک‌های متنوعی را اجرا کرده‌اند که تحت تأثیر تنظیمات، دشواری‌ها و قابلیت‌های متمایز آنهاست (Chou & Wu, 2014). با این وجود، درک کامل و منظمی از اثربخشی نسبی این تکنیک‌ها، شرایطی که در آنها بیشترین کارایی را دارند و دلایل زیربنایی کارآمدی آنها وجود ندارد. فقدان این شکاف اطلاعاتی ممکن است مانع از توانایی شهرها برای به دست آوردن بینش از تجربیات یکدیگر و اجرای موثر و اصلاح تاکتیک‌های موفق در شرایط منحصر به فرد آنها شود (Mirauda, Caniani, Colucci, & Ostoich, 2021).

در مطالعه حاضر، معیارهای موثر بر تاب‌آوری شهری در برابر تغییرات اقلیمی شناسایی می‌شود و اهمیت و کارایی آنها از نظر اثر بخشی در شهرهای ایران با روش تحلیل سلسله مراتبی مورد آزمون قرار می‌گیرد.

روش

روش تحلیل سلسله مراتبی (Analytic Hierarchy Process) AHP که توسط ساعتی (Saaty) توسعه یافته است، یک ابزار قدرتمند تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در کاربردهای متعدد در زمینه‌های مختلف اقتصاد، سیاست و مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. روش AHP این امکان را فراهم می‌کند که یک مقدار نشان‌دهنده درجه ترجیح برای یک جایگزین داده شده به هر جایگزین اضافی اختصاص داده شود. از چنین مقادیری می‌توان برای طبقه‌بندی و انتخاب گزینه‌ها بر اساس ساختار سلسله مراتبی استفاده کرد (Chai, Liu, & Ngai, 2013).

AHP فرآیند تصمیم‌گیری را در پنج مرحله پیشنهاد می‌کند:

۱. ساختارسازی سلسله‌مراتبی مسئله: در این مرحله، هدف اصلی، معیارها و زیرمعیارها و گزینه‌های موجود در یک ساختار سلسله‌مراتبی سازماندهی می‌شوند.
۲. مقایسه زوجی: معیارها و گزینه‌ها به صورت زوجی با هم مقایسه شده و اهمیت نسبی هر یک تعیین می‌شود. این مقایسه‌ها بر اساس مقیاس ۱ تا ۹ انجام می‌شود.
۳. محاسبه وزن معیارها و گزینه‌ها: پس از انجام مقایسه‌های زوجی، وزن نسبی هر معیار و گزینه محاسبه می‌شود و به صورت بردار وزنی ارائه می‌شوند.
۴. محاسبه نسبت ناسازگاری: در این مرحله، میزان ناسازگاری در داده‌های ورودی محاسبه می‌شود. اگر این میزان از حد مجاز بیشتر باشد، مقایسه‌های زوجی باید اصلاح شوند.

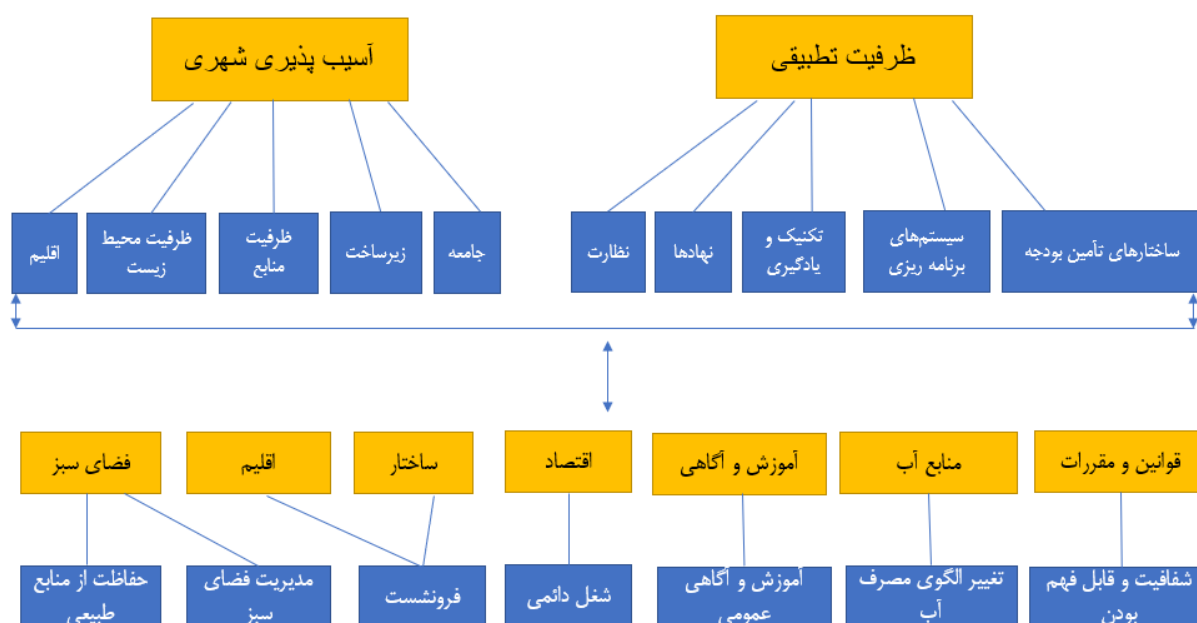
۵. رتبه‌بندی گزینه‌ها: در نهایت، گزینه‌ها بر اساس مجموع وزن‌های معیارها و زیرمعیارها رتبه‌بندی می‌شوند و بهترین گزینه انتخاب می‌شود.

۶. AHP توانایی ترکیب با سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره را نیز دارد. همچنین، می‌تواند در محیط‌های مبهم و نامطمئن نیز استفاده شود. مزایای AHP شامل سادگی، قابلیت درک و کاربرد گسترده در انواع مسائل تصمیم‌گیری است (Leal, 2019).

فرآیند انجام مطالعه

در مرحله اول معیارها و زیرمعیارهای تاب‌آوری شهری بر اساس مرور منابع جمع‌آوری شد. این معیارها و زیرمعیارها شامل:

- منابع آب (تغییر الگوی مصرف آب، مدیریت آب، ترویج استفاده از منابع آب پایدار، مدیریت بحران، کیفیت آب و میزان بارندگی)
- ساختار (معماری و طراحی منظر، زیرساخت‌های حمل‌ونقل، توسعه پایدار، مدیریت ریسک، مشارکت شهروندان، امکانات عمومی، توزیع فضایی و حفاظت از منابع طبیعی)
- قوانین و مقررات (تدوین و اجرای قوانین و مقررات مربوط، شفافیت و قابل‌فهم بودن، تعامل و مشارکت شهروندان و سازمان‌های مردم‌نهاد، ارتقاء استانداردها، تشویق به رعایت قوانین و مقررات، هماهنگی سیاست‌ها و برنامه‌ها و نظارت و اجرای قوانین)
- آموزش و آگاهی (ارتباطات و اطلاعات، ارزیابی و نظارت، همکاری و مشارکت و آموزش و آگاهی عمومی)
- اقلیم (آب‌وهوا، خشکسالی، سیل، فرونشست، ذرات معلق $pm_{2.5}$ ، انرژی و کمبود آب)
- فضای سبز (طراحی و برنامه‌ریزی فضای سبز، افزایش سطح فضای سبز، حفاظت از تنوع گونه‌ها، دسترسی به فضای سبز، مدیریت فضای سبز و ارتباط با فضای سبز)
- اقتصاد (کارآفرینی و نوآوری سبز، امنیت شغلی و کیفیت تولید)



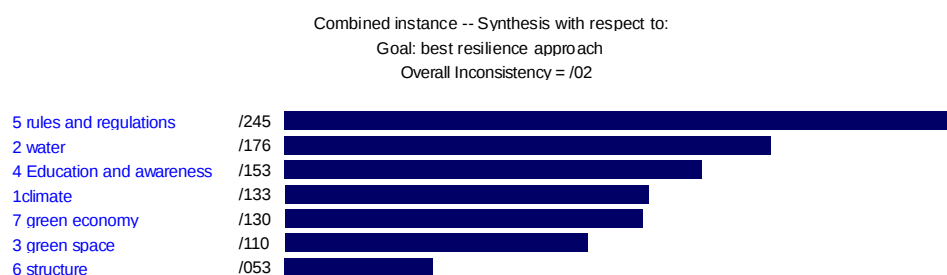
فلوجارت معیارها و زیرمعیارهای تاب‌آوری شهری

در مرحله دوم معیارها و زیر معیارها را به صورت گروهی در نرم افزار Expert choice وارد شد و پرسشنامه هایی از معیارها و زیر معیارها تهیه شد.

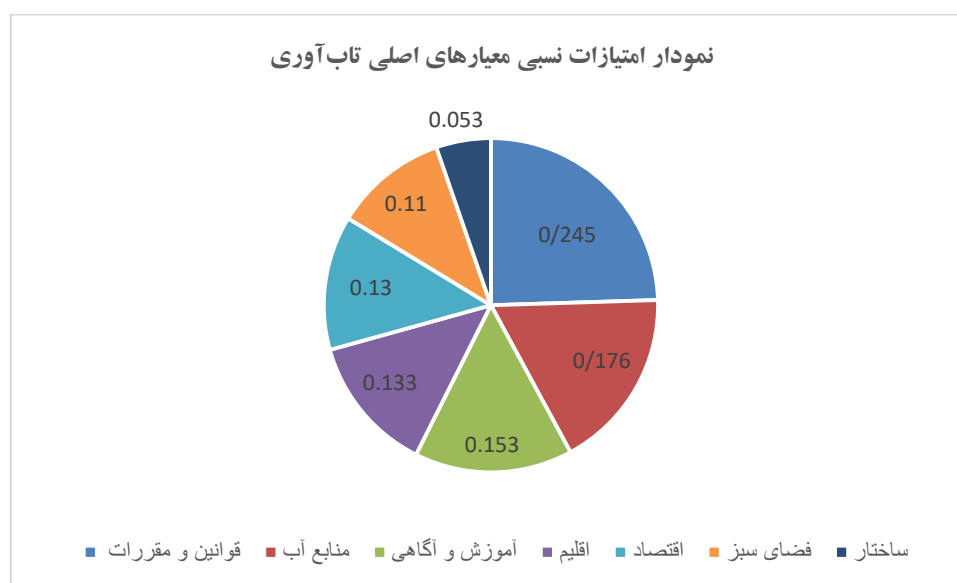
این تحقیق به منظور بررسی و تحلیل تاب آوری شهری، از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) بهره می برد. این روش به واسطه نمره دهی به معیارها و زیر معیارها با استفاده از مقادیر ۱ تا ۹ امکان مقایسه ی دقیق و نظام مند را فراهم می کند. بر این اساس، حجم نمونه این مطالعه به تعداد ۸ نفر تعیین گردید و پرسش نامه ای شامل ۸ مقیاس طراحی گردید. این پرسش نامه ها در اختیار کارشناسان و محققان گروه محیط زیست دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد قرار گرفت. انتخاب این کارشناسان بر مبنای تخصص و دانش عمیق آن ها در حوزه تاب آوری و تغییرات اقلیمی صورت گرفته است. این انتخاب موجب جمع آوری نظرات و ارزیابی های دقیق تری در این زمینه گردید. پس از گردآوری داده ها، نتایج به دست آمده از معیارها و زیر معیارها در نرم افزار Expert Choice وارد شد. سپس، فرآیند مقایسه های دو به دو میان معیارها و زیر معیارها در این نرم افزار آغاز گردید. در مرحله اول، مقایسه میان معیارهای اصلی تاب آوری و در مرحله دوم، مقایسه میان تمام زیر معیارهای تاب آوری انجام شد. در نتیجه، وزن های نهایی معیارها و زیر معیارها مشخص گردید.

نتایج

نتایج این بررسی نشان داد که بین هفت معیار اصلی تاب آوری، قوانین و مقررات با امتیاز ۰/۲۴۵ بیشترین، امتیاز را دارد و سپس به ترتیب معیارهای منابع آب با امتیاز ۰/۱۷۶، آموزش و آگاهی با امتیاز ۰/۱۵۳، اقلیم با امتیاز ۰/۱۳۳، اقتصاد با امتیاز ۰/۱۳۰، فضای سبز با امتیاز ۰/۱۱۰، ساختار با امتیاز ۰/۰۵۳ رده بندی شده اند. شکل ۱ امتیاز نهایی معیارهای اصلی تاب آوری در نرم افزار Expert choice را نشان می دهد.

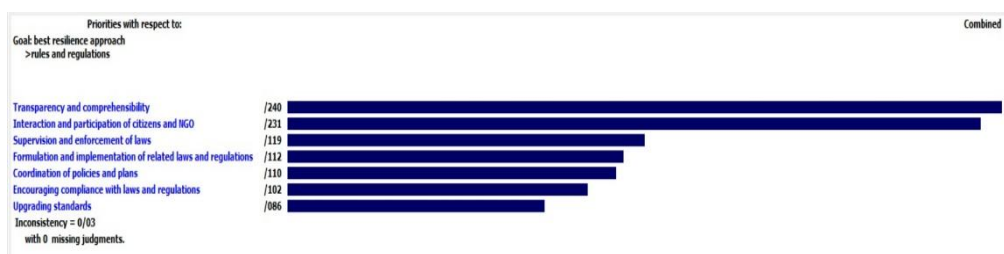


شکل ۱ امتیاز نهایی معیارهای اصلی تاب آوری در نرم افزار Expert choice



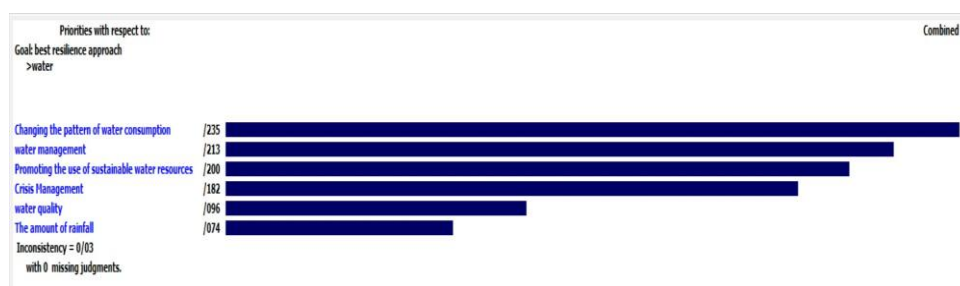
شکل ۲ نمودار امتیازات نسبی معیارهای اصلی تاب آوری شهر

در میان زیر معیارهای قوانین و مقررات زیر معیار شفافیت و قابل فهم بودن با امتیاز ۰/۲۴۰ بیشترین اهمیت، و سپس بترتیب زیر معیارهای تعامل و مشارکت شهروندان و سازمان های مردم نهاد با امتیاز ۰/۲۳۱، نظارت و اجرای قانون با امتیاز ۰/۱۱۹، تدوین و اجرای قوانین و مقررات مربوط با امتیاز ۰/۱۱۲، هماهنگی سیاست ها و برنامه ها با امتیاز ۰/۱۱۰، تشویق به رعایت قوانین و مقررات با امتیاز ۰/۱۰۲ و ارتقا استانداردها با امتیاز ۰/۰۸۶ هستند (شکل ۳).



شکل ۳ امتیاز نهایی زیر معیارهای قوانین و مقررات در نرم افزار Expert choice

در میان زیر معیارهای منابع آب، زیر معیار تغییر الگوی مصرف آب با امتیاز ۰/۲۳۵ بیشترین، و سپس به ترتیب زیر معیارهای مدیریت آب با امتیاز ۰/۲۱۳، ترویج استفاده از منابع آب پایدار با امتیاز ۰/۲۰۰، مدیریت بحران با امتیاز ۰/۱۸۲، کیفیت آب با امتیاز ۰/۰۹۶ و میزان بارندگی با امتیاز ۰/۰۷۴ رده بندی شدند (شکل ۴).



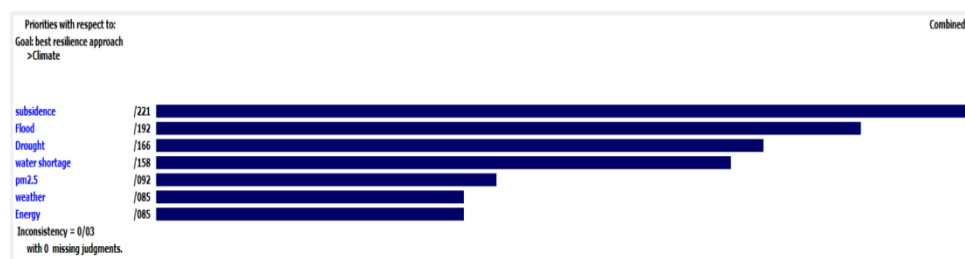
شکل ۴ امتیاز نهایی زیر معیارهای آب در نرم افزار Expert choice

در میان زیر معیارهای آموزش و آگاهی، زیر معیار آموزش و آگاهی عمومی با امتیاز ۰/۳۹۴ بیشترین، و سپس به ترتیب زیر معیارهای همکاری و مشارکت با امتیاز ۰/۳۰۳، ارزیابی و نظارت با امتیاز ۰/۱۷۳ و ارتباطات و اطلاعات ۰/۱۳۰ رده بندی شدند (شکل ۵).



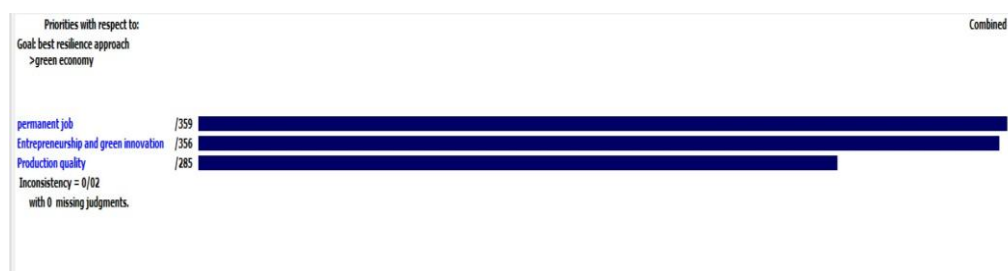
شکل ۵ امتیاز نهایی زیر معیارهای آموزش و آگاهی در نرم افزار Expert choice

در میان زیر معیارهای اقلیم، زیر معیار فرونشست با امتیاز ۰/۲۲۱ بیشترین، و سپس به ترتیب زیر معیارهای سیل با امتیاز ۰/۱۹۲، خشکسالی با امتیاز ۰/۱۶۶، کمبود آب با امتیاز ۰/۱۵۸، ذرات pm2.5 با امتیاز ۰/۰۹۲، آب و هوا با امتیاز ۰/۰۸۵ و انرژی با امتیاز ۰/۰۸۵ رده بندی شدند (شکل ۶).



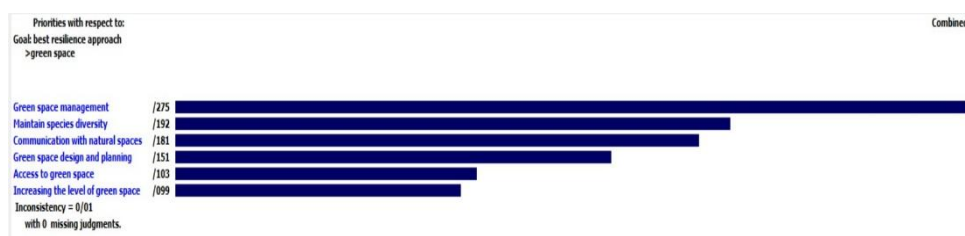
شکل ۶ امتیاز نهایی زیر معیارهای اقلیم در نرم افزار Expert choice

در میان زیر معیارهای اقتصاد، زیر معیار شغل دائمی با امتیاز ۰/۳۵۹ بیشترین، کارآفرینی و نوآوری های سبز با امتیاز ۰/۳۵۶ و کیفیت تولید با امتیاز ۰/۲۸۵ رده بندی شدند (شکل ۷).



شکل ۷ امتیاز نهایی زیر معیارهای اقتصاد در نرم افزار Expert choice

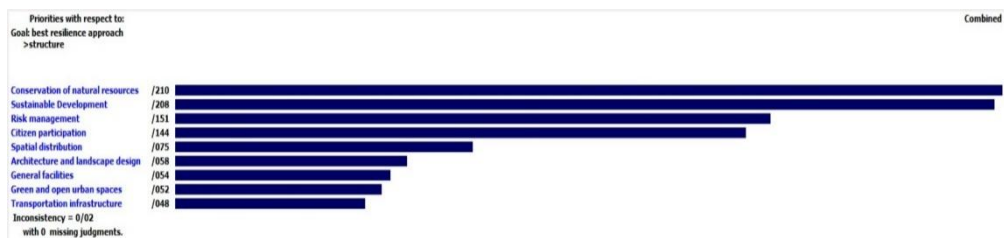
در میان زیر معیارهای فضای سبز، زیر معیار مدیریت فضای سبز با امتیاز ۰/۲۷۵ بیشترین، حفاظت از تنوع گونه ها با امتیاز ۰/۱۹۲، ارتباط با فضای سبز با امتیاز ۰/۱۸۱، طراحی و برنامه ریزی فضای سبز با امتیاز ۰/۱۵۱، دسترسی به فضای سبز با امتیاز ۰/۱۰۳ و افزایش سطح فضای سبز با امتیاز ۰/۰۹۹ رده بندی شدند (شکل ۸).



شکل ۸ امتیاز نهایی زیر معیارهای فضای سبز در نرم افزار Expert choice

در میان زیر معیارهای ساختار، زیر معیار حفاظت از منابع طبیعی با امتیاز ۰/۲۱۰ بیشترین، توسعه پایدار با امتیاز ۰/۲۰۸، مدیریت ریسک با امتیاز ۰/۱۵۱، مشارکت شهروندان با امتیاز ۰/۱۴۴، توزیع فضایی با امتیاز ۰/۰۷۵، معماری و

طراحی منظر با امتیاز ۰/۵۸، امکانات عمومی با امتیاز ۰/۵۴، فضای سبز و باز شهری با امتیاز ۰/۵۲ و زیر ساخت‌های حمل و نقل با امتیاز ۰/۴۸ رده‌بندی شدند (شکل ۹).



شکل ۹ امتیاز نهایی زیر معیارهای ساختار در نرم افزار Expert choice

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل نتایج پرسشنامه‌های جمع‌آوری شده و امتیازات معیارها و زیرمعیارها در نرم‌افزار Expert Choice، می‌توان نتیجه‌گیری کلی زیر را ارائه داد:

۱. در میان معیارهای اصلی تاب‌آوری شهری، "قوانین و مقررات" با بیشترین امتیاز ۰/۲۴۵ اهمیت بیشتری داشته است. این نشان می‌دهد که وضع و اجرای قوانین و مقررات مناسب از جمله مهمترین عوامل تقویت تاب‌آوری شهری محسوب می‌شود.

۲. در زیرمعیارهای "قوانین و مقررات"، "شفافیت و قابل فهم بودن" با بیشترین امتیاز ۰/۲۴۰ اهمیت بالایی دارد. این بیانگر نیاز به ارتقای شفافیت و قابل درک بودن قوانین و مقررات برای شهروندان است.

۳. در زیرمعیارهای "منابع آب"، "تغییر الگوی مصرف آب" با بیشترین امتیاز ۰/۲۳۵ حائز اهمیت است. این نشان می‌دهد که مدیریت مصرف آب و تغییر الگوی مصرف از جمله موارد کلیدی در تقویت تاب‌آوری شهری می‌باشد.

۴. در زیرمعیارهای "آموزش و آگاهی"، "گسترش و سرمایه گذاری روی بخش آموزش عمومی" با بیشترین امتیاز ۰/۳۹۴ اهمیت بسیار بالایی داشته است. این بیانگر نقش مهم آموزش و ارتقای آگاهی عمومی در افزایش تاب‌آوری شهری است.

۵. در مجموع، می‌توان گفت که قوانین و مقررات مناسب، مدیریت مصرف آب و ارتقای آگاهی عمومی از جمله عوامل کلیدی در تقویت تاب‌آوری شهری به شمار می‌روند و بایستی بر روی این موارد تمرکز بیشتری صورت گیرد. همچنین می‌توان از یافته‌های این تحقیق نتیجه گرفت: استفاده از نرم‌افزار تحلیل چندمعیاره Expert Choice برای تحلیل نتایج پرسشنامه‌ها و استخراج اولویت‌ها و امتیازات زیرمعیارها این رویکرد کمی و ابزارمند به تحلیل موضوع، کیفیت و اعتبار نتایج را ارتقا می‌بخشد.

۶. تمرکز بر چهار زیرمعیار کلیدی شناسایی شده (قوانین و مقررات، تغییر الگوی مصرف آب، آموزش عمومی) و برجسته کردن نقش و اهمیت هر یک در افزایش تاب‌آوری شهری. این تمرکز موضوعی، عمق و جزئیات بیشتری به تحلیل ارائه می‌دهد.

۷. ارائه نتیجه‌گیری جامع و کاربردی که بر اساس یافته‌های عملی و تحلیلی اولویت‌های اصلی را برای تقویت تاب‌آوری شهری مشخص می‌کند. این نتیجه‌گیری قابلیت اجرایی بیشتری نسبت به مقالات صرفاً توصیفی دارد.

۸. پرداختن به موضوع تاب‌آوری شهری که در سال‌های اخیر اهمیت روزافزون یافته است. این مقاله می‌تواند به عنوان یک مطالعه موردی درباره شهرهای ایران که درگیر تبعات تغییرات اقلیمی هستند به‌طور اختصاصی انجام شود.

منابع

- Büyükożkan, G., Ilıcak, Ö., & Feyzioğlu, O. (2022). A review of urban resilience literature. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103579.
- Chai, J., Liu, J. N., & Ngai, E. W. (2013). Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature. *Expert systems with applications*, 40(10), 3872-3885.
- Chelleri, L., & Baravikova, A. (2021). Understandings of urban resilience meanings and principles across Europe. *Cities*, 108, 102985.
- Chou, J.-S., & Wu, J.-H. (2014). Success factors of enhanced disaster resilience in urban community. *Natural hazards*, 74, 661-686.
- Kammouh, O., Zamani Noori, A., Cimellaro, G. P., & Mahin, S. A. (2019). Resilience assessment of urban communities. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 5(1), 04019002.
- Kong, L., Mu, X., Hu, G., & Zhang, Z. (2022). The application of resilience theory in urban development: a literature review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(33), 49651-49671.
- Krellenberg, K., Bergsträßer, H., Bykova, D., Kress, N., & Tyndall, K. (2019). Urban sustainability strategies guided by the SDGs—A tale of four cities. *Sustainability*, 11(4), 1116.
- Leal, J. (2019). AHP-express: A simplified version of the analytical hierarchy process method, *MethodsX*, 7: 100748. URL: [https://doi.org/10.1016/j.mex, 21](https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101661).
- Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). Defining urban resilience: A review. *Landscape and urban planning*, 147, 38-49.
- Miranda, D., Caniani, D., Colucci, M. T., & Ostoić, M. (2021). Assessing the fluvial system resilience of the river Bacchiglione to point sources of pollution in Northeast Italy: a novel Water Resilience Index (WRI) approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(27), 36775-36792.
- Naghbi, M., Faizi, M., & Ekhlasi, A. (2023). Mapping a framework for social–ecological resilience in reimagining of abandoned spaces. *Urban Design International*, 28(2), 122-140.
- Naseer, S., Song, H., Aslam, M. S., Abdul, D., & Tanveer, A. (2022). Assessment of green economic efficiency in China using analytical hierarchical process (AHP). *Soft computing*, 1-11.
- Tong, P. (2021). Characteristics, dimensions and methods of current assessment for urban resilience to climate-related disasters: A systematic review of the literature. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 60, 102276.
- Tyler, S., & Moench, M. (2012). A framework for urban climate resilience. *Climate and development*, 4(4), 311-326.
- Zeng, X., Yu, Y., Yang, S., Lv, Y., & Sarker, M. N. I. (2022). Urban resilience for urban sustainability: Concepts, dimensions, and perspectives. *Sustainability*, 14(5), 2481.



ارزش گذاری کمی نقش درختان شهری تهران در بهبود کیفیت هوا

ریحانه رسول زاده^۱ , نغمه مبرقی دینان^۲، حسن اسماعیل زاده^۳، یوسف رشیدی^۴

۱. دانشجوی دکترا، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. نویسنده مسئول: r.rasoolzadeh@gmail.com
۲. دانشیار، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۳. دانشیار، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۴. استادیار، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌ها: دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۷	درختان شهری با تاثیر بر اکوسیستم، نقش مهمی در بهبود کیفیت زندگی دارند. در کلان‌شهرهایی مانند تهران، درختان شهری عنصر مهمی برای کاهش آلودگی هوا محسوب می‌شوند. در این مطالعه، با بهره‌گیری از ابزار i-Tree Eco، عملکرد اکوسیستمی بهبود کیفیت هوا شامل زدایش آلاینده‌های شاخص (CO ، NO_2 ، SO_2 ، O_3 ، PM_{10} ، $\text{PM}_{2.5}$)، ترسیب دی‌اکسید کربن و تولید اکسیژن درختان شهری تهران در سال ۲۰۲۰ برآورد و با استفاده از روش انتقال منافع (Benefit Transfer) ارزش گذاری اقتصادی شده‌است. نتایج نشان می‌دهد، درختان شهری تهران سالانه حدود ۲۲۱۷۶۱/۷۲ تن از آلاینده هوا را حذف و دی‌اکسید کربن را ترسیب می‌کنند که ارزش اقتصادی آن در حدود ۲۱۵۵۹۲۴ دلار در سال است. همچنین، این درختان در همین بازه زمانی حدود ۱۶۰۲۷۳ تن اکسیژن تولید کرده‌اند که به دلیل فراوانی اکسیژن در جو (حدود ۲۱ درصد)، ارزش اقتصادی آن نادیده گرفته می‌شود. تحلیل نسبت زدایش آلاینده‌ها و CO_2 توسط درختان به کل انتشار آن‌ها، نشان از سهم محدود آن در بهبود کیفیت هوا دارد؛ از این‌رو، اتکا صرف به درختان به عنوان راهکار مقابله با آلودگی هوا و تغییرات اقلیمی کافی نیست بلکه تلفیق اقدامات مبتنی بر طبیعت با راهکارهای مدیریتی، ضرورت است. درختان شهری خدمات اکوسیستمی دیگری نیز دارند که کمی‌سازی و ارزش گذاری آن‌ها می‌تواند چشم‌انداز جامع‌تری از نقش واقعی این عناصر سبز در تاب‌آوری و پایداری شهر به‌دست دهد.

استناد: رسول‌زاده، ریحانه، مبرقی دینان، نغمه، اسماعیل‌زاده، حسن، رشیدی، یوسف (۱۴۰۴). ارزش گذاری کمی نقش درختان شهری تهران در بهبود کیفیت هوا. *رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط*، ۲(۲). ۱۴۲۱-۱۴۲۰.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2046747.1076>

© ۱۴۰۴ (۲۰۲۶) نویسندگان مقاله، نشریه رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط، ناشر: سازمان مطالعه و تدوین کتب دانشگاهی در علوم اسلامی و انسانی (سمت).



Quantitative evaluation of the role of urban trees in Tehran in improving air quality

Reyhaneh Rasoolzadeh ^{1✉} , Naghmeh Mobarghaee Dinan ², Hasan Esmailzadeh ³, Yousef Rashidi ⁴

1. Phd student, Environmental Science Research Institute (ESRI) Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Corresponding author: r.rasoolzadeh@gmail.com

2. Associate Professor, Environmental Planning Environmental Science Research Institute (ESRI) Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3. Associate Professor, Department of Environmental Planning and Design, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

4. Assistant professor, Department of Environmental Technology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Article Info

History

Received: November 16, 2025

Accepted: January 27, 2026

Keywords

Economic Valuation

Ecosystem Services

Urban Green Infrastructure.

Abstract

Urban trees play an important role in improving the quality of life by affecting the ecosystem. In big cities like Tehran, urban trees are an important element to reduce air pollution. In this study, using the i-Tree Eco tool, the ecosystem performance of air quality improvement, including the removal of key pollutants (CO, NO₂, SO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}) carbon dioxide deposition and oxygen production of urban trees in Tehran in 2020, has been estimated and economically valued using the Benefit Transfer method. The results show that Tehran's urban trees remove about 221,761.72 tons of air pollutants and sequester carbon dioxide, which has an economic value of about \$2,155,924 per year. Also, these trees have produced about 160,273 tons of oxygen in the same period of time, which due to the abundance of oxygen in the atmosphere (about 21%), its economic value is ignored. The analysis of the ratio of removal of pollutants and CO₂ by trees to their total emission shows its limited contribution in improving air quality; Therefore, relying only on trees as a solution to deal with air pollution and climate change is not enough, but it is necessary to combine nature-based measures with management solutions. Urban trees have other ecosystem services, whose quantification and valuation can provide a more comprehensive perspective of the real role of these green elements in the resilience and sustainability of the city.

Citation: Rasoolzadeh, R., Mobarghaee Dinan, N., Esmailzadeh, H., & Rashidi, Y. (2025). Quantitative evaluation of the role of urban trees in Tehran in improving air quality. *Innovative Approaches in Human–Environment Studies*, 2(2), 121-142. <https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2046747.1076>

© 2025 Authors, Innovative Approaches in Human–Environment Studies.

Publisher: The Organization for Researching and Composing University Textbooks in the Islamic Science and Humanities (SAMT)

مقدمه

شهرها در مقیاس‌های مختلف جهانی، ملی، منطقه‌ای و محلی، اثرات محیط زیستی متعددی دارند (Gómez- Baggethu & Barton., 2013). نرخ جمعیت، در بسیاری از کشورهای جهان به سرعت در حال افزایش است؛ به‌طوری‌که رشد جمعیت شهری از رشد کل جمعیت جهان پیشی گرفته، شهرنشینی را به یکی از مهم‌ترین پدیده‌های اجتماعی و محیط زیستی فعلی تبدیل کرده است (عباس زاده تهرانی و همکاران، ۱۴۰۲). اگرچه شهرنشینی موجب توسعه اقتصادی مناطق و بهبود شرایط زندگی انسان می‌شود، مدیریت نامناسب، پیامدهای محیط زیستی متعددی دارد. یکی از مهم‌ترین این پیامدها، آلودگی هوا است که نوعی تهدید محیط زیستی، برای رفاه و سلامت انسان شناخته می‌شود (WHO, 2016) آلودگی هوا در سال ۲۰۱۸ باعث مرگ و میر حدود ۵/۵ میلیون نفر شد (Landrigan et al., 2018).

بر اساس آمار سازمان ملل متحد (۱۹۵۰ تا ۲۰۱۸)، جمعیت شهری جهان با میانگین نرخ رشد سالانه ۲/۵۴ درصد، از حدود ۰/۸ میلیارد نفر به ۴/۲ میلیارد نفر افزایش یافته است (United Nations, 2019). با ادامه این روند، نرخ شهرنشینی می‌تواند از ۵۶ درصد در سال ۲۰۲۱ به ۶۸ درصد در سال ۲۰۵۰ برسد (Lisboa et al, 2024). جمعیت شهرنشین در ایران نیز، از ۳۱/۴ درصد در سال ۱۹۵۶ به ۷۴/۲۶ درصد در سال ۲۰۱۶ افزایش داشته است در این میان تهران، بزرگ‌ترین شهر خاورمیانه (Hosseini et al., 2022) از این روند مستثنی نیست، نرخ شهرنشینی در این شهر از ۴۷ درصد در سال ۱۹۷۶ به ۷۴ درصد در سال ۲۰۱۶ رسیده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). افزایش جمعیت این شهر را مشکلات محیط زیستی متعددی به ویژه آلودگی هوا روبرو کرده است. عوامل مختلفی مانند تردد بیش از ۷۰۰ هزار موتورسیکلت و ۳ میلیون خودرو، وجود ۱۷۰۰۰ واحد صنفی و صنعتی (معادل ۲۵ درصد صنایع کل کشور) و مصرف حدود ۲۰ درصد از کل انرژی کشور، نقش مهمی در افزایش آلودگی هوای شهر تهران داشته است (گزارش سالانه کیفیت هوا و صدای تهران در سال ۱۴۰۰، ۱۴۰۱). با وجود تلاش برای کاهش آلودگی هوا، همچنان جمعیت زیادی از شهروندان در معرض غلظت‌های خطرناک آلاینده‌های هوا قرار دارند. برای مثال، هوای شهر تهران در ۱۱۹ روز از سال ۱۴۰۲، در وضعیت نامطلوب قرار داشته است (گزارش سالانه کیفیت هوا و صدای تهران در سال ۱۴۰۲، ۱۴۰۳).

ارزش‌گذاری اقتصادی خدمات اکوسیستمی، یکی از ابزارهای مهم در ارزیابی منافع مستقیم و غیرمستقیم طبیعت است که، می‌تواند نقش مؤثری در حفاظت محیط زیست، مدیریت منابع طبیعی و توسعه پایدار شهری داشته باشد (Ma et al., 2019). سیاست‌گذاران و مدیران شهری برای مقابله با آلودگی هوا عمدتاً بر راهکارهای فنی و مهندسی تمرکز دارند (Baró et al., 2014) آنها به پتانسیل زیرساخت‌های سبز شهری در ارائه خدمات اکوسیستمی تنظیمی، مانند بهبود کیفیت هوا توجهی ندارند (Escobedo et al., 2011; Nowak et al., 2006). با وجود اهمیت این موضوع، تاکنون اطلاعات جامع و دقیقی درباره ارزش اقتصادی خدمات اکوسیستمی درختان شهری تهران ارائه نشده است. این امر، ضرورت انجام پژوهشی که به این مهم پردازد را دوچندان می‌سازد.

با توجه به تاثیر فضای سبز در بهبود کیفیت هوا و سلامت عمومی، ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستمی درختان شهری، می‌تواند ابزار مهمی برای سیاست‌گذاران و برنامه ریزان شهری برای طراحی مناسب توسعه پایدار در مشکلات محیط زیستی باشد. نتایج این پژوهش، بنای علمی برای توسعه طرح‌های محیط زیستی و سیاست‌گذاری‌های آینده در زمینه گسترش و حفاظت از فضای سبز شهری را فراهم آورد. از این رو، هدف اصلی این مقاله کمی‌سازی و ارزش‌گذاری عملکرد اکوسیستمی تنظیمی بهبود کیفیت هوا است که شامل حذف آلاینده‌های شاخص هوا، ترسیب و ذخیره کربن و تولید اکسیژن توسط درختان شهری تهران با استفاده از مدل i-Tree Eco است.

مبانی نظری

زیرساخت‌های سبز شهری، جزئی اساسی در اکوسیستم شهری هستند که خدمات اکوسیستمی متنوعی از جمله بهبود کیفیت هوا را به ساکنین شهرها ارائه می‌دهند (Ostad-Ali Askari and Shayannejad, 2021; Jim and Chen, 2009). در سال ۲۰۰۵، نخستین سیستم جامع ارزیابی اکوسیستم‌ها در مقیاس بزرگ در گزارش ارزیابی اکوسیستم هزاره^۱ معرفی شد (MEA, 2005). در این گزارش، طبقه‌بندی انواع خدمات (عملکردها) اکوسیستمی به چهار دسته اصلی تولیدی^۲، حمایتی^۳، تنظیمی^۴ و فرهنگی^۵ پیشنهاد شد (Kumar, 2012). فضای سبز شهری از طریق تصفیه هوا (عملکرد اکوسیستمی تنظیمی)، تولید اکسیژن (عملکرد اکوسیستمی تولیدی) و جذب کربن (عملکرد اکوسیستمی تنظیمی) محیط زیست و اقلیم محلی را بهبود بخشد (مربعی و همکاران، ۱۳۸۸، Li et al., 2021; Talebmorad et al., 2021). از این‌رو، زیر ساخت‌های سبز شهری نقش مهمی در پایداری محیط شهری و بهبود کیفیت زندگی شهروندان دارند (Kabisch et al., 2015).

مطالعات زیادی درباره کمی‌سازی و ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستمی درختان شهری انجام شده‌است در این مطالعات از روش‌ها و مدل‌های مختلفی مانند روش‌های آزمایشگاهی (کشلو و اقتصادی، ۱۳۹۰؛ آزموده و حیدری، ۱۳۹۳؛ Ryu et al., 2019)، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (Hirabayashi, 2021) و مدل‌های مختلفی مانند PARS TAC (محاسبه گر کیفیت هوا مبتنی بر رویکرد مدل‌سازی مبتنی بر جز^۶ که مدل پیشین i-Tree است) (Motesadi-Zarandi et al., 2015)، UFORE (Yang et al., 2005; Chaparro & Terrasdas, 2009) و i-Tree (Riondato et al., 2020) برای کمی‌سازی عملکرد اکوسیستمی ارتقا کیفیت هوا به وسیله درختان شهری استفاده شده‌است، لیکن در سال‌های اخیر مدل Tree-محبوبیت بیشتری یافته و در مطالعات بسیاری در سرتاسر جهان به کار رفته‌است (Li et al., 2025; Song et al., 2020; Watson & Bai, 2025; Lin et al., 2020; Yao et al. 2022).

نواک و همکاران در سال ۲۰۱۳ نقش درختان و جنگل‌های شهری منطقه شیکاگو را به کمک مدل i-Tree مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیقات نشان داد که ۱۵۷,۱۴۲,۰۰۰ درخت و درختچه با پوشش کانوپی ۲۱ درصدی در منطقه مطالعاتی وجود دارد. این تعداد درخت سالانه حدود ۱۸,۰۸۰ تن از آلاینده‌های هوا را به ارزش ۱۳۷ میلیون دلار حذف می‌کنند (Nowak et al., 2013). همچنین در همین سال، نواک و همکاران، مدل سازی حذف PM_{2.5} توسط درختان را در ده شهر از ایالات متحده بررسی کردند. بر اساس نتایج مشخص شد که مقدار کل سالانه حذف PM_{2.5} توسط درختان از ۷,۴ تن تا ۵,۶۴ تن متغیر است. از این رو، میانگین سالانه بهبود کیفیت هوا در بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ بین ۰/۰۵٪ در سانفرانسیسکو و ۰/۲۴٪ در آتلانتا متفاوت بود. بر اساس نتایج آن‌ها، درک تأثیرات درختان شهری بر کیفیت هوا می‌تواند منجر به بهبود استراتژی مدیریت جنگل شهری برای حفظ سلامت انسان شود (Nowak et al., 2013). نواک و همکاران در سال ۲۰۰۶ حذف آلاینده‌های هوا توسط درختان و درختچه‌های شهری ایالات متحده را بررسی و میزان آن را حدود ۷۱,۱۰۰ تن در سال با ارزش ۳/۸ میلیارد دلار برآورد کردند (Nowak et al., 2006).

1. Millennium Ecosystem Assessment (MEA)
2. Providing Services
3. Supporting Services
4. Regulating Services
5. Cultural Services
6. Component-based modeling approach

مطالعات تلفیقی اثرات درختان بر آلودگی هوا نشان می‌دهد که مدیریت شهری درختان می‌تواند یک راهکار مناسب برای بهبود کیفیت هوا باشد و به رعایت استانداردهای هوای پاک کمک کند. در سال ۲۰۱۵، واتکس و همکاران با استفاده از مدل i-Tree Eco دو عملکرد اکوسیستمی تنظیمی ترسیب کربن و حذف آلاینده‌های هوا درختان شهری مرکز شهر سگد^۱ مجارستان را بررسی کردند. در این پژوهش بعد از تعیین خصوصیات ساختاری جنگل شهری، میزان حذف آلاینده‌های هوا و ترسیب کربن برای گونه‌های مختلف درختی در منطقه برآورد شد. سرانه سالیانه حذف آلاینده‌های هوا را برای هر درخت بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ گرم تخمین زدند (Watkiss et al., 2015). مک پرسون و همکاران نیز در سال ۲۰۱۷، ساختار، عملکرد و ارزش جنگل‌های شهری را در جوامع کالیفرنیا بررسی نمودند.

پژوهش حاضر بر اساس دستورالعمل i-Tree Eco، ۷۰۳ پلات انتخاب و بررسی شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد، درختان شهری در سال به طور خالص ۳۵۳۷ تن از آلاینده‌های هوا را جذب می‌کنند (McPherson et al., 2017). برای برآورد و کمی‌سازی عملکرد اکوسیستمی ارتقا کیفیت هوا از مدل i-Tree ECO استفاده شد. این مدل جامع‌ترین ابزار در مجموعه مدل‌های i-Tree به شمار می‌آید و در میان چندین ابزار تحلیلی و برنامه‌های کاربردی آن (i-Tree canopy, i-Tree Pest Detection Module)، مناسب‌ترین ابزار برای تعیین نقش زیرساخت‌های سبز شهری در ارتقاء کیفیت هوا است. i-Tree یک نرم‌افزار به روز و دقیق است که به وسیله سرویس جنگل دپارتمان کشاورزی ایالات متحده^۲ برای ارزیابی ساختار جنگل‌های شهری و خدمات اکوسیستمی آن‌ها توسعه یافته است (i-Tree Eco User's Manual, 2019). i-Tree Eco یک مدل انعطاف پذیر است که با استفاده از داده‌های حاصل از مطالعات میدانی مربوط به جنگل‌های شهری و داده‌های ساعتی هواشناسی و آلودگی هوا، ساختار جنگل شهری و خدمات اکوسیستمی آن را کمی‌سازی می‌کند (i-Tree Eco User's Manual, 2019).

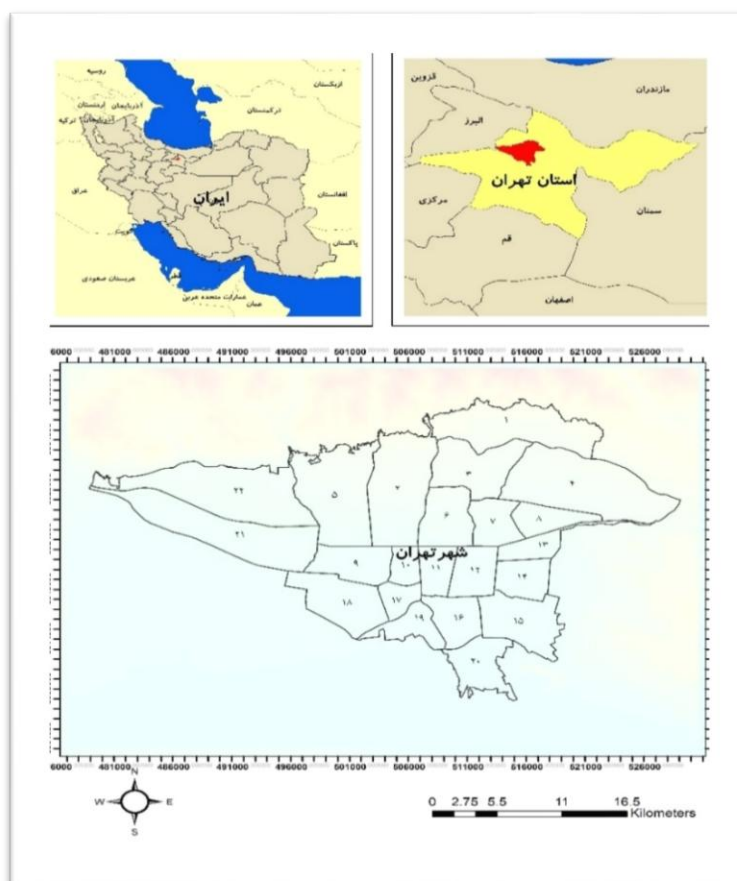
مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

منطقه مطالعاتی در این پژوهش، شهر تهران (نواحی ۲۲ گانه) است (شکل ۱). شهر تهران با مساحتی در حدود ۶۰,۰۰۰ هکتار و جمعیتی در حدود ۱۳ میلیون نفر، تقریباً در قسمت مرکزی ایران (۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه شمالی، ۵۱ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی) واقع شده است (رجایی، ۱۳۹۷). از شمال به دامنه جنوبی رشته کوه البرز و از جنوب به حاشیه شمالی کویر مرکزی ایران محدود می‌شود. از آن‌جا که شهر تهران از موقعیت جغرافیایی خاصی برخوردار است (ارتفاع این شهر در شمال ۱۷۰۰ متر، در نواحی مرکزی ۱۲۰۰ متر و در جنوب ۱۱۰۰ متر است)، شرایط اقلیمی متفاوتی، از نیمه مرطوب در شمال تا خشک و نیمه خشک در جنوب دارد (سالنامه آماری تهران، ۱۴۰۱).

1. Szeged

2. United States Department of Agriculture



شکل ۱ موقعیت شهر تهران

روش شناسی

- کمی سازی عملکرد اکوسیستمی بهبود کیفیت هوا (زدایش آلاینده های هوا، ذخیره و ترسیب کربن، و تولید اکسیژن)

برای کمی سازی خدمات اکوسیستمی حذف آلاینده های هوا، ذخیره و ترسیب کربن و تولید اکسیژن توسط درختان شهری تهران از نرم افزار i-Tree Eco استفاده شد. i-Tree Eco جامع ترین ابزار در مجموعه i-Tree است و در میان ابزارهای تحلیلی و کاربردی مختلف این مجموعه (مانند i-Tree canopy, i-Tree Pest Detection Module)، مناسب ترین گزینه برای ارزیابی نقش درختان شهری در بهبود کیفیت هوا است. از آن جا که i-Tree Eco نخستین بار در ایالات متحده آمریکا توسعه یافته است، به کارگیری آن در خارج از مرزهای این کشور نیازمند انجام برخی اقدامات مقدماتی و تطبیق با شرایط بومی است. بر همین اساس، در این مطالعه با پیروی از دستورالعمل های مربوطه i-Tree Eco برای شهر تهران بومی سازی و اجرا شد (Parsa et al., 2019; i-Tree Eco User's Manual, 2019). شکل ۲، مراحل پنجگانه اجرای i-Tree Eco برای کمی سازی عملکرد اکوسیستمی بهبود کیفیت هوا در خارج از مرزهای ایالات متحده را نشان می دهد. لازم به ذکر است پس از مرحله سوم یعنی جمع آوری میدانی داده ها، آنها به بخش Plot Sample نرم افزار جهت اجرای مدل وارد شدند.



شکل ۲ مراحل پنجگانه اجرای مدل i-Tree Eco جهت کمی‌سازی خدمات اکوسیستمی در خارج از مرزهای ایالات متحده (منبع: i-Tree Eco User's Manual, 2019)

-زدایش آلاینده‌های هوا

- کمی‌سازی بیوفیزیکی

مقدار حذف آلاینده‌های شاخص هوا ($PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , SO_2 , NO_2 , CO)، در ابزار i-Tree Eco، تحت شرایط غیر بارشی، از طریق مدل فرونشست خشک و با بهره‌گیری از داده‌های آلودگی هوا، اقلیم و شاخص‌های ساختار جنگل شهری برای یک سال میلادی برآورد می‌شود (Parsa et al., 2019). در این برآورد، شار حذف آلاینده (F) بر حسب $g\ h^{-1}$ به عنوان نتیجه سرعت رسوب (V_d)؛ بر حسب $m\ s^{-1}$ و غلظت آلاینده (C) بر حسب $g\ m^{-3}$ مطابق معادله ۱ محاسبه می‌شود (Hirabayashi et al., 2015).

$$F = V_d \times C \times 3600 \quad \text{معادله ۱}$$

V_d برای آلاینده‌های O_3 ، SO_2 ، NO_2 ، به شکل معکوس مجموع مقاومت آئرونامیکی ($R_a\ (SM^{-1})$)، مقاومت لایه مرزی شبه آرام برای آلاینده ($R_b\ (SM^{-1})$) و مقاومت کانوپی ($R_c\ (SM^{-1})$) به شکل معادله ۲ برآورد می‌شود (Parsa et al., 2019):

$$V_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_c} \quad \text{معادله ۲}$$

لازم به ذکر است که سرعت رسوب در طی دوران بارش صفر فرض می‌شود (Nowak et al., 2006). برای $PM_{2.5}$ سرعت رسوب بر حسب سرعت باد و مساحت برگ برآورد می‌شود. میزان ارتقای ساعتی کیفیت هوا بر حسب واحد پوشش درختی از طریق فرونشست خشک آلاینده‌ها (I_{unit} بر حسب درصد) مطابق معادله ۳ محاسبه می‌شود (Hirabayashi et al., 2012). که در آن M_{Total} کل جرم آلاینده بر حسب واحد پوشش درختی (gm^2h^{-1}) است.

$$I_{unit} = \frac{F}{F + M_{total}} \times 100 \quad \text{معادله ۳}$$

F شار آلاینده ($gm^{-2}h^{-1}$) و M_{total} کل جرم آلاینده بر حسب واحد پوشش درخت ($gm^{-2}h^{-1}$) است. میزان ارتقا ساعتی کیفیت هوا بر کل پوشش درخت (I_{total}) (درصد) بر اساس معادله ۴ محاسبه می شود (Hirabayashi et al., 2015). در این معادله T_c کل درصد پوشش درختی محدوده مطالعاتی است.

$$I_{total} = \frac{F \times \frac{T_c}{100}}{F \times \frac{T_c}{100} + M_{total}} \times 100 \quad \text{معادله ۴}$$

- ترسیب و ذخیره کربن

کربن ذخیره شده در درخت معادل نصف زی توده برآورد شده درخت است. افزایش زی توده درخت، تعیین کننده میزان ترسیب کربن است (Nowak, 2019). مطابق معادله ۵، برای برآورد مقدار سالیانه ترسیب کربن، کربن ذخیره شده در سال فعلی از مقدار کربن ذخیره شده در سال قبل کم می شود (Crane and Nowak, J. D.; 2000, Nowak, 2002). مقدار ناخالص کربن ترسیب شده به میانگین رشد قطر درخت (که بر حسب زی توده در دسترس و طول فصل رشد، تعیین می شود)، طبقه قطر درخت، سلامت درخت و قرار گرفتن آن در معرض نور بستگی دارد (Crane and Nowak, J. D., 2002). مقدار کربن ذخیره شده درخت، مطابق معادله ۶ برآورد می شود. که در آن، ضریب کربن معمولاً برابر با ۰/۵ است. زی توده یک درخت را می توان با استفاده از معادلات آلومتریک برآورد کرد. این معادلات، زی توده را به پارامترهای قابل اندازه گیری درخت مانند قطر برابر سینه درخت (DBH)، ارتفاع و چگالی چوب مرتبط می کنند (Chow & Rolfe, 1989).

معادله ۵ کربن ذخیره شده در سال قبل - کربن ذخیره شده در سال فعلی = ترسیب سالانه کربن

معادله ۶ ضریب کربن × زی توده درخت = ذخیره کربن شده

- تولید اکسیژن

درخت در طی فرایند فتوسنتز، کربن دی اکسید (CO_2) را از اتمسفر جذب کرده و در مقابل اکسیژن را منتشر می کند. میزان اکسیژن تولید شده به میزان کربن ترسیب شده بستگی مستقیم دارد (Nowak, 2019). نسبت مقدار خالص اکسیژن تولید شده (کیلوگرم در سال) نسبت به مقدار خالص کربن ترسیب شده (کیلوگرم در سال) برابر است با ۲/۶۶ (یا $\frac{32}{12}$) (Nowak, 2007).

ارزش اقتصادی عملکرد اکوسیستمی تولید اکسیژن توسط جنگل شهری به دلیل ناچیز بودن مقدار آن در مقایسه با مقدار اکسیژن اتمسفر (حدود ۲۱ درصد حجم اتمسفر) صفر در نظر گرفته می شود (Nowak, 2019).

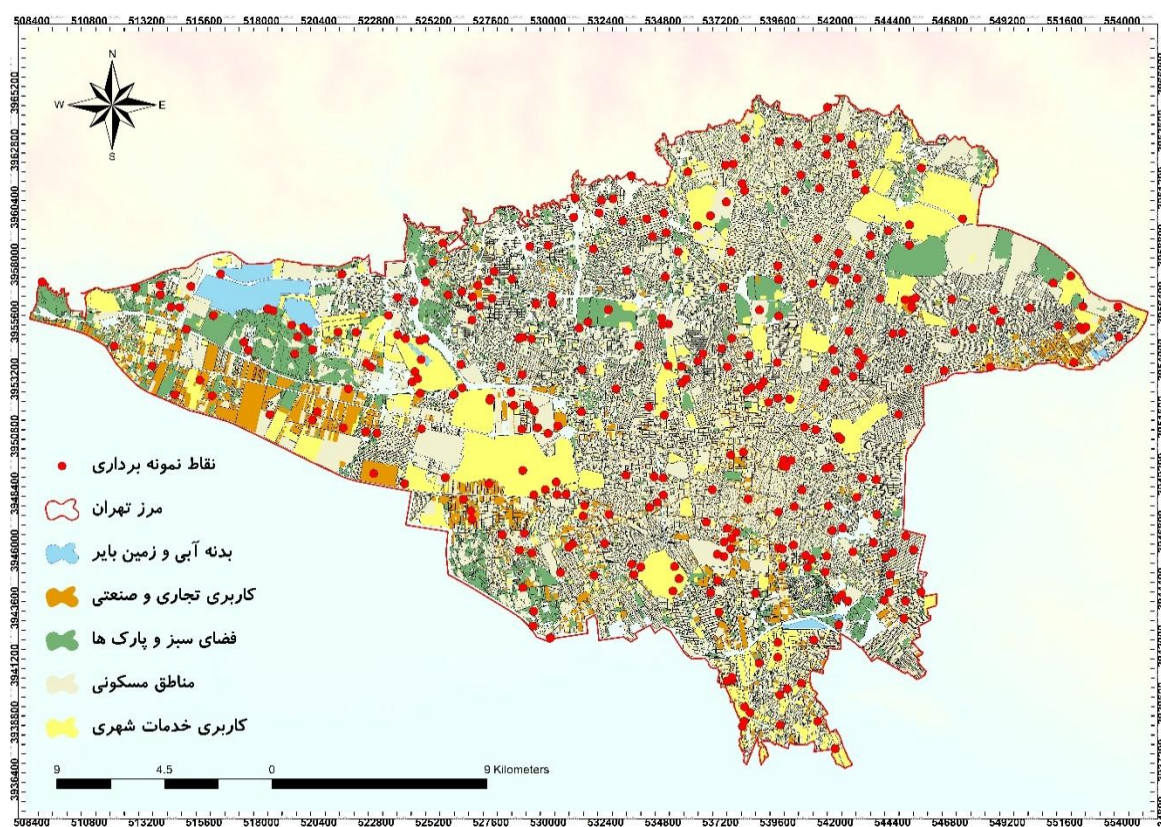
تعیین تعداد پلات ها

با توجه به مطالعات پیشین (Intasen et al., 2017; Nowak et al., 2011; Nowak et al., 2017; Mikulanis, 2014; PARD, 2019; Parsa et al., 2014) و راهنمای کاربران Tree Eco، تعداد ۳۳۰ پلات برای نمونه برداری از درختان شهر تهران تعیین گردید. سپس با استفاده از مازول نقاط تصادفی نرم افزار ArcGIS 10.8، پلات های نمونه برداری به طور تصادفی در سرتاسر شهر تهران توزیع شد (شکل ۳). برای این کار، در اولین گام، نقشه کاربری اراضی شهر تهران از شهرداری تهران (سال ۱۳۹۶، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰) تهیه و به کمک بررسی های میدانی به روز رسانی شد. به دلیل عدم دسترسی به ۱۴ پلات، در مجموع ۳۱۶ پلات با شعاع ۱۱/۳۴ متر طی فصل رشد نمونه برداری و تمامی داده های مورد نیاز برای هر پلات (جدول

۱) جمع‌آوری شد. در این پژوهش، مطابق جدول ۱، دو نوع داده در مطالعات میدانی به دست آمد: ۱) اطلاعات عمومی پلات‌ها، ۲) اطلاعات مربوط به درختان.

جدول ۱ داده‌های میدانی ثبت شده

اطلاعات عمومی پلات‌ها	اطلاعات درختان
شناسه و آدرس پلات	شناسه درخت، فاصله و جهت درخت نسبت به مرکز پلات و مختصات جغرافیایی درخت
مختصات جغرافیایی مرکز پلات	وضعیت کاشت درخت (کاشته شده یا طبیعی) و نوع مالکیت درخت (شخصی یا عمومی)
تاریخ نمونه برداری	گونه درخت
کاربری و پوشش واقعی زمین	DBH (قطر برابر سینه)
درصد پوشش درختی	ارتفاع کل درخت، ارتفاع پایه تا تاج پوشش
درصد مساحت قابل کشت درون پلات‌ها	عرض تاج
درصد قابلیت دسترسی به پلات‌ها	میزان قرارگیری در معرض نور تاج پوشش
واحدهای نمونه برداری	درصد از دست رفتگی تاج پوشش و درصد سرخشیدگی
—	پوشش زیر کانوپی (نفوذ پذیر یا نفوذ ناپذیر)



شکل ۳ نقشه پراکنش نقاط نمونه برداری در شهر تهران

ارزش‌گذاری اقتصادی عملکرد اکوسیستمی بهبود کیفیت هوا

روش "انتقال منافع" رویکردي است که در مطالعات ارزش‌گذاری اقتصادی اکوسیستم‌ها برای برآورد ارزش اقتصادی کالاها و خدمات محیطی از طریق انتقال نتایج مطالعات موجود به یک مکان یا زمینه جدید استفاده می‌شود. این روش برای ارزیابی خدمات اکوسیستمی در شرایطی که محدودیت‌های مالی یا زمانی وجود دارد، برای انجام مطالعات

ارزش گذاری اولیه اقتصادی مفید است (Agaton and Guila, 2023). از این رو، در این مطالعه بر اساس منابع موجود، از روش انتقال منافع برای برآورد ارزش اقتصادی عملکرد اکوسیستمی بهبود کیفیت هوا توسط درختان شهری تهران استفاده شد. ارزش حذف آلودگی هوا به وسیله درختان شهری با استفاده از مقادیر میانگین ایالات متحده تخمین زده شد (Nowak et al. 2006). ارزش اقتصادی ترسیب هر تن کربن توسط درختان شهری ۱۸/۳۲ دلار (Nowak et al., 2007) برآورد گردید از آنجا که این مقادیر مربوط به ایالات متحده است، با استفاده از معادله (۱) برای استفاده در ایران به روزرسانی شد (مبرقعی دینان و همکاران، ۱۳۹۹).

$$Iran F_i = U.S F_i \times (Y Iran / Y U.S)^{\varepsilon} \quad (1)$$

که در آن $Iran F_i$ ارزش اقتصادی حذف آلاینده i در ایران، $U.S F_i$ ارزش اقتصادی حذف آلاینده i در ایالات متحده، $U.S F_i$ سرانه تولید ناخالص داخلی ایران (۱۳۱۱۶/۰۷۲۵ دلار در سال ۲۰۲۰)، $Y US$ سرانه تولید ناخالص داخلی ایالات متحده (۶۳,۵۴۳/۵۷۸ دلار در سال ۲۰۲۰)، و ε کشش درآمدی تمایل به پرداخت است (بانک جهانی مقدار ۱/۲ را برای کشورهای با درآمد متوسط پیشنهاد کرده است) (World Bank 2020).

نتایج و بحث

درک صحیح از ساختار، عملکرد و ارزش زیرساخت های سبز شهری نقش کلیدی در بهبود تصمیم گیری های مدیریتی دارد؛ تصمیماتی که در نهایت می تواند منجر به بهبود کیفیت زندگی انسان و سلامت زیست محیطی شود. تعداد درختان موجود در زیرساخت های سبز شهری تهران حدود ۷ میلیون اصله با تراکم ۱۲۱ درخت در هکتار (با خطای استاندارد ۱۹/۵٪) برآورد شده است. این میزان پوش درختی در حدود ۱۴/۷ درصد از کل شهر تهران را پوشش می دهد. همچنین منشاء حدود ۲۸ درصد از درختان شناسایی شده قاره آسیا و ۲۶ درصد آمریکای شمالی گزارش شده است (Rasoolzadeh et al., 2022).

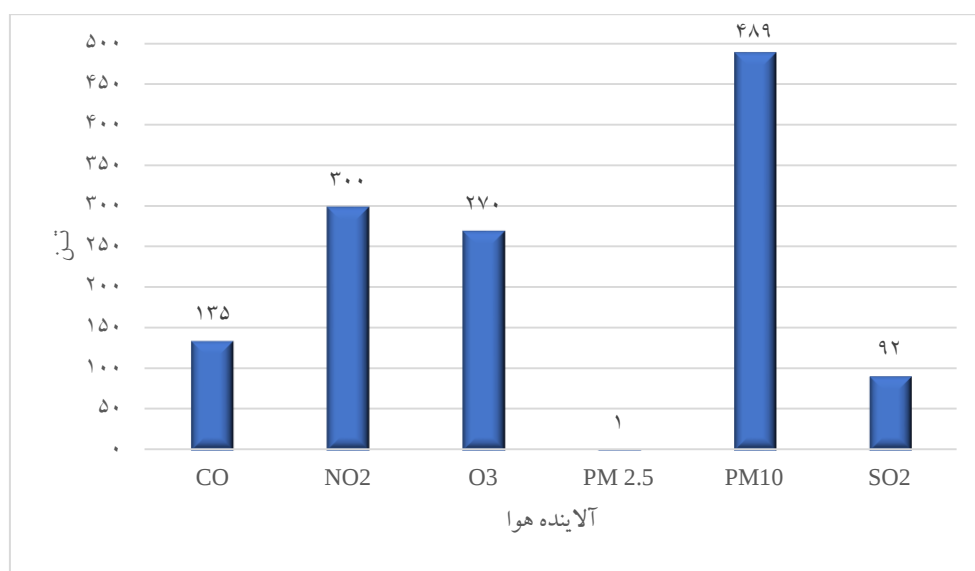
ترکیب گونه ای درختان، در فضای سبز شهر تهران، نشان دهنده حضور هم زمان گونه های بومی و غیربومی است. از این رو، ترکیب گونه ای در مناطق شهری معمولاً غنی تر از چشم اندازهای طبیعی اطراف است، که می تواند موجب افزایش تنوع زیستی درختی و در پی آن، بهبود کیفیت و تنوع خدمات اکوسیستمی ارائه شده شود. برای مثال، پژوهش راییلی و همکاران (۲۰۱۸) در شهر کلیولند، ایالت اوهایو، نشان داد که گونه های غیربومی درختی در فضاهای شهری بیشترین میزان خدمات اکوسیستمی را از نظر کمی و ارزش اقتصادی ارائه می دهند؛ در حالی که گونه های بومی در نواحی مسکونی، ارزش پولی بیشتری تولید می کنند (Riley et al., 2018).

این یافته ها گویای آن است که افزایش تنوع گونه ای، به ویژه در مناطق شهری که در معرض طیف گسترده ای از تنش های محیطی مانند آلودگی هوا، دمای بالا، کم آبی و فشار انسانی قرار دارد، می تواند اثرات منفی ناشی از آفات، بیماری ها و تغییرات اقلیمی را کاهش دهد. با این حال، این راهبرد ممکن است پیامدهایی نظیر کاهش جمعیت گونه های بومی یا تسلط گونه های مهاجم را نیز به دنبال داشته باشد. بنابراین، ضروری است که انتخاب گونه ها در برنامه ریزی شهری با دقت و بر اساس معیارهایی همچون سازگاری اقلیمی، مزایای اکوسیستمی و پتانسیل تهاجمی آن ها باشد.

حذف آلاینده های هوا توسط درختان شهری تهران

کیفیت پایین هوا یکی از چالش های مهم محیط زیستی در کلان شهرهایی همچون تهران است. آلودگی هوا پیامدهای گسترده ای برای سلامت عمومی، محیط زیست، سازه های شهری و فرآیندهای اکوسیستمی به همراه دارد، از جمله کاهش دید، تسریع فرسایش مصالح و افزایش بیماری های قلبی و تنفسی. زیرساخت های سبز شهری خدمات

اکوسیستمی متعددی ارائه می‌دهند که با سلامت و رفاه انسان ارتباط نزدیکی دارد (Sahle et al., 2016; Wang et al., 2021). در این میان، پوشش گیاهی شهری، به‌ویژه درختان، تاثیر مهمی در کاهش آلودگی هوا دارند؛ آن‌ها نه تنها با جذب مستقیم آلاینده‌ها از جو، بلکه از طریق کاهش دمای هوا و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها به بهبود کیفیت هوا کمک می‌کنند (Nowak and Dwyer, 2007). گیاهان با مکانیسم‌هایی نظیر جذب گازی از طریق روزنه‌ها و ترسیب ذرات معلق روی سطح برگ، آلاینده‌های مختلف را کاهش می‌دهند (Beckett et al., 1998; Roeland et al., 2019). این رو، زیرساخت‌های سبز شهری به‌عنوان یکی از مؤثرترین ابزارهای طبیعی برای مقابله با آلودگی هوا شناخته می‌شوند (Barwise & Kumar, 2020; Chavez-García and González-Méndez, 2021). نتایج نشان داده است که درختان شهری در تهران سالانه حدود ۱۲۸۶/۴۲ تن از آلاینده‌های شاخص هوا را حذف می‌کنند. این آلاینده‌ها شامل ازن (O_3) به میزان ۲۷۰/۳۲ تن در سال، کربن مونوکسید (CO) به مقدار ۱۳۴/۸۳ تن در سال، نیتروژن دی‌اکسید (NO_2) به میزان ۲۹۹/۶۸ تن در سال، ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرومتر ($PM_{2.5}$) به میزان ۰/۶۸ تن در سال، ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرومتر و بیشتر از ۲/۵ میکرومتر (PM_{10}^*) به میزان ۴۸۹/۴۱ تن در سال (بیشترین حذف) و دی‌اکسید گوگرد (SO_2) به میزان ۹۱/۵۰ تن در سال است (شکل ۴) (Rasoolzadeh et al., 2023).



شکل ۴ حذف آلاینده‌های هوا توسط درختان شهری تهران (تن در سال ۲۰۲۰) (Rasoolzadeh et al., 2023)

همانطور که مشاهده می‌شود آلاینده $PM_{2.5}$ علی‌رغم خطرات بالایی که برای سلامت شهروندان به همراه دارد، در میان آلاینده‌های شاخص هوا، از کمترین مقدار حذف برخوردار است. درختان PM_{10} و $PM_{2.5}$ را از طریق ترسیب خشک بر روی سطح برگ خود حذف می‌کنند (Nowak et al., 2013). میزان ترسیب ذرات معلق بسیار ریز در تابستان، با کلروفیل و کاروتنوئید برگ‌ها و نیز pH سطح برگ درختان در بهار و تابستان همبستگی منفی دارد (Bui et al., 2022). علاوه بر این، شرایط جوی و جغرافیایی در حضور ذرات معلق نقش مهمی دارند، یا از طریق شرایط اقلیمی مرتبط با حرکات باد یا بارش، تجمع ذرات معلق را تسهیل کرده یا مانع آن می‌شوند (Giardina and Buffa, 2018). به عبارت دیگر عوامل محیطی و گیاهی متعددی می‌تواند جذب و تعلیق مجدد ذرات معلق را پیچیده کند (Chávez-García and González-Méndez, 2021). علاوه بر این، خصوصیات میکروساختاری سطح برگ (مانند زبری، کرک‌دار بودن یا وجود موم اپیدرمی) نیز بر ظرفیت جذب آلاینده‌ها مؤثرند. با این وجود، برای محیط شهری، درختان ممکن است به دلیل محدودیت فضا یا پراکندگی آلاینده ذرات معلق در هوا، آنگاه که انتظار می‌رود مناسب نباشند. از این‌رو مطالعات

بیشتری در مورد همبستگی‌های پیچیده بین تجمع ذرات معلق در برگ‌ها، ویژگی‌های برگ‌ها و شرایط محیطی مورد نیاز است تا استفاده مؤثر از گیاهان برای بهبود کیفیت هوا در محیط شهری افزایش یابد (Moura et al., 2024).

در جدول ۲، ارزش اقتصادی حذف آلاینده‌های شاخص هوا توسط درختان شهری تهران در سال ۲۰۲۰ بر حسب دلار و به کمک روش انتقال منافع برآورد و ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ستون دوم این جدول به کمک روش انتقال منافع، ارزش اقتصادی حذف هر تن از آلاینده‌های شاخص توسط درختان برای ایران محاسبه و به‌روزرسانی شده است. برای مثال، ارزش اقتصادی حذف هر تن CO معادل ۲۳۲/۵۰ دلار است. در مورد NO_2 و O_3 ، ارزش اقتصادی حذف هر تن از این دو آلاینده برابر و معادل ۱۶۳۷/۷۰ دلار تخمین زده شده است. علت برابر بودن این ارقام این است که ازن یک آلاینده ثانویه محسوب می‌شود که از واکنش NO_2 در جو تشکیل می‌شود؛ بنابراین، کنترل یکی به کنترل دیگری نیز کمک می‌کند (i-Tree Eco User's Manual, 2019). در مورد آلاینده‌های دیگر، ارزش اقتصادی حذف هر تن SO_2 معادل ۴۰۰/۷۶ دلار و حذف هر تن PM_{10} و هر تن $PM_{2.5}$ در حدود ۱۰۹۲ دلار برآورد شده است. ارزش اقتصادی کل حذف آلاینده‌ها توسط درختان شهری، میزان منفعت مالی است که درختان شهری به ساکنین آن شهر و حتی اطراف آن ارائه می‌دهد. به‌عنوان مثال، حذف CO توسط درختان شهری تهران ارزشی معادل ۳۱،۳۴۸ دلار در سال دارد. در مورد NO_2 ، ارزش اقتصادی حذف آن ۴۹۰،۵۶۲ دلار در سال و ارزش پولی حذف O_3 در حدود ۴۴۲،۵۰۷ دلار در سال برآورد شده است. ارزش اقتصادی حذف $PM_{2.5}$ ، که برای سلامت انسان بسیار خطرناک است، معادل ۷۴۰ دلار در سال است، در حالی که حذف PM_{10} دارای ارزش اقتصادی ۵۳۴،۷۹۲ دلار در سال می‌باشد. حذف SO_2 توسط درختان شهر تهران ارزشی برابر با ۳۶،۶۶۸ دلار در سال به همراه دارد (Rasoolzadeh et al., 2023). در مجموع، ارزش اقتصادی سالانه عملکرد اکوسیستمی تصفیه هوا توسط درختان شهری تهران حدود ۱،۵۳۶،۶۱۹ دلار در سال برآورد شده است که نشان‌دهنده تأثیر مثبت و قابل توجه درختان در کاهش آلودگی و بهبود کیفیت هوای این شهر است. این ارقام تأکیدی بر اهمیت حفاظت و توسعه فضای سبز شهری برای ارتقای کیفیت زندگی شهروندان و کاهش اثرات مخرب آلودگی هوا دارد.

جدول ۲. زدایش آلودگی هوا توسط درختان شهری تهران (تن در سال) و ارزش اقتصادی آن (دلار)

آلاینده هوا	مقدار زدایش آلاینده‌های هوا توسط درختان شهر تهران (تن در سال)	ارزش اقتصادی زدایش هر تن آلاینده هوا توسط درختان (به روزرسانی شده برای ایران)	کل ارزش اقتصادی حذف آلاینده‌های هوا توسط درختان شهری تهران در سال (دلار)
CO	۱۳۴/۸۳	۲۳۲/۵۰	۳۱۳۴۸/۳
NO ₂	۲۹۹/۶۸	۱۶۳۷/۷۰	۵۶۲۴۹۰/۴
O ₃	۲۷۰/۳۲	۱۶۳۷/۷۰	۴۴۲۵۰۷/۸
PM _{2.5}	۰/۶۸	۱۰۹۲/۹۵	۷۴۰/۱
PM ₁₀	۴۸۹/۴۱	۱۰۹۲/۷۲	۵۳۴۷۹۲/۵
SO ₂	۹۱/۵۰	۴۰۰/۷۶	۳۶۶۶۸/۲
کل	۱۲۸۶/۴۲	—	۱۵۳۶۶۱۹/۲

منبع: (یافته‌های تحقیق و Rasoolzadeh et al., 2023).

ترسیب و ذخیره کربن

افزایش فعلی غلظت CO_2 در جو به عنوان یکی از عوامل اصلی تشدید تغییرات اقلیمی در جهان شناخته می‌شود (Pachauri, 2014). فعالیت‌های انسانی در مناطق شهری عامل انتشار ۷۱ درصد از CO_2 مرتبط با تولید انرژی است

(Grimm et al., 2008). از این رو، کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای CO₂ و تقویت مکانیسم‌های جذب کربن در محدوده‌های شهری به عنوان دو رویکرد کلیدی برای مقابله با تغییرات اقلیمی و کاهش اثرات آن بر مناطق شهری و بهبود تاب‌آوری شهرها مطرح شده است (Dhakal, 2010). در این میان، درختان شهری نقش مهمی در جذب و ذخیره‌سازی کربن دارد. گیاهان از طریق فرایند فتوسنتز، CO₂ اتمسفری را جذب کرده و آن را به ترکیبات آلی تبدیل می‌کنند؛ بنابراین، درختان می‌توانند به عنوان مخازن زنده کربن عمل کرده و سهم مثبتی در کاهش بار کربنی شهرها داشته باشند (Nowak et al., 2013).

درختان شهری تهران سالانه حدود ۶۰۱۰۱/۸ تن کربن که معادل ۲۲۰۳۹۳/۳ تن CO₂ است را ترسیب می‌کنند. با به روز رسانی ارزش اقتصادی ترسیب هر تن CO₂ در سال برای ایران (بر مبنای داده‌های ایالات متحده و تعدیل نرخ‌های محلی) این مقدار برابر با ۲/۸۱ دلار در سال به ازای هر تن CO₂ در نظر گرفته شد. بنابراین، ارزش اقتصادی کل کربن ترسیب شده توسط درختان شهری تهران حدود ۶۱۹۳۰۵ دلار در سال برآورد شده است.

علاوه بر ترسیب سالانه کربن، درختان می‌توانند به عنوان مخازن بلندمدت برای ذخیره کربن نیز عمل کنند. نتایج نشان می‌دهد که درختان شهری تهران تا کنون حدود ۲۵۴۵۷۹ تن کربن را در خود ذخیره کرده‌اند که معادل ۹۳۳۴۵۵ تن CO₂ است (Rasoolzadeh et al., 2024). ذخیره‌سازی کربن عمدتاً در بافت زنده درختان (تنه، شاخه و ریشه) اتفاق می‌افتد که با مرگ درخت و تجزیه بافت‌های آن دوباره به اتمسفر رها می‌شود.

نسبت زدایش به انتشار

در جدول ۳، مقدار انتشار (تن در سال) و مقدار زدایش (تن در سال) و نسبت زدایش به انتشار (درصد) آلاینده‌های شاخص هوا و گاز گلخانه‌ای CO₂، توسط درختان شهر تهران ارائه شده است. بررسی این مقادیر نشان می‌دهد که درختان شهری تنها سهم اندکی از بار آلاینده‌ها/ گاز گلخانه‌ای منتشر شده را می‌زدایند. به عنوان نمونه، نسبت حذف CO تنها ۰/۰۲۸ درصد از کل مقدار انتشار یافته (۴۷۷،۹۵۸ تن در سال) است. به طور مشابه، نسبت حذف برای PM_{2.5} تنها ۰/۰۰۸ درصد و برای NO₂ حدود ۰/۲۹۲ درصد برآورد شده است. این ارقام نشان‌دهنده سهم ناچیز درختان در کاهش آلاینده‌ها است.

در این میان، بیشترین اثرگذاری درختان در حذف آلاینده‌ها مربوط به PM₁₀ بوده است، به طوری که حدود ۵/۲ درصد از ۹۴۰۵ تن PM₁₀ منتشر شده در سال توسط پوشش درختی جذب شده است. همچنین، نسبت حذف SO₂ نیز در حدود ۰/۴۸ درصد است. اگرچه این نسبت‌ها همچنان پایین‌اند، اما در مقایسه با سایر آلاینده‌ها بیشتر است.

در خصوص گاز گلخانه‌ای CO₂ نیز، میزان ترسیب سالانه درختان حدود ۲۲۰۳۹۳ تن CO₂ در سال تخمین زده شده است، در حالی که بر اساس گزارش شهبازی و همکاران (۲۰۲۲) مقدار انتشار CO₂ در سطح شهر برابر ۴۷۰۷۱۰۰۰ تن در سال برآورد شده است. بنابراین، درختان شهری تنها حدود ۰/۴۷ درصد از کل CO₂ تولید شده در سال را جذب می‌کنند.

اگرچه این نسبت‌ها در نگاه اول اندک به نظر می‌رسند، اما هرگونه کاهش هرچند کوچک در غلظت آلاینده‌ها می‌تواند پیامدهای بزرگ و معناداری برای سلامت عمومی به همراه داشته باشد. به عنوان مثال، کاهش حتی یک میکروگرم در مترمکعب از PM_{2.5} با کاهش قابل توجه مرگ‌ومیرهای زودرس ناشی از بیماری‌های قلبی و ریوی همراه است. همین مسئله باعث شده است تا سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده (EPA) از سال ۲۰۰۴، پوشش درختی را به عنوان معیاری بالقوه برای تحقق استانداردهای کیفیت هوا معرفی کند (Nowak, 2005).

جدول ۳ میزان حذف، انتشار و درصد حذف

حذف آلاینده (درصد)	میزان انتشار از منابع مختلف شهری (تن در سال) (Shahbazi et al., 2022)	حذف توسط درختان (تن در سال)	آلاینده / گاز گلخانه‌ای
۰/۰۲۸	۴۷۷۹۵۸	۱۳۴/۸۳	CO
۰/۲۹۲	۱۰۲۶۷۸	۲۹۹/۶۸	NO ₂
–	–	۲۷۰/۳۲	O ₃
۰/۰۰۸	۸۳۴۹	۰/۶۸	PM _{2.5}
۵/۲۰۴	۹۴۰۵	۴۹۰/۰۹	PM ₁₀
۰/۴۸۲	۱۸۹۸۲	۹۱/۵۰	SO ₂
۰/۱۶۵	۶۱۷۳۷۲	۱۲۶۸/۴۲	کل آلاینده‌های هوا
۰/۴۷	۴۷۰۷۱۰۰۰	۲۲۰۳۹۳/۳	گاز گلخانه‌ای CO ₂

منبع: (یافته‌های تحقیق و Rasoolzadeh et al., 2024).

در جدول ۴، سرانه جذب آلاینده‌های شاخص هوا و CO₂ توسط درختان شهری تهران آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با احتساب جمعیت حدود ۹ میلیون نفری شهر تهران (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۰)^۱ سرانه جذب CO، ۱۵ گرم در سال، NO₂ حدود ۳۳ گرم در سال، O₃ در حدود ۳۰ گرم در سال، PM_{2.5} در حدود ۰/۱ گرم در سال، PM₁₀ در حدود ۵۴/۴ گرم در سال، SO₂ در حدود ۱۰ گرم در سال و CO₂ در حدود ۲۴۴۸۸ گرم در سال (در حدود ۲۴/۵ کیلوگرم) توسط درختان شهری تهران است. میزان جذب CO₂ بسیار بیشتر از آلاینده‌های شاخص است، که نقش قابل توجه درختان در کاهش این گاز گلخانه‌ای و مقابله با تغییرات اقلیمی را نشان می‌دهد.

 جدول ۴ سرانه حذف آلاینده‌های شاخص هوا و CO₂ در سال توسط درختان شهر تهران

آلاینده / گاز گلخانه‌ای	سرانه جذب (گرم در سال)
CO	۱۵/۰
NO ₂	۳۳/۳
O ₃	۳۰/۰
PM _{2.5}	۰/۱
PM ₁₀	۵۴/۴
SO ₂	۱۰/۲
CO ₂	۲۴۴۸۸/۱

زدایش توسط گونه‌های درختی

در ابزار i-Tree Eco، بر خلاف برخی رویکردهای گونه‌محور، تفاوت مستقیم و ذاتی بین گونه‌های درختی از نظر نرخ حذف آلاینده‌های هوا لحاظ نمی‌شود؛ بلکه فرآیند زدایش آلاینده‌ها بر اساس مساحت برگ درختان و شرایط محیطی مانند سرعت باد، دما، رطوبت نسبی و غلظت آلاینده‌ها در سطح شهر و به طور یکسان برای تمام گونه‌ها شبیه‌سازی

1. <https://amar.org.ir/statistical-information/statid/27965>

می‌شود. بنابراین، فراوانی درختان هر گونه و مساحت تاج پوشش آن‌ها مهم‌ترین دلایل تفاوت مقدار حذف آلاینده‌ها بین گونه‌های درختی در یک منطقه معین است.

اطلاعات مربوط به تعداد درختان، در جدول ۵، سطح برگ، میزان حذف آلاینده‌های شاخص و CO_2 توسط پنج گونه غالب درختی شهر تهران ارائه شده‌است. همانطور که انتظار می‌رود، گونه‌های دارای جمعیت بالا یا تاج پوشش گسترده‌تر، نقش مؤثرتری در زدایش گازها و ذرات داشته‌اند. برای مثال، گونه کاج تهران با بیش از ۹۲۸ هزار اصله درخت و سطح برگ قابل توجه ۶۲۰۵/۵ هکتاری، با حذف ۳۴۲/۱۷ تن آلاینده در سال، بیشترین سهم را در میان گونه‌های مورد بررسی به خود اختصاص داده است. همچنین، این گونه با ترسیب ۸۶۰۶/۳۵ تن کربن در سال، از نظر کاهش گاز گلخانه‌ای CO_2 نیز عملکرد قابل توجهی داشته است.

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که در شرایط یکسان اقلیمی و آلودگی، مدیریت فراوانی گونه‌های دارای سطح برگ بالا و طول عمر زیاد می‌تواند راهبردی مؤثری برای بهبود کیفیت هوای شهری و تقویت خدمات تنظیمی درختان شهری تلقی شود.

جدول ۵. مقایسه زدایش آلاینده‌های شاخص هوا و CO_2 توسط گونه‌های درختی غالب در شهر تهران

گونه	نام علمی	تعداد درخت (اصله)	مساحت برگ (هکتار)	حذف آلاینده‌ها (تن در سال)	ترسیب کربن (تن در سال)
کاج تهران	<i>Pinus eldarica</i>	۹۲۸۲۳۳	۶۲۰۵/۵	۳۴۲/۱۷	۸۹۹۰
اقاقیا	<i>Robinia pseudoacacia</i>	۷۱۱۵۶۲	۱۰۸۷/۱	۵۹/۹۴	۳۹۸۰
سرو نقره‌ای	<i>Cupressus arizonica</i>	۶۶۶۸۰۲	۱۵۸۲/۸	۸۷/۲۷	۱۱۸۹۰
چنار	<i>Platanus orientalis</i>	۵۹۵۳۶۲	۴۳۱۰/۴	۲۳۷/۶۷	۵۰۹۹
زبان گنجشک	<i>Fraxinus excelsior</i>	۳۳۵۷۸۷	۱۱۸۰/۹	۶۵/۱۲	۲۸۹۰

منبع: (یافته‌های تحقیق، Rasoolzadeh et al., 2022، Rasoolzadeh et al., 2024).

تولید اکسیژن

یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد، میزان اکسیژن تولیدی درختان شهری تهران حدود ۱۶۰۲۷۲ تن در سال برآورد شده‌است، لیک، ارزش اقتصادی آن برای جامعه قابل چشم پوشی است، چرا که میزان اکسیژن تولیدی توسط درختان در مقایسه با حجم اکسیژن اتمسفر ناچیز است (حدود ۲۱ درصد حجم اتمسفر را اکسیژن تشکیل می‌دهد) (Nowak et al., 2007).

یک جنگل در حال رشد می‌تواند CO_2 را جذب کرده و اکسیژن تولید کند. برعکس، یک جنگل در حال تخریب و فروپاشی، از طریق فرآیندهای تجزیه CO_2 را آزاد کرده و اکسیژن مصرف می‌کند (Nowak et al., 2007). باید توجه داشت که استفاده از سوخت‌های فسیلی باعث مصرف اکسیژن می‌شود. از این رو، محتوای اکسیژن جو به آرامی در حال کاهش است. بین سال‌های ۱۹۸۹ و ۱۹۹۴، محتوای اکسیژن جو با نرخ سالانه ۲ ppm در حدود ۲۱۰،۰۰۰ ppm کاهش یافته‌است (Nowak et al., 2007; Broecker, 1996). بنابراین، کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی در مدیریت جنگل‌های شهری نه تنها باعث کاهش انتشار CO_2 می‌شود، بلکه مصرف اکسیژن را نیز کاهش می‌دهد (Nowak et al., 2002).

وضعیت پوشش درختی شهر تهران در مقایسه با چند شهر دیگر

در جدول ۶، وضعیت پوشش درختی شهر تهران از نظر نسبت پوشش درختی، تراکم، ذخیره کربن، ترسیب سالانه کربن و زدایش سالانه آلاینده‌های هوا به ازای هر هکتار از مساحت محدوده‌ی مطالعاتی با چند شهر دیگر مقایسه شده‌است.

همانطور که مشاهده می‌شود، پوشش درختی ۱۴/۷ درصد از این شهر را پوشش می‌دهد که این مقدار در مقایسه با شهرهایی مانند لس‌آنجلس (۱۱/۱ درصد و تبریز (۹/۴ درصد) بیشتر است، اما به‌طور قابل‌توجهی پایین‌تر از شهرهایی مانند آتلانتا (۳۶/۷ درصد) و بوستون (۲۲/۳ درصد) قرار دارد. تراکم درختی در تهران برابر با ۱۲۱ اصله در هکتار برآورد شده‌است که بالاتر از بسیاری از شهرهای مقایسه‌شده از جمله نیویورک (۶۵ اصله در هکتار)، لس‌آنجلس (۴۸ اصله در هکتار) و حتی بوستون (۸۳ اصله در هکتار) است. این تراکم بالا در حالی مشاهده می‌شود که نسبت پوشش درختی متوسط است؛ چراکه درختان شهری تهران عموماً در مرحله رشد اولیه قرار دارند (DBH بیش از ۷۵ درصد درختان تهران کمتر از ۱۵/۲ سانتی متر است). همچنین جوان بودن درختان شهر تهران سبب شده‌است که میزان ذخیره کربن در این شهر کم (۱/۱۸ تن در هکتار) و در مقایسه با شهرهایی مانند آتلانتا (۳۵/۷ تن در هکتار) و بالتیمور (۲۵/۰ تن در هکتار) بسیار پایین‌تر باشد. در خصوص ترسیب سالانه کربن، تهران با میزان ۱/۰۴ تن در هکتار در سال عملکرد نسبتاً مطلوبی دارد که حتی از نیویورک (۰/۴۸) و لس‌آنجلس (۰/۳۶) بالاتر است. این موضوع ممکن است به دلیل رشد فعال‌تر گونه‌های شهری، اقلیم گرم‌تر یا ترکیب گونه‌ای با نرخ فتوسنتز بالاتر باشد.

در نهایت، عملکرد درختان تهران در حذف سالانه آلاینده‌های هوا برابر با ۲۱/۷۹ کیلوگرم در هر هکتار گزارش شده‌است که بالاتر از لس‌آنجلس (۱۴/۷ کیلوگرم)، نیویورک (۱۹/۰ کیلوگرم) و تبریز (۹/۷ کیلوگرم) است. این مقدار احتمالاً تحت تأثیر شرایط اقلیمی خاص تهران و سطح بالای آلودگی اولیه هوا قرار دارد که باعث افزایش میزان جذب آلاینده‌ها می‌شود.

جدول ۶ مقایسه وضعیت پوشش درختی شهر تهران با چند شهر دیگر

شهر	نسبت پوشش درختی به مساحت منطقه (درصد)	تراکم (اصله درخت در هکتار)	ذخیره کربن (تن در هکتار)	ترسیب کربن (تن در هکتار از مساحت منطقه در سال)	حذف آلاینده‌های هوا (کیلوگرم در هکتار در سال)	مرجع
آتلانتا، آمریکا	۳۶/۷	۲۷۵/۸	۳۵/۷	۱/۲۳	۴۴/۲	Nowak et al., 2006; Nowak et al., 2013
بالتیمور، آمریکا	۲۱/۰	۱۱۸/۵	۲۵/۰	۰/۸۰	۱۸/۶	Nowak et al., 2006; Nowak et al., 2013
بوستون، آمریکا	۲۲/۳	۸۲/۹	۲۰/۳	۰/۶۷	۱۸/۰	Nowak et al., 2006; Nowak et al., 2013
نیویورک، آمریکا	۲۰/۹	۶۵/۲	۱۵/۳	۰/۴۸	۱۹/۰	Nowak et al., 2006; Nowak et al., 2013
لس‌آنجلس، آمریکا	۱۱/۱	۴۸/۴	۹/۴	۰/۳۶	۱۴/۷	Nowak et al., 2006; Nowak et al., 2013
تبریز، ایران	۹/۴	۷۹	۲/۲	۰/۳۶	۹/۷	Parsa et al., 2019
تهران، ایران	۱۴/۷	۱۲۱	۱/۱۸	۱/۰۴	۲۱/۷۹	مطالعه حاضر

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، عملکرد اکوسیستمی بهبود کیفیت هوا شامل زدایش آلاینده‌های شاخص هوا، ترسیب و ذخیره کربن و تولید اکسیژن توسط درختان شهری تهران با استفاده از ابزار i-Tree Eco بررسی و با بهره‌گیری از رویکرد انتقال منافع ارزش‌گذاری اقتصادی شد. نتایج نشان داد که سالانه درختان شهری تهران در مجموع ۲۲۱۷۶۱/۷۲ تن از آلاینده‌های شاخص هوا شامل CO، NO₂، SO₂، O₃، PM₁₀، PM_{2.5} و گاز گلخانه‌ای CO₂ را حذف می‌کنند. ارزش اقتصادی این

عملکرد اکوسیستمی حدود ۲۱۵۵۹۲۴ دلار در سال برآورد می‌شود که نشان‌دهنده نقش قابل توجه درختان در بهبود کیفیت هوا و مقابله با تغییرات اقلیمی به ویژه در مقیاس محلی است.

سلمی و همکاران در سال ۲۰۱۶ به کمک مدل i-Tree به بررسی نقش درختان در حذف آلاینده‌های هوا در شهر استراسبورگ فرانسه پرداختند. نتایج نشان داد که درختان شهری استراسبورگ سالانه در حدود ۸۸ تن از آلاینده‌های هوا را می‌زدایند (یک تن CO، ۱۴ تن NO₂، ۵۶ تن O₃، ۱۲ تن PM_{10-2.5} (ذرات معلق با اندازه کوچکتر از ۱۰ میکرومتر و بزرگتر از ۲/۵ میکرومتر)، ۵ تن PM_{2.5} و ۱ تن SO₂). همانند مطالعه حاضر، مقایسه بین نرخ شبیه‌سازی شده حذف آلودگی و انتشارات محلی نشان داد که درختان مناطق عمومی استراسبورگ نسبت ناچیزی از میزان انتشار آلاینده‌های هوا را می‌زدایند به طوری که درختان شهری تنها در حدود ۷ درصد از ذرات معلق منتشر شده را کاهش می‌دهند و تأثیر آن بر حذف سایر آلاینده‌های هوا بسیار کم است. بنابراین، مطالعه سلمی و همکاران (۲۰۱۶) همانند مطالعه پیش‌رو نشان داد که درختان شهری یک عنصر مهم برای کاهش آلودگی هوا است، اما تنها راه حل این مشکل به شمار نمی‌رود (Selmi et al., 2016).

پارسا و همکاران در سال ۲۰۱۹، به بررسی شرایط فعلی و چشم‌انداز آتی زیر ساخت‌های سبز شهر تبریز در بهبود کیفیت هوای این شهر از طریق سناریوهای درختکاری و بر پایه مدل i-Tree Eco پرداختند. نتایج نشان داد که در سال ۲۰۱۵، وجود تقریباً ۱,۹۲۸,۰۰۰ اصله درخت در این شهر، سبب حذف ۲۳۸/۴ تن از آلاینده‌های هوا در سال (حدود ۸۹/۰۴ تن NO₂، ۶۵/۳۸ تن O₃، ۵۳/۶۹ تن SO₂، ۱۸/۰۴ تن CO و ۱۲/۲۱ تن PM_{2.5}) با ارزش اقتصادی ۸۸۹/۸۷۳,۱۹۰ دلار در سال است. همچنین این درختان ۵۴,۴۲۰ تن کربن را در خود ذخیره و سالانه ۹۲۰,۳ تن کربن را از طریق فتوسنتز ترسیب و ۲۳,۶۷۰ تن اکسیژن را در سال تولید کردند (Parsa et al., 2019) که در مقایسه با دیگر شهرهای جهان پتانسیل نسبتاً اندکی در تصفیه هوا به شمار می‌رود (Parsa et al., 2019). شاید تحقیق پارسا و همکاران (۲۰۱۹) را بتوان به عنوان مشابه‌ترین پژوهش داخلی با این بخش از پژوهش پیش‌رو دانست اما تفاوت این پژوهش با پژوهش پیش‌رو علاوه بر موقعیت محدوده مطالعاتی، مقیاس منطقه مطالعاتی نیز هست. حذف آلاینده‌های هوا تا حد زیادی به پوشش درختی و سطح غلظت آلاینده‌های هوا بستگی دارد و این دلیل تفاوت در برآورد عملکرد نقش درختان شهری در بهبود کیفیت هوا در مطالعات مختلف است.

همانند مطالعه سلمی و همکاران (۲۰۱۹)، درختان شهری تهران نسبت ناچیزی از آلاینده‌های هوا را می‌زدایند، بنابراین، اتخاذ رویکردی جامع در مدیریت کیفیت هوا ضروری است. در این راستا، علاوه بر تدوین سیاست‌های کارآمد، با تقویت زیرساخت‌های سبز با افزایش تعداد درختان سالم، حفظ و نگهداری درختان موجود، کاشت گونه‌های مقاوم و کم‌نیاز به منابع آبی، تمرکز بر کاشت درختان در مناطق آلوده مانند اطراف نیروگاه‌ها و صنایع، میزان انتشار آلاینده‌های هوا و دی اکسید کربن را کاهش داد. همچنین به کارگیری راهکارهای فنی به‌روز نیز از اهمیت بالایی دارد (Ariluoma et al., 2021). بنابراین، درختان، اگرچه به تنهایی قادر به رفع مشکل آلودگی نیستند، اما می‌توانند به‌عنوان بخشی از یک راهبرد مکمل، در کنار اقدامات کنترلی دیگر، نقش مهمی ایفا کنند. با توجه به محدودیت‌های توسعه کمی فضای سبز در تهران، تمرکز بر ارتقاء کیفیت فضای سبز موجود اهمیت ویژه‌ای دارد. برای مثال، بیش از ۷۵٪ از درختان تهران دارای قطر برابر سینه (DBH) کمتر از ۱۵/۲ سانتی‌متر هستند، که بیانگر جوان بودن اکثر درختان شهر است. این امر، نیاز به مراقبت‌های خاص از جمله آبیاری منظم، هرس علمی، و محافظت در برابر آسیب‌های فیزیکی و شیمیایی را برجسته می‌سازد.

نقش درختان نباید تنها به حذف آلاینده‌ها یا CO₂ محدود شود. اثرات مثبت آن‌ها در کاهش دمای محیط، تعدیل اثر جزیره گرمایی، کاهش آلودگی، ارتقای کیفیت زندگی شهری، ایجاد زیبایی بصری، خدمات فرهنگی و تأمین زیستگاه، بسیار فراتر از آمار مربوط به بهبود کیفیت هوا است. بنابراین، در ارزیابی جامع نقش درختان در شهر، لازم است

به سایر خدمات اکوسیستمی آن‌ها توجه کرد. از این رو، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، ابعاد دیگر خدمات اکوسیستمی درختان شهری تهران بررسی و ارزش گذاری شوند. در این مطالعه تنها به نقش درختان در بهبود کیفیت هوای شهر تهران پرداخته شده است و نقش سایر اجزا زیرساخت‌های سبز از جمله درختچه‌ها توجه نشده است. از این رو پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی نقش درختچه‌ها در ارتقای کیفیت هوا مورد توجه قرار گیرد.

در نهایت، یافته‌ها نشان می‌دهد که درختان شهری می‌توانند به‌طور مؤثر در کاهش آلودگی هوا و ارتقای سلامت و رفاه شهروندان نقش آفرینی کنند. میزان این تأثیرگذاری به عواملی مانند ترکیب گونه‌ای، وضعیت فیزیولوژیکی، اقلیم محلی و نوع آلاینده بستگی دارد. محاسبه ارزش اقتصادی این خدمات، می‌تواند در سیاست‌گذاری شهری و تخصیص بودجه در راستای توسعه فضای سبز نقش کلیدی داشته باشد. از این رو، طراحی هوشمندانه فضای سبز شهری و انتخاب گونه‌های مؤثر در جذب آلاینده‌ها، به‌ویژه $PM_{2.5}$ ، باید در اولویت مدیریت محیط‌زیست شهری قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از صندوق حمایت از پژوهشگران که بخشی از هزینه‌های این تحقیق را تأمین نموده است (شماره ۹۸۰۱۲۶۳۵)، تشکر و قدردانی می‌شود.

فهرست منابع

- آزموده، مریم و حیدری، ش (۱۳۹۳). اندازه‌گیری کمی میزان جذب آلاینده‌های ناشی از وسایل نقلیه توسط دیوارهای سبز. علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، شماره ۱۶.
- احدی، سولماز، روشنی، م، شهبازی، ح، کریمی، الف. (۱۴۰۳). گزارش سالانه کیفیت هوا و صدای تهران در سال ۱۴۰۲. شرکت کنترل کیفیت هوای تهران (<http://www.air.tehran.ir>).
- رجایی، علی (۱۳۹۷). ارایه راهکارهایی جهت کاهش آلودگی هوای شهر تهران. مجله نخبگان علوم و مهندسی، ۳(۱).
- روشنی، محسن، احدی، س، شهبازی، ح، خدام، ن، کریمی، اف. (۱۴۰۱). گزارش سالانه کیفیت هوا و صدای تهران در سال ۱۴۰۰. شرکت کنترل کیفیت هوای تهران (<http://www.air.tehran.ir>).
- عباس‌زاده‌تهرانی، نادیا، رضائی، م، بیات، ر، حسین‌زاده، م، رهایی، ع، معادی‌رودسری، م. ح، عبدالاحد، ع، و کرمی، ف. (۱۴۰۲). ضرورت توجه به ظرفیت برد محیط‌زیستی در طرح‌های توسعه شهری با نگاه به وضعیت کلان‌شهر تهران. مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی.
- کنشلو، هاشم و اقتصادی، ع. (۱۳۹۰). نقش جنگلکاری در کاهش آلاینده‌های نفتی (عناصر و فلزات سنگین). نشریه محیط زیست طبیعی، مجله منابع طبیعی ایران، ۶۴(۲): ۱۸۵-۱۹۷.
- میرقعی دینان، نغمه، نظری، م. ر، رشیدی، ی، کدیوری، ف، ابراهیمی، ا، پای، ا، رسول‌زاده، ر، بدره‌کرده، س، و عرفانی، س. (۱۳۹۹). گزارش دستورالعمل‌های اجرایی ماده ۱۲ قانون هوای پاک. سازمان حفاظت محیط زیست ایران.
- میرقعی، نغمه، شرزه‌ای، غ. ع، مخدوم، م، یآوری، ا. ر. (۱۳۸۸). ارائه الگوی ارزش گذاری مکانی کارکرد جذب گاز دی اکسید کربن در جنگل های خزری ایران، محیط شناسی، ۵۱: ۵۷-۶۸.

- Agaton, C. B., & Guila, P. M. C. (2023). Ecosystem services valuation of constructed wetland as a nature-based solution to wastewater treatment. *Earth*, 4(1), 78-92.
- Ariluoma, M., Ottelin, J., Hautamäki, R., Tuhkanen, E. M., & Mänttari, M. (2021). Carbon sequestration and storage potential of urban green in residential yards: A case study from Helsinki. *Urban Forestry & Urban Greening*, 57, 126939.
- Assessment, Millennium Ecosystem (MEA). (2005). Millennium ecosystem assessment. Vol. 2. *Millennium Ecosystem Assessment*.
- Baró, F., Chaparro, L., Gómez-Baggethun, E., Langemeyer, J., Nowak, D. J., & Terradas, J. (2014). Carbon dioxide reductions through urban forestry: Guidelines for professional and volunteer tree planters. *Ambio*, 43(4), 466-479.
- Barwise, Y., & Kumar, P. (2020). Designing vegetation barriers for urban air pollution abatement: A practical review for appropriate plant species selection. *Climate and Atmospheric Science*, 3(1), 12.
- Broecker, W. S. (1996). *Et tu, O2? 21stC, The World of Research at Columbia University. Special Issue: Biospheres*.
- Bui, H. T., Odsuren, U., Kim, S. Y., & Park, B. J. (2022). Seasonal variations in the particulate matter accumulation and leaf traits of 24 plant species in urban green space. *Land*, 11(11), 1981.

- Chaparro, L., & Terradas, J. (2009). Ecological services of urban forest in Barcelona. *Institut Municipal de Parcs i Jardins Ajuntament de Barcelona, Àrea de Medi Ambient*.
- Chávez-García, E., & González-Méndez, B. (2021). Particulate matter and foliar retention: current knowledge and implications for urban greening. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 14(9), 1433-1454.
- Chen, W. Y., & Jim, C. Y. (2008). Assessment and valuation of the ecosystem services provided by urban forests. *Ecology, planning, and management of urban forests: international perspectives*, 53-83.
- Chow, P., & Rolfe, G. L. (1989). Carbon and hydrogen contents of short-rotation biomass of five hardwood species. *Wood and Fiber Science*, 30-36.
- Dhakal, S. (2010). GHG emissions from urbanization and opportunities for urban carbon mitigation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2(4), 277-283.
- Escobedo, F. J., Kropp, J. P., & Zipperer, W. C. (2011). Urban forests and pollution removal: A review of the evidence and the role of trees. *Urban Forestry & Urban Greening*, 10(2), 97-108.
- Giardina, M., & Buffa, P. (2018). A new approach for modeling dry deposition velocity of particles. *Atmospheric Environment*, 180, 11-22.
- Gómez-Baggethun, E., & Barton, D. N. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 86, 235-245.
- 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.
- Hirabayashi, S. (2013). i-Tree Eco precipitation interception model descriptions version 1.0. U.S. *Forest Service*.
- Hirabayashi, S. (2021). Technical specifications of urban forests for air purification: A case study in Tokyo, Japan. *Trees, Forests and People*, 4, 100078.
- Intasen, M., Hauer, R. J., Werner, L. P., & Larsen, E. (2017). Urban forest assessment in Bangkok, Thailand. *Journal of Sustainable Forestry*, 36(2), 148-163.
- i-Tree Eco User's Manual, 2016. i-Tree Eco User's manual, i-Tree Tools.
- Jim, C. Y., & Chen, W. Y. (2009). Ecosystem services and valuation of urban forests in China. *Cities*, 26(4), 187-194.
- Kabisch, N., Qureshi, S., & Haase, D. (2015). Human-environment interactions in urban green spaces: A systematic review of contemporary issues and prospects for future research. *Environmental Impact Assessment Review*, 50, 25-34.
- Kumar, P. (2012). *The economics of ecosystems and biodiversity: ecological and economic foundations*. Routledge.
- Landrigan, P. J., Fuller, R., Acosta, N. J., Adeyi, O., Arnold, R., Baldé, A. B., & Zhong, M. (2018). The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet*, 391(10119), 462-512.
- Lee, Ahreum, Sujong Jeong, Jaewon Joo, Chan-Ryul Park, Jhoon Kim, and Sookyoung Kim. 2021. "Potential role of urban forest in removing PM2. 5: A case study in Seoul by deep learning with satellite data." *Urban Climate* 36: 100795.
- Li, X., Huang, Y., & Ma, X. (2021). Evaluation of the accessible urban public green space at the community scale with the consideration of temporal accessibility and quality. *Ecological Indicators*, 131, 108231.
- Li, Y. X., Ma, W., Zhang, W. X., & He, P. (2025). Estimating Small-Scale Forest Carbon Sequestration and Storage: i-Tree Eco Model Improved Application. *Forests*, 16(9), 1363.
- Lin, J., Kroll, C. N., & Nowak, D. J. (2020). Ecosystem service-based sensitivity analyses of i-Tree Eco. *Arboriculture and Urban Forestry*, 46(4), 287-306.
- Lisboa, M. A. N., da Silva, L. V. A., da Silva Nascimento, A., de Oliveira Silva, A., Teixeira, M. R. A., Ferreira, M. F. R., & Júnior, J. T. C. (2024). Diversity, structure, and carbon sequestration potential of the woody flora of urban squares in the Brazilian semiarid region. *Trees, Forests and People*, 16, 100561.
- Ma, B., Zhou, T., Lei, S., Wen, Y., & Htun, T. T. (2019). Effects of urban green spaces on residents' well-being. *Environment, Development and Sustainability*, 21, 2793-2809.
- McPherson, E. G. (2007). Benefit-based tree valuation. *Arboriculture & Urban Forestry* 33 (1): 1-11, 33(1), 1-11.
- McPherson, E. Gregory, Qingfu Xiao, Natalie S. van Doorn, John de Goede, Jacquelyn Bjorkman, Allan Hollander, Ryan M. Boynton, James F. Quinn, and James H. Thorne. 2017. "The structure, function and value of urban forests in California communities." *Urban Forestry & Urban Greening* 28: 43-53.
- Mikulanis, V. (2014). Phoenix, Arizona project area, community forest assessment. *U.S. Forest Service*.
- Motesadi-Zarandi, S., Molla-Norouzi, M., Hosseini, M., Nazari, F. (2015). Development of an applicable tree air quality benefit calculator (Pars Tac) in Iran. *Int. J. Biol. Pharm. Allied Sci.* 4, 5141- 5158.
- Moura, B. B., Zammarchi, F., Manzini, J., Hoshika, Y., Brilli, L., Vagnoli, C., ... & Ferrini, F. (2024). Assessment of seasonal variations in particulate matter accumulation and elemental composition in urban tree species. *Environmental Research*, 252, 118782.
- Nowak, D. J. (2005). Strategic tree planting as an EPA encouraged pollutant reduction strategy: how urban trees can obtain credit in state implementation plans. *Sylvan Communities* 23-27.

- Nowak, D. J. (2017). Assessing the benefits and economic values of trees. In *Routledge handbook of urban forestry* (pp. 152-163). Routledge.
- Nowak, D. J. (2017). Assessing the benefits and economic values of trees. In *Routledge handbook of urban forestry* (pp. 152-163). Routledge.
- Nowak, D. J., & Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental pollution*, 116(3), 381-389.
- Nowak, D. J., & Dwyer, J. F. (2007). Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems. In *Urban and community forestry in the northeast* (pp. 25-46). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4(3-4), 115-123.
- Nowak, D. J., Cumming, A., & Twardus, D. (2011). Urban forests of Tennessee. General Technical Report SRS-149. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station.
- Nowak, D. J., Greenfield, E. J., Hoehn, R. E., & Lapoint, E. (2013). Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental pollution*, 178, 229-236.
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A., & Greenfield, E. (2014). Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental pollution*, 193, 119-129.
- Nowak, David J. 2017. "Assessing the benefits and economic values of trees." In *Routledge handbook of urban forestry* 152-163. Routledge.
- Nowak, David J., Daniel E. Crane, and Jack C. Stevens. 2006. "Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States." *Urban forestry & urban greening*, 4, no. 3-4: 115-123.
- Nowak, David J., Eric J. Greenfield, Robert E. Hoehn, and Elizabeth Lapoint. 2013. "Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States." *Environmental pollution* 178: 229-236.
- Ostad-Ali-Askari, K., & Shayannejad, M. (2021). Quantity and quality modelling of groundwater to manage water resources in Isfahan-Borkhar Aquifer. *Environment, Development and Sustainability*, 23(11), 15943-15959.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... & van Ypersele, J. P. (2014). Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 151. Ipcc.
- Parsa, V. A., Salehi, E., Yavari, A. R., & van Bodegom, P. M. (2019). Analyzing temporal changes in urban forest structure and the effect on air quality improvement. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101548.
- Parsa, Vahid Amini, Esmail Salehi, Ahmad Reza Yavari, and Peter M. van Bodegom. 2019. "Analyzing temporal changes in urban forest structure and the effect on air quality improvement." *Sustainable Cities and Society* 48: 101548.
- Rasoolzadeh, R., Dinan, N. M., Esmailzadeh, H., & Rashidi, Y. (2022). Investigating the Urban trees' diversity in Tehran-Iran using i-Tree Eco model. *Journal of Wildlife and Biodiversity*, 6(2), 61-73.
- Rasoolzadeh, R., Mobarghaee Dinan, N., Esmailzadeh, H., Rashidi, Y., & Sadeghi, S. M. M. (2023). Assessment of air pollution removal by urban trees based on the i-Tree Eco Model: The case of Tehran, Iran. *Integrated Environmental Assessment and Management*.
- Rasoolzadeh, R., Mobarghaee Dinan, N., Esmailzadeh, H., Rashidi, Y., Marcu, M. V., & Sadeghi, S. M. M. (2024). Carbon sequestration and storage of urban trees in a polluted semiarid city. *Forests*, 15(9), 1488.
- Riley, C. B., Herms, D. A., & Gardiner, M. M. (2018). Exotic trees contribute to urban forest diversity and ecosystem services in inner-city Cleveland, OH. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 367-376.
- Riondato, E., Pilla, F., Basu, A. S., & Basu, B. (2020). Investigating the effect of trees on urban quality in Dublin by combining air monitoring with i-Tree Eco model. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102356.
- Ryu, J., Kim, J. J., Byeon, H., Go, T., & Lee, S. J. (2019). Removal of fine particulate matter (PM_{2.5}) via atmospheric humidity caused by evapotranspiration. *Environmental pollution*, 245, 253-259.
- Sahle, M., Saito, O., Fürst, C., & Yeshitela, K. (2018). Quantification and mapping of the supply of and demand for carbon storage and sequestration service in woody biomass and soil to mitigate climate change in the socio-ecological environment. *Science of the total environment*, 624, 342-354.
- Selmi, W., Weber, C., Rivière, E., Blond, N., Mehdi, L., & Nowak, D. (2016). Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. *Urban Forestry & Urban Greening*, 17(2), 192-201.
- Selmi, Wissal, Christiane Weber, Emmanuel Rivière, Nadège Blond, Lotfi Mehdi, and David Nowak. 2016. "Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France." *Urban forestry & urban greening* 17: 192-201.
- Shahbazi, H., Abolmaali, A. M., Alizadeh, H., Salavati, H., Zokaei, H., Zandavi, R., ... & Hosseini, V. (2022). An emission inventory update for Tehran: The difference between air pollution and greenhouse gas source contributions. *Atmospheric Research*, 275, 106240.

- Song, P., Kim, G., Mayer, A., He, R., & Tian, G. (2020). Assessing the ecosystem services of various types of urban green spaces based on i-Tree Eco. *Sustainability*, 12(4), 1630.
- Song, X. P., Tan, P. Y., Edwards, P., & Richards, D. (2018). The economic benefits and costs of trees in urban forest stewardship: A systematic review. *Urban forestry & urban greening*, 29, 162-170.
- Talebmorad, H., Abedi-Koupai, J., Eslamian, S., Mousavi, S. F., Akhavan, S., Ostad-Ali-Askari, K., & Singh, V. P. (2021). Evaluation of the impact of climate change on reference crop evapotranspiration in Hamedan-Bahar plain. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 11(3), 333-347.
- United Nations. (2019). World urbanization prospects: The 2018 revision. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. <https://www.un.org/development/desa/publications/world-urbanization-prospects-the-2018-revision.html>.
- Wang, Y., Chang, Q., & Li, X. (2021). Promoting sustainable carbon sequestration of plants in urban greenspace by planting design: A case study in parks of Beijing. *Urban Forestry & Urban Greening*, 64, 127291.
- Watkiss, P., Hunt, A., Blyth, W., & Dyszynski, J. (2015). The use of new economic decision support tools for adaptation assessment: A review of methods and applications, towards guidance on applicability. *Climatic Change*, 132(3), 401-416.
- Watson, A. S., & Bai, R. S. (2025). Studies on ecosystem services and air-pollution mitigation in tropical urban vegetation using i-Tree Eco Model. *Environment, Development and Sustainability*, 1-18.
- World Bank. (2020). Retrieved from <https://data.worldbank.org/indicator/SP.DYN.LE00.IN?locations=IT>
- Yang, J., McBride, J., Zhou, J., & Sun, Z. (2005). The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban forestry & urban greening*, 3(2), 65-78.
- Yao, Y., Wang, Y., Ni, Z., Chen, S., & Xia, B. (2022). Improving air quality in Guangzhou with urban green infrastructure planning: An i-Tree Eco model study. *Journal of Cleaner Production*, 369, 133372.
- Yousoufpour, Y., Abolhassani, L., Hirabayashi, S., Burgess, D., Sabouni, M. S., & Daneshvarkakhki, M. (2024). Ecosystem services and economic values provided by urban park trees in the air polluted city of Mashhad. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105110.



بررسی تغییرات پوشش اراضی با استفاده از دو نرم افزار متلب و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی شهر تهران)

محمد مهدی خلیلی^۱ ✉، بهرام ملک محمدی^۲، زهرا دهقان منشادی^۳

۱. دانشجوی دکترا، برنامه ریزی، مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. نویسنده مسئول: mm.khalili@ut.ac.ir
۲. استاد، گروه برنامه ریزی، مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳. دانشجوی دکترا، برنامه ریزی، مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخها: دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۷	نقشه‌های پوشش اراضی، نقش تعیین کننده ای در برنامه ریزی برای توسعه پایدار شهری دارند از این رو تهیه آنها، از داده‌های سنجش از دور برای نقشه‌برداری، ارائه گزارش‌های عملیاتی و به دست آوردن اطلاعات برای پیشبرد فعالیت‌های علمی، مهم و ضروریست. با دسترسی آزاد به تصاویر ماهواره‌ای، تولید این نوع از نقشه‌ها افزایش یافته است. این نقشه‌ها به دلیل پایش موثر و ارائه راهکارهایی برای افزایش کیفیت محیط - زیست اهمیت دارد این مطالعه با هدف تهیه نقشه‌های پوشش اراضی در شهر تهران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 5 و 8 در بازه زمانی ۱۹۸۹-۲۰۲۳ نگارش یافته است. اهمیت این تحقیق در ارائه مقایسه‌ای میان دو نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی و متلب برای تهیه این نقشه‌ها است. دو ابزاری که خروجی آن‌ها می‌تواند برای تصمیم‌گیری در حوزه برنامه‌ریزی شهری، مدیریت سرزمین و ارزیابی ظرفیت زیستی شهر استفاده شود. نتایج این پژوهش نشان داد، تغییرات قابل توجهی در طبقات پوشش گیاهی، فضای انسان ساخت و بایر در این بازه زمانی رخ داده است. مقدار عددی فضای انسان ساخت روندی صعودی داشته در حالی که طبقات پوشش گیاهی و بایر الگویی نزولی داشته‌اند. نوسان تغییرات برای این شاخص‌ها به ترتیب (۵۶۷/۱۹ - ۲۷۵/۲۳)، (۱۴۴/۴۵ - ۸۱/۳۲) و (۶۱/۶۴ - ۳۱۰/۱۷) کیلومتر مربع محاسبه شد. مقدار پهنه آبی نیز در فاصله (۱/۳۳ - ۰/۲۱) است. تصاویر بدست آمده از نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی، در نرم افزار متلب استفاده شد، تا قابلیت های دو نرم افزار در تهیه نقشه پوشش اراضی مقایسه شود. مقایسه تصاویر، مشخص کرد که روند تغییرات تمامی طبقات در دو نرم افزار مشابه بوده اما نتایج عددی تا حدودی متفاوت است. بیشترین فاصله عددی محاسبه شده مربوط به طبقه پوشش گیاهی در سال ۲۰۱۹ به میزان ۴۷ کیلومتر مربع و کمترین تفاوت عددی نیز مربوط به فضای انسان ساخت در سال ۱۹۸۹ به مقدار ۴ کیلومتر مربع برآورد شد. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند، داده‌های مفیدی را به منظور تعیین پوشش اراضی در محدوده شهر تهران در اختیار برنامه ریزان شهری قرار دهد.

استناد: خلیلی، محمد مهدی، ملک محمدی، بهرام، دهقان منشادی، زهرا (۱۴۰۴). بررسی تغییرات پوشش اراضی با استفاده از دو نرم افزار متلب و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی شهر تهران). *رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط*، ۲(۲): ۱۵۸-۱۴۳.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2050811.1079>

© ۱۴۰۴ (۲۰۲۶) نویسندگان مقاله، نشریه رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط، ناشر: سازمان مطالعه و تدوین کتب دانشگاهی در علوم اسلامی و انسانی (سمت).



Evaluation of land cover changes using MATLAB and ArcGIS software; a case study of Tehran city

Mohammadmahdi Khalili ¹ ✉ , Bahram Malek Mohammadi ², Zahra Dehghan Manshadi ³

1. Ph.D. Candidate, Department of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. Corresponding author: mm.khalili@ut.ac.ir
2. Professor, Department of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.
3. Ph.D. Candidate, Department of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

Article Info

History

Received: October 04, 2025

Accepted: November 28, 2025

Keywords

Remote sensing
Land cover
Arc GIS
MATLAB

Abstract

Land cover maps play a crucial role in planning for sustainable urban development, therefore, their preparation from remote sensing data for mapping, providing operational reports, and obtaining information for advancing scientific activities is important and necessary. With free access to satellite images, the production of this type of maps has increased. The accuracy of these maps is important for effective monitoring and providing solutions for increasing environmental quality. This study was written with the aim of preparing land cover maps in Tehran using Landsat 8 and Landsat 5 satellite images in the period 1989-2023. The importance of this research lies in providing a comparison between the two software Arc GIS and MATLAB, for preparing these maps. Two tools whose output can be used for decision-making in the field of urban planning, land management, and assessing the urban carrying capacity. The results of this research showed that significant changes have occurred in the vegetation cover classes, built and barren space during this period. The numerical value of built-up area had an upward trend, while the vegetation and barren areas experienced a downward trend. The fluctuation of changes for these indicators was calculated as (19.567 - 23.275), (45.144 - 32.81) and (17.310 - 64.61) km², respectively. The amount of water area was also estimated in the range (1.33 - 0.21). The output of the images obtained from the Arc GIS software was used as the input of the MATLAB software to compare the capabilities of the two software in preparing land cover maps. By comparing the images, it was determined that the change trends of all classes in the two software were similar, but the numerical results were somewhat different. The largest calculated numerical distance related to the vegetation cover class in 2019 was 47 km², and the smallest numerical difference related to the built-up area in 1989 was estimated at 4 km². The results of this study can provide useful data for urban planners to determine land cover within the city of Tehran.

Citation: Khalili, M., Malek Mohammadi, B., & Dehghan Manshadi, Z. (2025). Evaluation of land cover changes using MATLAB and ArcGIS software; a case study of Tehran city. *Innovative Approaches in Human–Environment Studies*, 2(2), 143-158.
<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2050811.1079>

© 2025 Authors, Innovative Approaches in Human–Environment Studies.

Publisher: The Organization for Researching and Composing University Textbooks in the Islamic Science and Humanities (SAMT)

مقدمه

یافته‌های اخیر محیط زیست شهری نشان می‌دهد، شهرنشینی و صنعتی شدن از مؤلفه‌های مهم تغییر کاربری و پوشش اراضی است که با هجوم اکثریت جمعیت جهان به شهرها، اهمیت آن افزایش یافته‌است (et al Ahmed., 2020). کاهش فضای سبز و باز در محیط‌های شهری موجب بروز مشکلات متعددی مانند آلودگی هوا، جزایر حرارتی و آلودگی صوتی می‌شود که این عوامل بر سلامت و رفاه شهروندان تأثیر می‌گذارند (Lopes et al., 2025). فضاهای سبز شهری مزایای اکوسیستمی مانند بهبود کیفیت هوا، آب، خاک و کارکردهای روانشناختی مانند کاهش استرس، فراهم کردن فضایی برای تفکر، فعالیت و آرامش دارند. (Nasehi & Imanpour namin., 2020, Dehghan Manshadi et al., 2023). از نظر اجتماعی شهروندان به استفاده از فضای شهر، افزایش انسجام اجتماعی و بالا رفتن تعاملات مشتاق می‌کند و منافع اقتصادی مانند کاهش آلودگی، پیشگیری و کاهش بروز بیماری‌ها، جذب بازدیدکنندگان و ایجاد درآمد و اشتغال را در پی دارد (Khalili et al., 2024; Yu et al., 2024). بنابراین بررسی زمانی و مکانی و آشکارسازی دقیق و به موقع تغییرات پوشش اراضی، نقش مهمی در فرآیند برنامه ریزی و مدیریت منابع طبیعی دارد (al Dehghan Manshadi et., 2024).

طبقه‌بندی پوشش اراضی شامل: انواع جنگل‌ها، مناطق شهری و زمین‌های کشاورزی، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است. این طبقه‌بندی به عنوان یک مجموعه داده اساسی برای مطالعات تشخیص تغییرات عمل می‌کند که هدف آن شناسایی، تجزیه و تحلیل تغییرات پوشش زمین در طول زمان است (Ahmed et al., 2020). محققان با مقایسه نقشه‌های پوشش اراضی دوره‌های مختلف، می‌توانند الگوهای تغییر، مانند جنگل‌زدایی و گسترش شهری را تشخیص دهند (Das et al., 2021).

پیشرفت داده‌های سنجش از دور، در دسترس بودن و گستردگی کاربرد آن، همچنین توسعه حسگرها و بالا رفتن قدرت محاسباتی نرم افزارهای موجود، سبب افزایش مطالعات در این زمینه شده‌است (Zhu et al., 2022). داده‌های سنجش از دور مانند تصاویر ماهواره‌های لندست و سنتینل، شامل یک دوره طولانی از مشاهدات سطح زمین است که به منظور تشخیص، نظارت و نقشه برداری از پویایی تغییرات پوشش و کاربری اراضی در اختیار عموم قرار گرفته‌است (Delaney et al., 2025). با این حال، چالش‌هایی همچون انتخاب مناسب‌ترین نرم‌افزار پردازش تصویر و ارزیابی دقت نتایج حاصل از روش‌های مختلف، همچنان به قوت خود باقی است. بنابراین، نیاز است که پژوهش‌های بیشتری در این زمینه انجام شود.

سرعت تغییر کاربری اراضی در تهران و تأثیر گسترده آن بر پایداری محیط‌زیست شهری، بر اهمیت پایش دقیق و تحلیل ساختاری این تغییرات افزوده‌است. بسیاری از پژوهش‌های پیشین از تصاویر ماهواره‌ای برای طبقه‌بندی پوشش اراضی استفاده کرده‌اند اما تنها بر یک نرم‌افزار یا یک الگوریتم طبقه‌بندی تمرکز داشته، به مقایسه دقیق پردازشی میان ابزارهای مختلف توجه نکرده‌اند. علاوه بر این، به کاربرد زبان‌های برنامه‌نویسی پیشرفته مانند متلب در تحلیل تغییرات پوشش اراضی کمتر توجه داشته‌اند. مرور مطالعات اخیر نشان می‌دهد که اگرچه تحلیل تغییرات پوشش اراضی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف انجام شده، به ارزیابی تطبیقی ابزارها و روش‌های پردازش تصویر در محیط‌های نرم‌افزاری مختلف کمتر پرداخته‌اند. بر این اساس، هدف اصلی مطالعه حاضر، تحلیل تغییرات پوشش اراضی شهر تهران طی بازه زمانی ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۳ با استفاده از طبقه‌بندی حداکثر احتمال در محیط نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی و زبان برنامه‌نویسی متلب است. این پژوهش تلاش دارد ضمن مقایسه نتایج حاصل از این دو محیط نرم‌افزاری، دقت محاسباتی هر یک را ارزیابی کند.

متلب یک زبان برنامه‌نویسی برای انجام محاسبات عددی است که Math Works آن را توسعه داد. متلب از جبر خطی، پردازش سیگنال، پردازش تصویر و سایر توابع ریاضی پشتیبانی می‌کند (Chen & Huang, 2025). این زبان، قابلیت‌های زیادی برای مصورسازی داده‌ها دارد و به کاربران این امکان را می‌دهد تا نمودارها و انیمیشن‌های دوبعدی و سه‌بعدی با کیفیت بالا ایجاد کنند؛ داده‌های خود را به طور مؤثر تجزیه و تحلیل نمایند. علاوه بر این، متلب به طور یکپارچه با سایر زبان‌های برنامه‌نویسی، از جمله C، C++، Fortran، Java و Python ترکیب می‌شود و امکان استفاده مجدد از کد را در پلتفرم‌ها و سیستم‌های مختلف فراهم می‌کند (Kafy et al., 2021; Trauth, 2025).

نوآوری اصلی این تحقیق در بهره‌گیری همزمان از دو محیط نرم‌افزاری متفاوت و انجام مقایسه تطبیقی دقت محاسبات تغییرات پوشش اراضی است که می‌تواند در شناسایی بهینه‌ترین ابزارهای تحلیل فضایی در مطالعات شهری و محیط‌زیستی مؤثر باشد.

سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیای از ابزارهای اصلی در تحلیل تغییرات پوشش اراضی است که در سال‌های اخیر استفاده از داده‌های آن‌ها گسترش زیادی داشته‌است. پژوهش Tahir et al. (۲۰۲۵) از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که منطقه لاهور، گسترش بی‌برنامه شهری را در طول سه دهه گذشته داشته‌است. به طوری که مناطق مسکونی در حدود ۳۵۹٫۸ کیلومتر مربع با تخریب پوشش گیاهی به مساحت ۱۹۸٫۷ کیلومتر مربع و زمین‌های بایر به مساحت ۱۵۸٫۵ کیلومتر مربع افزایش یافت. همچنین در این پژوهش ارزیابی صحت طبقه‌بندی نظارت‌شده با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی نشان داد که این طبقه‌بندی، بیشتر از ۹۰٪ دقت دارد.

Abebe et al. (۲۰۲۲) بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۶ پژوهش را با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در منطقه گوبالاتو انجام داد که نشان می‌دهد در ۳۰ سال گذشته پوشش جنگلی، مراتع و زمین‌های کشاورزی کاهش قابل توجهی داشته‌است. به طور کلی، این تغییرات با افزایش جمعیت و فعالیت‌های انسانی مانند چوب سوخت، تولید زغال چوب، گسترش مناطق کشت و سکونت در منطقه گوبالاتو، شمال شرقی اتیوپی مرتبط است.

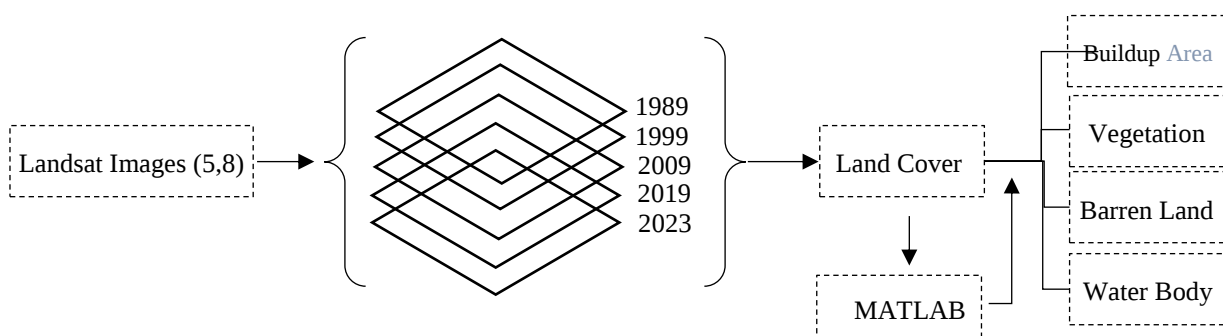
مروری بر مطالعات تغییرات کاربری و پوشش زمین در نپال (Paudel et al., 2016) این ادعاها را تأیید کرد که پوشش جنگلی و برفی/یخچالی با افزایش زمین‌های زراعی و سازه‌های انسان‌ساخت - به ویژه شهرنشینی مرتبط با تکه‌تکه شدن زیستگاه - کاهش یافته‌است. براساس این یافته‌ها، تکه‌تکه شدن زیستگاه و جنگل‌زدایی - در صدر شهرنشینی - تهدیدی جدی برای توسعه پایدار منابع طبیعی نپال است که خدمات حیاتی اکوسیستم را ارائه می‌دهند. یافته‌های مشابهی که تغییرات بی‌سابقه کاربری و پوشش زمین را در ۳۰ سال گذشته، به ویژه در هسته‌های شهری، از جمله کاتماندو، برجسته می‌کند، در مطالعات موجود گزارش شده‌است به عنوان مثال Khanal et al. (۲۰۱۹) در تجزیه و تحلیل خود از الگوهای رشد تاریخی شهری در دره کاتماندو گزارش می‌دهند که مناطق مسکونی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ بیش از دو برابر شده‌است مطالعه مشابه Ishtiaque et al. (۲۰۱۷) گزارش می‌دهد که مناطق شهری در عرض ۳۰ سال تقریباً ۴۱۲ درصد گسترش یافته‌اند و به نیاز مبرم به تجزیه و تحلیل سیستماتیک عمده از روند شهرنشینی و کاربری زمین و پوشش زمین اشاره می‌کند. بر اساس داده‌های سری زمانی ۳۳ ساله، Thapa and Murayama (۲۰۰۹) مشاهده کردند که مناطق شهری انسان‌ساخت در دره کاتماندو در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ روند رشد آهسته‌ای داشتند که از دهه ۱۹۸۰ به سرعت افزایش یافته‌است. علاوه بر این، Haack and Rafter (۲۰۰۶) در مطالعه خود برای بررسی تغییرات شهری در دره کاتماندو، افزایش ۴۵۰ درصدی بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۰ را گزارش کرد که یافته‌های گزارش شده توسط مطالعات (BHAGAWAT RIMAL; Ishtiaque et al., 2017; Khanal et al., 2019; Paudel et al., 2016; Thapa & Murayama, 2009) مبنی بر افزایش قابل توجه رشد شهری از سال ۲۰۰۰ را تأیید می‌کند. با وجود تهدیدی که شهرنشینی سریع، بر خدمات اکوسیستم و رفاه انسان دارد، هیچ یک از این مطالعات بر منطقه کاتماندو (هسته دره کاتماندو) تمرکز نکرده و با وجود اهمیت تغییرات کاربری و پوشش زمین برای برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران، آینده آن را پیش‌بینی نکرده‌اند. با این حال، این مطالعات بر لزوم مطالعات علمی قوی‌تر برای تعمیق درک موجود از پویایی تغییر کاربری و پوشش زمین، برای هدایت سیاستمداران، تصمیم‌گیرندگان و برنامه‌ریزان شهری برای طراحی و اجرای برنامه‌های توسعه پایدار، توافق و تأکید داشتند (Wang et al., 2020).

استفاده از نرم افزار متلب در محاسبات پوشش اراضی علاوه بر نشان دادن وضعیت موجود مناطق مطالعاتی، جنبه آینده نگری برای سال‌های آتی دارد. برای نمونه، Ullah et al. (۲۰۲۵) در پاکستان، وضعیت پوشش اراضی را تا سال ۲۰۲۰ بررسی

کرده و یک رویکرد پیش بینانه برای پوشش اراضی منطقه مطالعاتی تا سال ۲۰۵۰، در صورت ادامه یافتن وضعیت موجود ارائه کرده اند. به اعتقاد این محققان، تحقیقات آینده باید پیامدهای گسترش مناطق مسکونی و گرمایش شهری را بر ساکنان محلی بررسی کرده و برنامه ریزی شهری همراه با سیاست های پاسخگو به تغییرات اقلیمی در سطوح منطقه ای و ملی تدوین گردد. Choudhury et al. (۲۰۲۳) نیز با استفاده از متلب وضعیت پوشش اراضی را در آینده برای کشور هند بررسی کرده و معتقداند متلب در پیش بینی وضعیت پوشش اراضی کاربردی است و تحقیقات بیشتری برای گنجانیدن طیف گسترده ای از داده های خاک و کلاس های طبقات پوشش اراضی برای ایجاد یک طبقه بندی جامع با استفاده از ابزارهای مبتنی بر یادگیری ماشین لازم است. Stateczny et al. وضعیت پوشش اراضی را با استفاده از متلب در شهرهای مختلف اروپا بررسی کردند و از دیدگاه آنها وجود یک استراتژی مبتنی بر بهینه سازی ترکیبی برای بهبود بیشتر طبقه بندی پوشش اراضی ضروری است.

روش پژوهش

محدوده مطالعاتی در این پژوهش، مناطق ۲۲ گانه شهر تهران است. تصاویر ماهواره ای مورد نیاز شامل لندست ۵ و ۸ از سایت USGS دریافت شده، سپس به عنوان ورودی در نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی پردازش شدند. برای بررسی تغییرات پوشش اراضی، دوره زمانی ۳۴ ساله (۱۹۸۹-۲۰۲۳) انتخاب گردید و در بازه های زمانی ده ساله شامل ۱۹۸۹، ۱۹۹۹، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۹، این تصاویر ماهواره ای مقایسه شدند. در ادامه تصاویر ماهواره ای سال ۲۰۲۳ نیز برای بررسی آخرین تغییرات اقلیمی به تصاویر ۴ دوره قبلی افزوده و مقایسه گردید شکل ۱، فرآیند روش پژوهش را نشان می دهد



شکل ۱ فرآیند روش پژوهش

جدول شماره ۱ اطلاعات مربوط به تصاویر ماهواره ای دریافت شده از سایت USGS را نمایش می دهد برای پیشگیری از بروز تداخل در محاسبات به ویژه برآورد میزان سبزیگی، ماه های جولای و آگوست که در آنها شاخص سبزیگی در مقدار حداکثری هستند برای دوره مطالعاتی ۳۴ ساله (۱۹۸۹-۲۰۲۳) انتخاب شدند.

جدول ۱ اطلاعات تصاویر ماهواره ای دریافت شده از سایت USGS (۲۰۲۴)

سال	تاریخ سری زمانی	نوع تصویر ماهواره ای	پوشش ابری
۱۹۸۹	۲۹-۸-۱۹۸۹	Landsat 5	کمتر از ۲۰ درصد
۱۹۹۹	۹-۸-۱۹۹۹	Landsat 5	کمتر از ۲۰ درصد
۲۰۰۹	۱۹-۷-۲۰۰۹	Landsat 5	کمتر از ۲۰ درصد
۲۰۱۹	۱۶-۸-۲۰۱۹	Landsat 8	کمتر از ۲۰ درصد
۲۰۲۳	۱۱-۸-۲۰۲۳	Landsat 8	کمتر از ۲۰ درصد

در طبقه‌بندی پوشش اراضی، اصلاحات اتمسفریک و رادیومتریک با استفاده از نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی ورژن ۱۰٫۸ اجرا شد. سپس تصاویر سال های ۱۹۸۹، ۱۹۹۹، ۲۰۰۹، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۳ در چهار گروه شامل طبقه سبز، فضای انسان ساخت، طبقه حاوی مناطق بایر و مناطق دارای پهنه آب سطحی دسته‌بندی شدند. جدول شماره ۲ ویژگی های چهار طبقه‌بندی استفاده شده در نقشه پوشش اراضی را نشان می‌دهد

جدول ۲ توصیف طبقات استفاده شده در نقشه پوشش اراضی

طبقات پوشش اراضی	توصیف
Buildup Area	مناطق مسکونی، شبکه حمل و نقل و خدمات تجاری
Barren Land	زمین‌های بایر، دشت
Vegetation	پوشش های گیاهی متراکم و پراکنده، درختان، زمین‌های کشاورزی، مرتع
Water Body	دریاچه، تالاب، رودخانه

در این پژوهش، برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای و تهیه نقشه‌های پوشش اراضی، از دو محیط نرم‌افزاری مختلف، سیستم اطلاعات جغرافیایی و متلب، استفاده شد. هر یک از این نرم‌افزارها از الگوریتم‌ها و رویکردهای متفاوتی برای طبقه‌بندی پشتیبانی می‌کنند که بر فرآیند تحلیل تأثیر دارد.

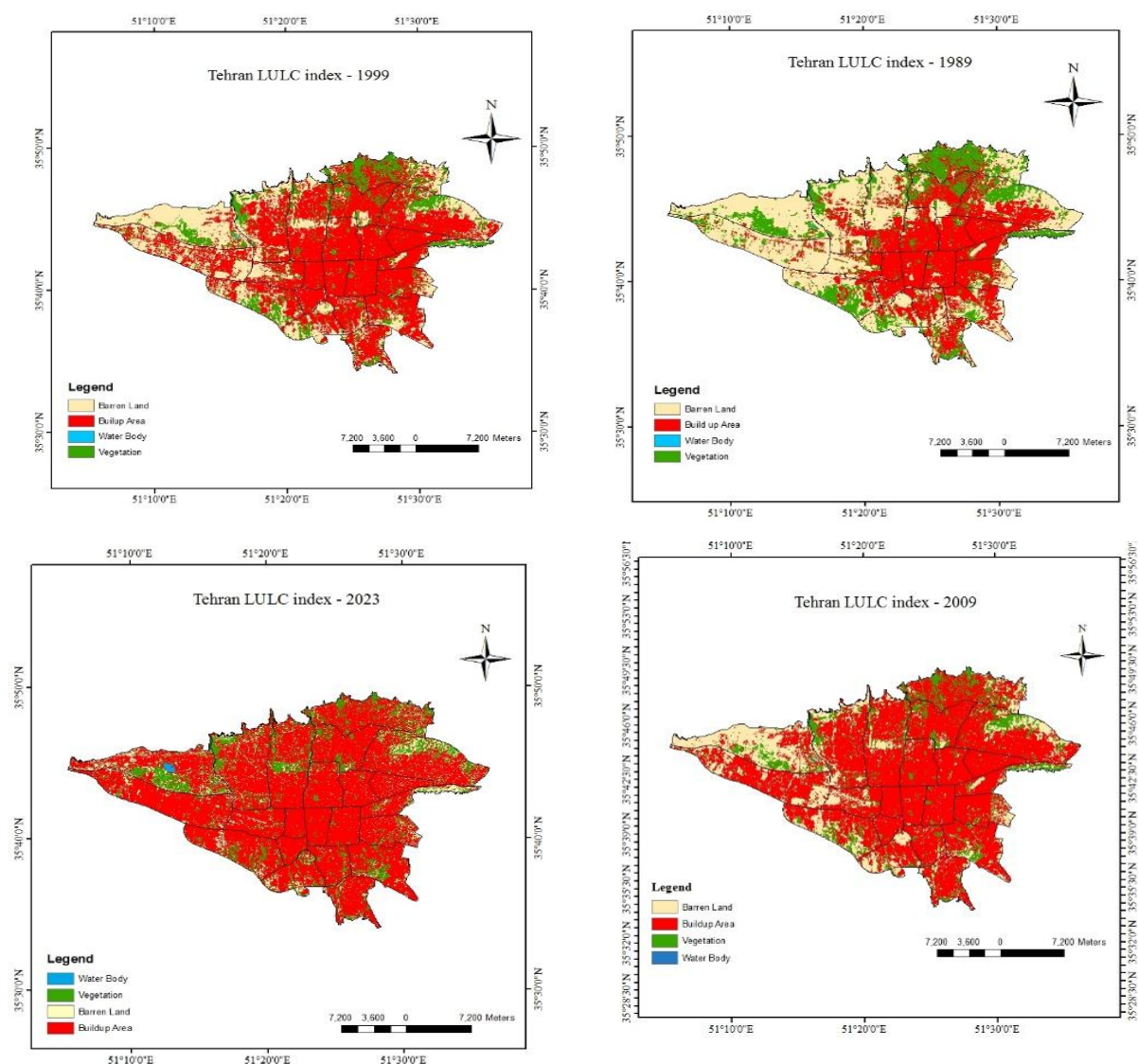
طبقه‌بندی تصاویر، در نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی، با استفاده از الگوریتم Maximum Likelihood Classification (MLC) انجام می‌شود. این الگوریتم بر پایه تحلیل آماری عمل کرده و فرض می‌کند که توزیع داده‌ها در هر کلاس به صورت نرمال (Gaussian) است. MLC در محیط‌هایی با تفکیک طیفی خوب و داده‌های با توزیع آماری مناسب، عملکرد مناسبی دارد و از الگوریتم‌های متداول در نرم‌افزارهای سنتی سنجش از دور محسوب می‌شود (Richards & Jia, 2006). این الگوریتم از داده‌های آماری مانند بردار میانگین و ماتریس کواریانس (هر طبقه از تصویر استخراج شده از فایل Signature) استفاده می‌کند بنابراین، احتمال هر سلول رستر متعلق به هر طبقه محاسبه شده و مشخص می‌کند که یک سلول با بیشترین احتمال ممکن به کدام طبقه اختصاص دارد. در این مطالعه، از قابلیت Image Processing در نرم افزار متلب استفاده شد. این قابلیت در متلب حاوی تعداد زیادی ابزارها (TOOLS) و توابع (Functions) به منظور پردازش تصاویر، آنالیز و تصویرسازی است.

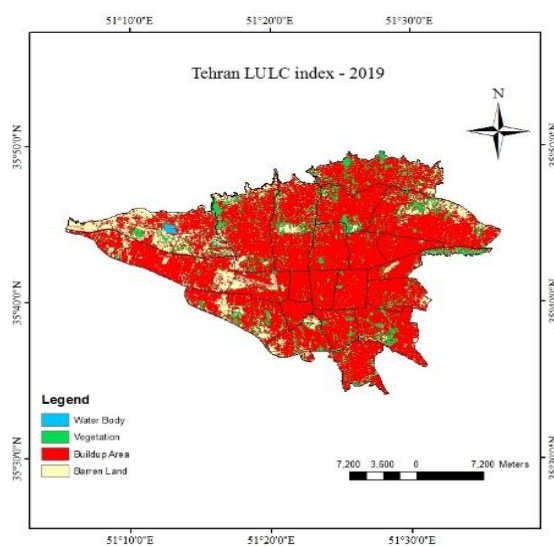
طبقه‌بندی تصویر در متلب یا همان Segmentation ابزاری است که به منظور مشخص کردن میزان روشنایی (Brightness) یا شدت رنگ پیکسلی (Intensity) استفاده می‌شود. تصاویری که در این مطالعه بوسیله متلب پردازش شده‌اند، خروجی نقشه‌های بدست آمده در نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی بوده که با استفاده از قابلیت Image Processing این پردازش برای آن‌ها انجام شده است و بدین طریق امکان محاسبه مجدد مقادیر هر طبقه محاسبه شده در سیستم اطلاعات جغرافیایی برای متلب نیز فراهم گردید تا دقت محاسبات در هر دو نرم افزار سنجیده شود. Image Segmenter APP قابلیت است که در متلب به منظور تعیین آستانه (Threshold) شدت رنگ پیکسلی (Intensity) است. با تغییر عددی این قابلیت، امکان جداسازی پیکسلی برای هر طبقه پوشش اراضی فراهم گردید به طوریکه با تغییر دستی (Manually) آن، امکان مشاهده همزمان تغییرات وجود داشته و در نتیجه کاربر می‌تواند خطاهای تشخیص پیکسلی در نرم افزار را بدین طریق برطرف کند.

یافته‌های پژوهش

شکل ۲ تغییرات پوشش اراضی شهر تهران را در بازه زمانی ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۳ نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سه طبقه «سبز»، «بایر» و «ساخته‌شده» در طول این دوره ۳۴ ساله تغییرات عمده‌ای داشته‌اند، در حالی که پهنه‌های آبی، که تنها در

تصاویر مربوط به سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۳ (همچون دریاچه مصنوعی چیتگر) نمایان شده‌اند، تغییرات قابل توجهی نداشته‌اند. این موضوع به ماهیت انسان‌ساخت این پهنه‌ها بازمی‌گردد. با توجه به نقشه‌های پوشش اراضی شهر تهران، در سال ۱۹۸۹ می‌توان دریافت که بیشترین میزان مناطق دشتی و زمین‌های بایر در فضای اطراف شهر تهران، شامل غرب، شمال غرب، شمال شرق و تا حدودی در بخش جنوب شهر وجود داشته‌است. بیشتر مناطق انسان‌ساخت در محدوده مرکزی شهر تهران تمرکز دارد در حالی که بیشترین میزان پوشش گیاهی در شمال، شمال شرق و بخش جنوب غربی و تا حدودی در غرب و شرق تهران متمرکز است. بررسی روند تغییرات در پوشش اراضی شهر تهران در فواصل زمانی ۱۰ ساله نشان می‌دهد که مناطق انسان‌ساخت رشد بسیار چشمگیری داشته‌است به عبارت دیگر در این بازه زمانی ۳۴ ساله، مناطق مربوط به زمین‌های باز و فضای سبز محلی بستری برای رشد مناطق شهری بوده است به طوری که در سال ۲۰۲۳ تنها بخش‌های محدودی از اراضی بایر در شرق و غرب تهران باقی مانده و میزان سبزی‌نگی، به ویژه در شمال و شرق شهر، کاهش چشمگیری داشته‌است.





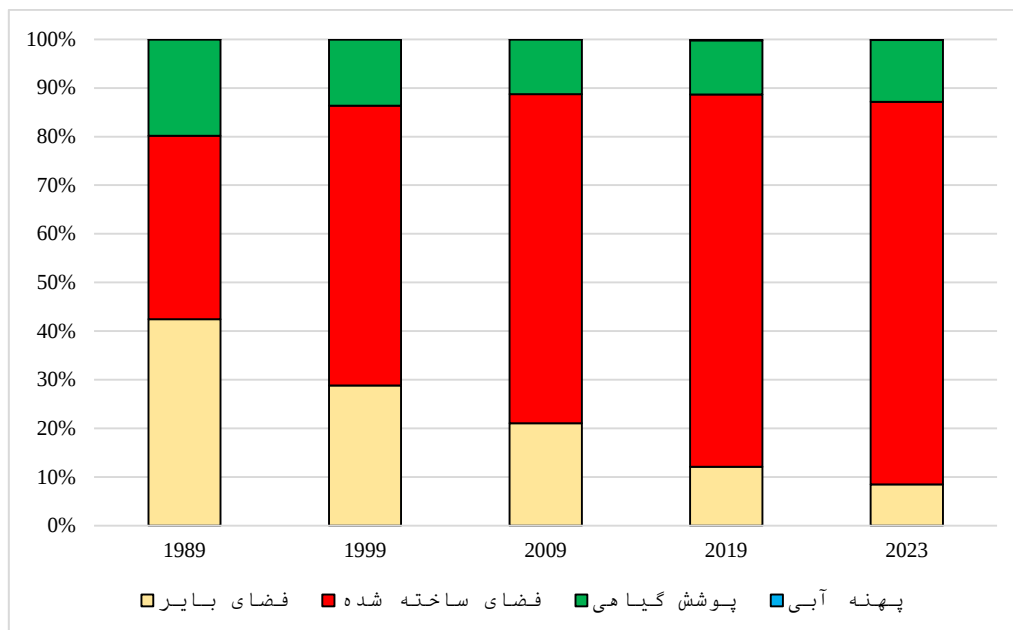
شکل ۲ نقشه‌های پوشش اراضی شهر تهران (۱۹۸۹-۲۰۲۳)

بدنه‌های آبی اصلی که در شهر تهران ردیابی شده، مربوط به دریاچه آزادی و چیتگر در غرب این شهر است که البته دریاچه چیتگر در دو تصویر آخر (سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۳)، با توجه به زمان احداث این دریاچه، قابل رؤیت است. به صورت کلی شهر تهران دارای بدنه آبی روباز قابل توجهی نبوده و تنها رشد ناچیزی را در فاصله زمانی ۳۴ ساله نشان می‌دهد که علت آن نیز احداث دریاچه روباز چیتگر در غرب تهران است.

جدول شماره ۲ مقدار مساحت (بر حسب کیلومتر مربع) برای چهار طبقه انسان‌ساخت، سبز، بایر و پهنه آبی در بازه زمانی ۱۹۸۹-۲۰۲۳ را نشان می‌دهد. که از نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی استخراج شده است با توجه به نتایج جدول ۲ و نمودار ۱ می‌توان دریافت که مناطق نفوذناپذیر انسان‌ساخت بیشترین رشد را در این فاصله زمانی دارند و شاخص زمین‌های باز روندی کاهشی داشته است. شاخص سبزی‌نگی نیز علیرغم کاهش چشمگیر تا سال ۲۰۱۹، رشد نسبی را تا سال ۲۰۲۳ داشته که علت آن می‌تواند گسترش فضای سبز شهری در محدوده غرب (چیتگر) و مرکزی تهران (منطقه ۵) است.

جدول ۲ مقدار مساحت طبقه‌های انسان‌ساخت، سبز، بایر و پهنه آبی در بازه زمانی ۱۹۸۹-۲۰۲۳ (کیلومتر مربع)

۲۰۲۳	۲۰۱۹	۲۰۰۹	۱۹۹۹	۱۹۸۹	طبقات پوشش اراضی / سال
۵۶۷/۱۹	۵۵۸/۶۹	۴۹۴/۱۵	۴۲۰/۰۴	۲۷۵/۲۳	طبقه انسان‌ساخت
۶۱/۶۴	۸۸/۵۶	۱۵۳/۵۵	۲۱۰/۳۹	۳۱۰/۱۷	طبقه بایر
۹۹/۸۶	۸۱/۳۲	۸۲/۰۴	۹۹/۳۷	۱۴۴/۴۵	طبقه سبز
۱/۳۳	۱/۴۶	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۱	پهنه آبی



نمودار ۱ مقدار فراوانی تجمعی طبقات سبز، بایر، انسان ساخت و پهنه آبی در بازه زمانی ۱۹۸۹-۲۰۲۳ (درصد)

این تغییرات بر فشار روزافزون بر محیط زیست شهری تهران دلالت دارند. کاهش اراضی باز و سبز منجر به تشدید مشکلات محیط زیستی همچون افزایش دمای شهری، کاهش کیفیت هوا و محدودیت در نفوذ آب به سفره های زیرزمینی شده است؛ مسائلی که در مطالعات مشابه مانند (Tayyebi et al. (2018), Nasehi and Imanpour namin (2020) و Dehghan Manshadi et al. (2024) نیز به عنوان پیامدهای اصلی گسترش شهرنشینی بی برنامه مطرح شده اند.

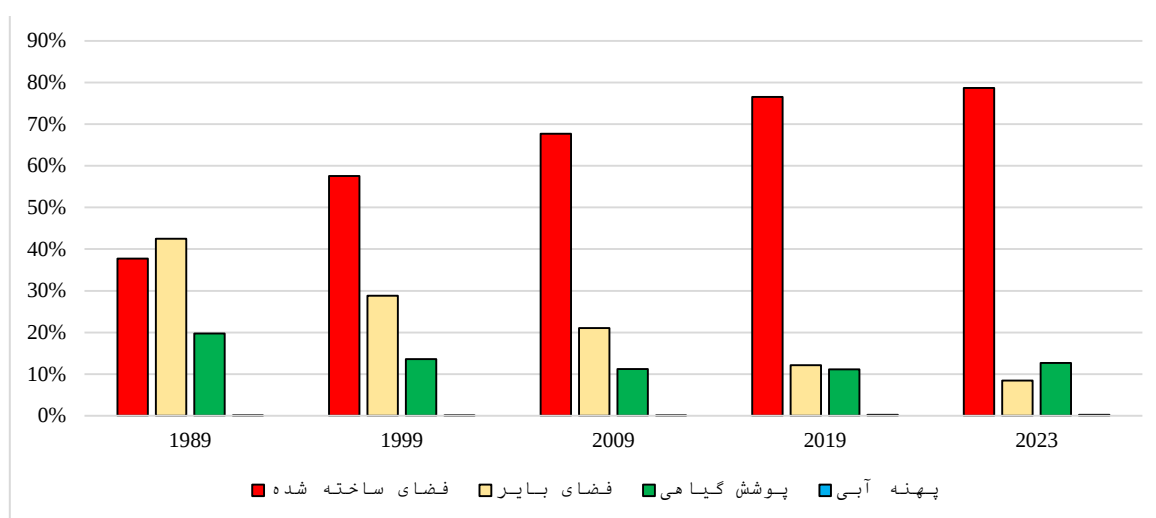
بحث

تغییرات کاربری و پوشش زمین، تأثیر قابل توجهی در خدمات اکوسیستم شهری دارند که در این مطالعه میزان تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۳ بررسی شده است. با توجه به جدول شماره ۲ و نمودار شماره ۱، کاربری انسان ساخت رشدی حدوداً دو برابری را نشان داده به طوری که از مقدار ۲۷۵/۲۳ کیلومتر مربع در سال ۱۹۸۸ به مقدار ۵۶۷/۱۹ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۳ افزایش یافته است. نتایج نشان می دهد در سال ۲۰۲۳ نزدیک به ۸۰ درصد از ظرفیت مساحت شهر تهران توسط عوامل انسان ساخت تکمیل شده است. ابعاد زمین های بایر از ۳۱۰/۱۷ کیلومتر مربع در سال ۱۹۸۹ به ۶۱/۶۴ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۳ کاهش یافته است. همانطور که در نمودار شماره ۲ مشاهده می شود شاخص سبزینگی نیز افتی ۴۵ درصدی داشته و از مقدار ۱۴۴/۴۵ کیلومتر مربع در سال ۱۹۸۹ به ۹۹/۸۶ در سال ۲۰۲۳ نزول کرده است.

بررسی داده ها، نشان می دهد، سهم کاهش یافته در زمین های بایر و سبزینگی در شهر تهران برای توسعه مناطق انسان ساخت به کار رفته است که باعث رشد چشمگیر این شاخص در طول ۳۴ سال اخیر شد به طوری که افزایش تأسیسات شهری منجر به افزایش سطوح نفوذناپذیر و از بین رفتن سطوح نفوذپذیر مانند پوشش گیاهی شده است. از جمله مطالعاتی که با نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی به بررسی پوشش اراضی پرداخته اند می توان به مطالعه Taloor et al. (۲۰۲۱) اشاره کرد که در حوزه آبخیز رودخانه Ravi در کشور هند انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد، تغییرات پوشش گیاهی در فاصله ۵۰۹/۰ تا ۱۰۶/۰- بود بطوری که نواحی شمالی به دلیل دارابودن نواحی کوهستانی مقدار کمتری پوشش گیاهی داشتند و مناطق جنوبی که شامل زمین های کشاورزی بودند سهم بیشتری از

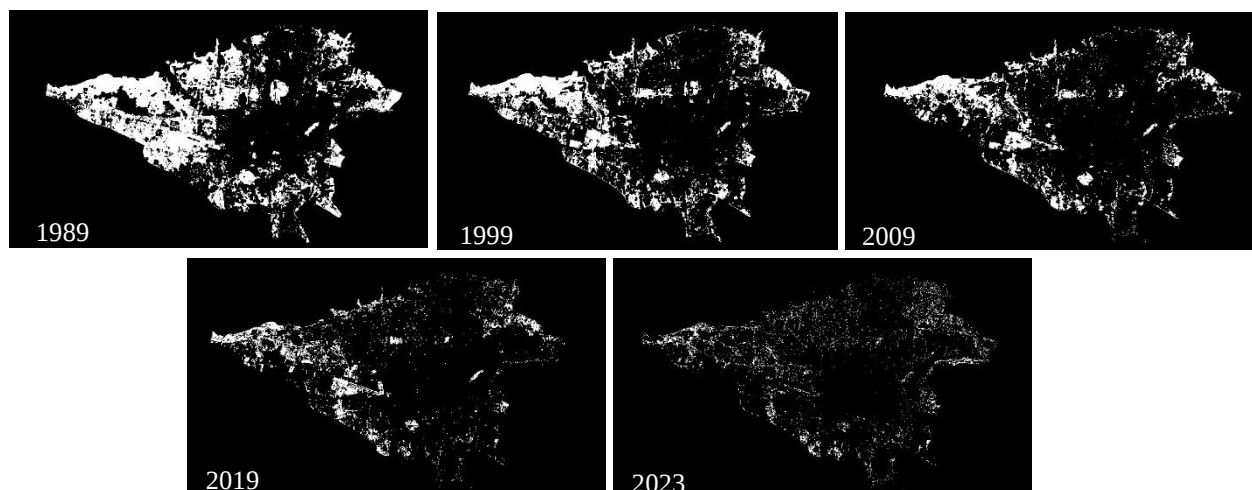
پوشش گیاهی را به خود اختصاص دادند. مطالعه Justino et al. (۲۰۲۵) در برزیل نشان داد در بازه زمانی ۱۹۸۵-۲۰۲۲، مقدار پوشش گیاهی در محدوده (۰/۸۳ تا ۰/۵۸-) است که موجب نگرانی محققان شده است همچنین در مطالعه‌ای که Duan et al. (۲۰۲۵) از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۳ در پاکستان انجام دادند، علیرغم یک افزایش نسبی در ایجاد ساخت و سازهای شهری تا سال ۲۰۱۱، شدت شاخص نرمال شده فضای انسان ساخت تا سال ۲۰۲۳ نسبت به سال های قبل شدت کمتری داشت. تغییر در میزان این شاخص طبق مطالعه Gyile et al. (۲۰۲۵) در کشور غنا نیز روند افزایشی داشته به طوری که از حدود ۴۲ کیلومتر مربع در سال ۱۹۹۱ به ۷۲ کیلومتر مربع تغییر یافته است. مطابق نظر محققان، افزایش در شاخص نرمال شده فضای انسان ساخت با کاهش پوشش گیاهی رابطه مستقیم داشته که در افزایش یافتن نرخ جزایر حرارتی، افزایش دمای سطحی زمین و تغییرات اقلیمی ارتباط مستقیم دارد (Aslani et al., 2025).

مطالعات زیادی در باره پردازش تصاویر با نرم افزار متلب انجام شده است از جمله مطالعاتی که پوشش اراضی را با استفاده از این نرم افزار بررسی کرده اند، مطالعه Hao et al. (۲۰۲۱) است. آن‌ها از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ در شهرستان نینگچی با استفاده از داده‌های مدل رقومی ارتفاع و نرم افزار متلب به ایجاد تصاویر سه بعدی از پوشش زمین پرداخته اند که این نوع تصاویر، اطلاعات تغییر پوشش زمین را به صورت واقعی نشان می‌دهند. از آنجا که هیچ ضلع سایه‌داری^۱ وجود ندارد، توزیع مناطق تغییر یافته و بدون تغییر به راحتی قابل مشاهده است؛ بنابراین، این نمودارها می‌توانند به طور مؤثر برای تجزیه و تحلیل تغییرات پویای پوشش زمین استفاده شوند. بیشتر مطالعاتی که با استفاده از متلب انجام گرفته، مربوط به قابلیت پیش بینی این نرم افزار در بررسی روند تغییرات پوشش اراضی در آینده است. برای مثال، در مطالعه‌ای که Rehman et al. (۲۰۲۲) انجام دادند، به شبیه سازی و پیش بینی تغییرات آینده دمای سطح زمین با رویکرد شبکه عصبی در کشور پاکستان تا سال ۲۰۴۷ پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد، شبکه عصبی پرسپترون چند لایه هنگامی که یک مجموعه ای از داده و فرآیندهای آن را دریافت می‌کند، احتمالاً خروجی تصادفی با دقت کمتری ارائه می‌دهد. همچنین Kafy et al. (۲۰۲۲) شاخص واریانس حرارتی شهری را در بنگلادش با روش شبکه عصبی در متلب برای سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۳۰ پیش بینی کرد. با تجزیه و تحلیل داده‌های ۲۵ ساله، این مطالعه مشخص کرد که پوشش سبز و منابع آبی، شهر نقش مهمی در کاهش اثرات شاخص واریانس حرارتی شهری دارند و بیش از ۴۰ درصد از مساحت شهر در تابستان به دلیل تراکم بالای مناطق انسان ساخت، دمای بیشتری را نسبت به دیگر مناطق دارند.

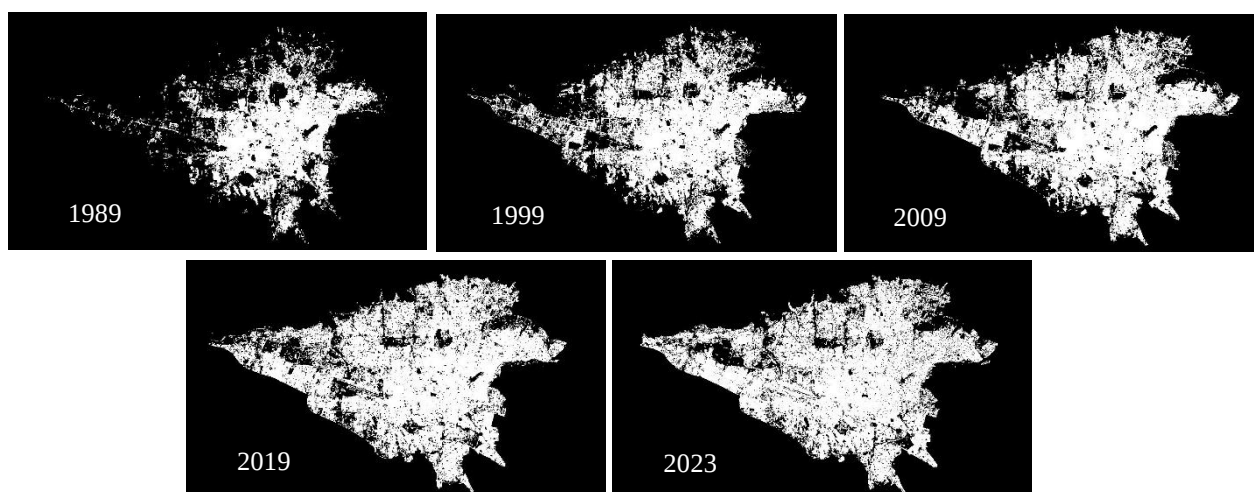


نمودار ۲ روند تغییرات طبقات سبز، بایر، انسان ساخت و پهنه آبی در بازه زمانی ۱۹۸۹-۲۰۲۳ (درصد)

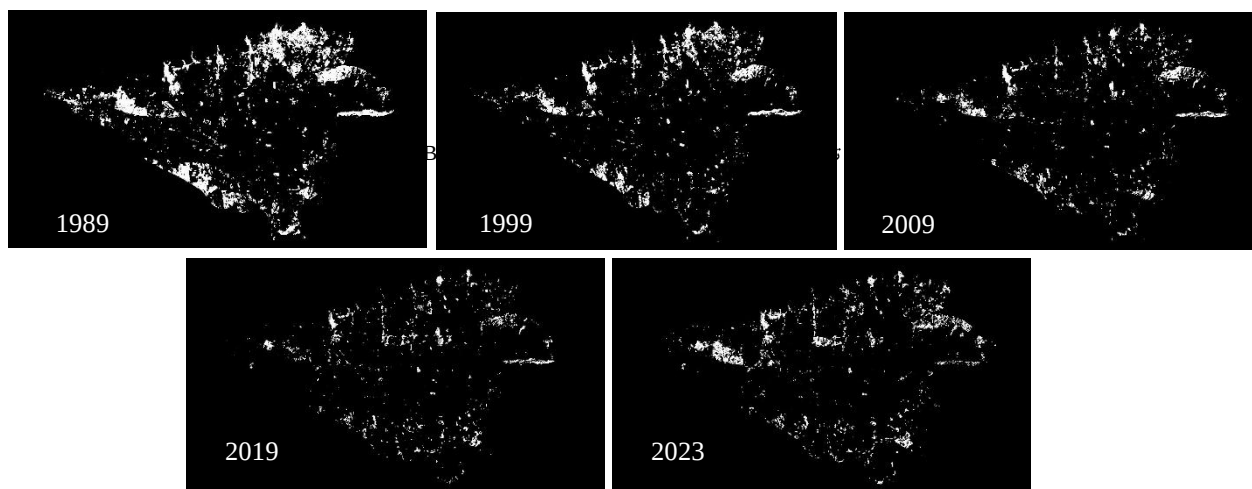
در ادامه، از قابلیت نرم افزار متلب برای تحلیل تصاویر سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شد و نتایج بدست آمده از این نرم افزار با اطلاعات نرم افزار متلب از ارزیابی نقشه پوشش اراضی در سال های ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۳، مقایسه شد. با بکارگیری نقشه های پوشش اراضی که از نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی بدست آمد، آنالیز تصاویر در نرم افزار متلب بر اساس دستورات تعریف شده در آن اجرا شد که خروجی آن در شکل شماره ۲ آمده است



شکل ۲ میزان تغییرات طبقه مناطق بایر در خروجی نرم افزار متلب (۱۹۸۹-۲۰۲۳)



شکل ۳ میزان تغییرات طبقه مناطق انسان ساخت در خروجی نرم افزار متلب (۱۹۸۹-۲۰۲۳)



شکل ۴ میزان تغییرات طبقه پوشش گیاهی در خروجی نرم افزار متلب (۱۹۸۹-۲۰۲۳)

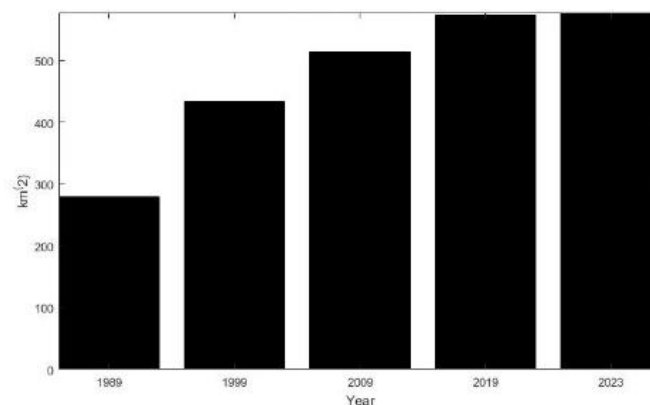
تصاویر ۲، ۳ و ۴ خروجی بدست آمده از نقشه پوشش اراضی شهر تهران در نرم افزار متلب را نمایش می دهند. در این نرم افزار بر حسب قابلیت تفکیک پیکسلی و همچنین تمایز پیکسل های بر حسب آستانه رنگی که برای هر کدام از طبقات تعریف شده است، تعداد پیکسل مربوط به هر شاخص مشخص شده و بر اساس الگوریتم و دستوراتی که در متلب تعریف می شوند مقدار هر کدام از طبقات بر حسب مساحت (کیلومتر مربع) قابل تخمین است. پیکسل های سفید در هر تصویر نمایانگر مقدار هر کدام از شاخص های نام برده، در آن سال است. در مورد طبقات بایر و سبز بیشترین مقدار پیکسل قابل ردیابی مربوط به سال ۱۹۸۹ بوده که در بازه زمانی ۳۴ ساله، این پیکسل های کاهش یافته به طوری که در سال ۲۰۲۳ به کمترین میزان تراکم خود در فضای داخلی شهر تهران رسیده اند. در سمت مقابل مقدار فضای انسان ساخت در این مدت زمان روندی صعودی را نشان می دهند.

تصاویر شکل ۲، بیشترین مقدار فضای بایر در سال ۱۹۸۹ و در نواحی غربی شهر تهران را نشان می دهند که با رنگ سفید متمایز شده اند و روند کاهش پیکسل های سفید که مبین فضای بایر است در طول این مدت ۳۴ ساله ادامه داشته و در سال ۲۰۲۳ به کمترین میزان خود رسیده است. مقایسه تصاویر شکل ۲ و ۳ نشان می دهد اکثر پیکسل های سفید معرف طبقه بایر در شکل ۲ توسط پیکسل های سفید طبقه انسان ساخت در شکل ۳ جایگزین شده اند. به عبارت دیگر بخش زیادی از مناطق دشتی شهر تهران در این مدت ۳۴ ساله بواسطه توسعه شهر نشینی کاهش داشته است. کاهش شاخص سبزیگنی در تصاویر شکل ۴ نیز کاملاً محسوس است و این کاستی در طبقه سبز در مناطق شمالی، شرقی و جنوب غربی شهر تهران قابل رؤیت است علیرغم اینکه توسعه نامحسوس فضای سبز شهری در بخش مرکزی شهر نیز مشهود است.

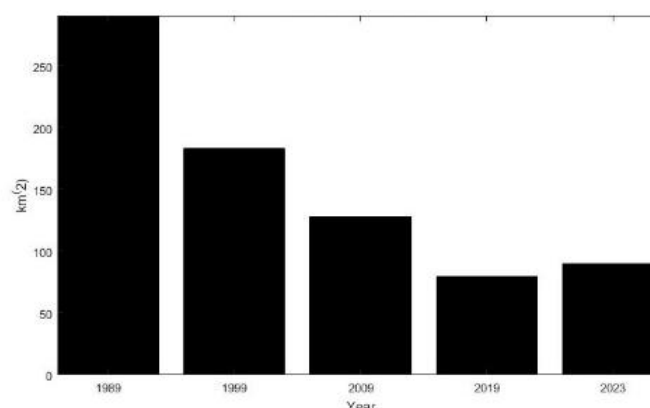
مقدار تغییرات عددی که به صورت کیفی در شکل شماره ۲ مشاهده می شود به صورت کمی نیز در نمودار شماره ۳ مشاهده می شود. روندی که در تغییر مساحت طبقات در نرم افزار متلب بدست آمده است مشابه نمودار شماره ۲ بوده که از نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی استخراج گردیده است اما مقادیر عددی بدست آمده در نرم افزار متلب تا حدودی متفاوت است. مقایسه مقادیر جدول شماره ۲ و ۳ نشان می دهد میزان تغییرات در مقدار مساحت طبقه سبز در دو نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی و متلب در بازه ۴۷-۲۰ کیلومتر مربع نوسان داشته که بیشترین نرخ تغییر در مقایسه با دو طبقه دیگر است. نوسان تغییرات در مورد طبقه بایر در حدود ۲۷-۷ کیلومتر مربع بوده که به ترتیب در سال های ۱۹۸۹ و ۲۰۰۹ بدست آمده است در حالی که حداکثر و حداقل تغییر در فضای انسان ساخت ۲۰ و ۴ کیلومتر مربع بوده که نسبت به دو طبقه قبلی نوسان کمتر و در نتیجه انطباق بالاتری را با نتایج سیستم اطلاعات جغرافیایی نشان می دهد.

جدول ۲ مقدار مساحت طبقات سبز، بایر، انسان ساخت و پهنه آبی با استفاده از نرم افزار متلب در بازه زمانی ۱۹۸۹-۲۰۲۳ (کیلومتر مربع)

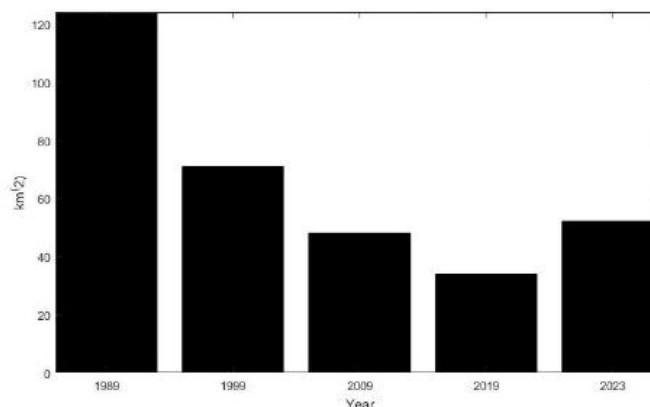
سال	۱۹۸۹	۱۹۹۹	۲۰۰۹	۲۰۱۹	۲۰۲۳	کمترین تغییر مساحت (سال) - بیشترین تغییر مساحت (سال) در مقایسه با سیستم اطلاعات جغرافیایی
فضای انسان ساخت	۲۷۹	۴۳۴	۵۱۴	۵۷۴	۵۷۸	۴ (۱۹۸۹) - ۲۰ (۲۰۰۹)
فضای سبز	۱۲۴	۷۱	۴۸	۳۴	۵۲	۲۰ (۱۹۸۹) - ۴۷ (۲۰۱۹)
فضای بایر	۲۹۱	۱۸۳	۱۲۸	۸۱	۴۷	۷ (۲۰۱۹) - ۲۷ (۱۹۹۹)



تغییرات مناطق انسان ساخت



تغییرات مناطق بایر



تغییرات پوشش گیاهی

نمودار ۳ نمودار تغییرات کمی سه طبقه بایر، پوشش گیاهی و انسان ساخت در خروجی نرم افزار متلب (۱۹۸۹-۲۰۲۳)

نتیجه گیری

تغییر کاربری و پوشش اراضی فرآیندی دینامیک و پیچیده است که از تلاقی سیستم های طبیعی و انسانی بدست می آید و اثر مستقیمی بر آب، خاک و هوا دارد. وقوع این پدیده می تواند پیامدهای اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی در مقیاس محلی، ناحیه ای و جهانی داشته باشد. در این مقاله به ارزیابی تغییر پوشش اراضی شهر تهران در بازه زمانی ۳۴ ساله (۲۰۲۳-۱۹۸۹) پرداخته شد. میزان تغییرات پوشش اراضی با دو نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی و متلب اندازه گیری شد. با

توجه به بررسی محقق، مقاله داخلی که تغییرات پوشش اراضی را با استفاده از قابلیت پردازش تصاویر نرم افزار متلب اندازه گیری کند، یافت نشد آنچه از خروجی های این دو نرم افزار بدست آمد، نشان داد اگرچه نتایج روند تغییرات در هر دو نرم افزار شباهت دارند؛ مقدار کمی طبقات اندازه گیری شده، تا حدودی نتایج متفاوتی را در دو نرم افزار داشته است. به عنوان نمونه، محاسبات مربوط به پوشش اراضی در نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی نشان داد طبقات پوشش گیاهی، بایر و فضای انسان ساخت به ترتیب با ضرایبی در حدود $۱/۴۴$ ، $۵/۳$ و $۲/۰۶$ تغییر داشته اند در حالی که میزان تغییرات برای همین شاخص هادر نرم افزار متلب $۲/۳$ ، $۶/۲$ و $۲/۰۷$ برآورد گردید. به نظر می رسد در راستای دستیابی به نتایج دقیق به لحاظ مقادیر کمی، نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی می تواند مفیدتر باشد و کارشناسان نیز می تواند برای مشخص کردن میزان تغییرات طبقات در پوشش اراضی، از نرم افزار متلب استفاده قرار کنند.

منابع

- Abebe, G., Getachew, D., & Ewunetu, A. (2022). Analysing land use/land cover changes and its dynamics using remote sensing and GIS in Gubalafito district, Northeastern Ethiopia. *SN APPLIED SCIENCES*, 4(1), 30 .
- Ahmed, H. A., Singh, S. K., Kumar, M., Maina, M. S., Dzwairo, R., & Lal, D. (2020). Impact of urbanization and land cover change on urban climate: Case study of Nigeria. *Urban Climate*, 32, 100600. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100600>
- Aslani, A., Sereshti, M., & Sharifi, A. (2۰۲۵). Urban Heat Island Mitigation in Tehran: District-based Mapping and Analysis of Key Drivers. *Sustainable Cities and Society*, 106338 .
- BHAGAWAT RIMAL, P. D. URBAN GROWTH AND LAND USE/LAND COVER CHANGE OF POKHARA SUB-METROPOLITAN CITY, NEPAL .
- Chen, Y & .Huang, L. (2025). Introduction. In Y. Chen & L. Huang (Eds.), *MATLAB Roadmap to Applications: Volume I Fundamental* (pp. 1-47). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8788-3_1
- Choudhury, B., Divyanth, L., & Chakraborty, S. (2023). Land use/land cover classification using hyperspectral soil reflectance features in the Eastern Himalayas, India. *Catena*, 229, 107200 .
- Das, M., Das, A., Pereira, P., & Mandal, A. (2021). Exploring the spatio-temporal dynamics of ecosystem health: A study on a rapidly urbanizing metropolitan area of Lower Gangetic Plain, India. *Ecological Indicators*, 125, 107584. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107584>
- Dehghan Manshadi, Z., Parivar, P., Sotoudeh, A., & Morovati Sharifabadi, A. (2۰۲۳). Exploring the spatio-temporal dynamics of life support system capacity of urban regions based on ecosystem health assessment (the case of Tehran, Iran). *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10668-023۶-۰۲۱۴۸->
- Dehghan Manshadi, Z., Parivar, P., Sotoudeh, A., & Morovati Sharifabadi, A. (2024). Modeling urban growth effects on carrying capacity in arid and semi-arid regions using system dynamics. *Ecological Modelling*, 487, 110565. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110565>
- Delaney, B., Tansey, K., & Whelan, M. (2025). Satellite Remote Sensing Techniques and Limitations for Identifying Bare Soil. *Remote Sensing*, 17(4), 630. <https://www.mdpi.com/2072-4292/17/4/630>
- Duan, X., Haseeb, M., Tahir, Z., Mahmood, S. A., Tariq, A., Jamil, A., Ullah, S., & Abdullah-Al-Wadud, M. (2025). A geospatial and statistical analysis of land surface temperature in response to land use land cover changes and urban heat island dynamics. *SCIENTIFIC REPORTS*, ۱۵(۱), ۴۹۴۳ .
- Gyile, D. N., Asare, A., Osei-Gyabaah, A. P., & Anafo, D. (2025). Assessment of Land Use and Land Cover Changes and Their Impact on Land Surface Temperature in Greater Accra, Ghana .
- Haack, B. N., & Rafter, A. (2006). Urban growth analysis and modeling in the Kathmandu Valley, Nepal. *Habitat International*, 30(4), 1056-1065 .
- Hao, S., Zhu, F., & Cui, Y. (2021). Land use and land cover change detection and spatial distribution on the Tibetan Plateau. *SCIENTIFIC REPORTS*, 11(1), 7531. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87215-w>
- Ishtiaque, A., Shrestha, M., & Chhetri, N. (2017). Rapid urban growth in the Kathmandu Valley, Nepal: Monitoring land use land cover dynamics of a himalayan city with landsat imageries. *Environments*, 4(4), 72 .
- Justino, S. T. P., Paganini, E. A. L., Silva, R. B., de Sousa Silva, R. P., Zabotto, A., & Roder, L. R. (2025). SPATIAL-TEMPORAL ANALYSIS OF VEGETATION COVER AND SOIL DEGRADATION FROM LANDSAT TIME-SERIES—A CASE STUDY IN THE CAATINGA, BRAZIL. *Journal of South American Earth Sciences*, 105528 .

- Kafy, A. A., Faisal, A.-A., Al Rakib, A., Roy, S., Ferdousi, J., Raikwar, V., Kona, M. A., & Fatin, S. M. A. A. (2021). Predicting changes in land use/land cover and seasonal land surface temperature using multi-temporal landsat images in the northwest region of Bangladesh. *Heliyon*, 7(7), e07623. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07623>
- Kafy, A. A., Saha, M., Faisal, A.-A., Rahaman, Z. A., Rahman, M. T., Liu, D., Fattah, M. A., Al Rakib, A., AlDousari, A .E., Rahaman, S. N., Hasan, M. Z., & Ahasan, M. A. K. (2022). Predicting the impacts of land use/land cover changes on seasonal urban thermal characteristics using machine learning algorithms. *Building and Environment*, 217, 109066. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109066>
- Khalili, M., Jafari, H., & Kishani Farahani, M. (2024). Estimation of Emission Rate, Social Cost, and Ecological Footprint of Greenhouse Pollutants Caused by Fossil Fuel Consumption in an Industrial Company. *Environmental Sciences*, 22(3), 517-536. <https://doi.org/10.48308/envs.2024.1376>
- Khanal, N., Uddin, K., Matin, M. A., & Tenneson, K. (2019). Automatic detection of spatiotemporal urban expansion patterns by fusing OSM and landsat data in Kathmandu. *Remote Sensing*, 11(19), 2296 .
- Lopes, H. S., Vidal, D. G., Cherif, N., Silva, L., & Remoaldo, P. C. (2025). Green infrastructure and its influence on urban heat island, heat risk, and air pollution: A case study of Porto (Portugal). *Journal of Environmental Management*, 376, 124446. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124446>
- Nasehi, S., & Imanpour namin, A. (2020). Assessment of urban green space fragmentation using landscape metrics (case study: district 2, Tehran city). *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 2405-2414 .
- Paudel, B., Zhang, Y.-l., Li, S.-c., Liu, L.-s., Wu, X., & Khanal, N. R. (2016). Review of studies on land use and land cover change in Nepal. *Journal of Mountain Science*, 13, 643-660 .
- Rehman, A., Qin, J., Pervez, A., Khan ,M. S., Ullah, S., Ahmad, K., & Rehman, N. U. (2022). Land-Use/Land Cover Changes Contribute to Land Surface Temperature: A Case Study of the Upper Indus Basin of Pakistan. *SUSTAINABILITY*, 14(2), 934. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/2/934>
- Richards, J. A & .Jia, X. (2006). Interpretation of hyperspectral image data. *Remote sensing digital image analysis: An introduction*, 359-388 .
- Stateczny, A., Bolugallu, S., Parameshachari, B., Ganesan, K., & Muthu, J. Multiplicative Long Short-Term Memory with Improved Mayfly Optimization for LULC Classification. *Remote Sens.* 2022, 14, 4837. In.
- Tahir, Z., Haseeb, M., Mahmood, S. A., Batool, S., Abdullah-Al-Wadud, M., Ullah, S., & Tariq, A. (2025). Predicting land use and land cover changes for sustainable land management using CA-Markov modelling and GIS techniques. *SCIENTIFIC REPORTS*, 15(1), 3271 .
- Taloor, A. K., Drinder Singh, M., & Chandra Kothiyari, G. (2021). Retrieval of land surface temperature, normalized difference moisture index, normalized difference water index of the Ravi basin using Landsat data. *Applied Computing and Geosciences*, 9, 100051. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.acags.2020.100051>
- Tayyebi, A., Shafizadeh-Moghadam, H., & Tayyebi, A. H. (2018). Analyzing long-term spatio-temporal patterns of land surface temperature in response to rapid urbanization in the mega-city of Tehran. *Land Use Policy*, 71, 459-469 .
- Thapa, R. B., & Murayama, Y. (2009). Examining spatiotemporal urbanization patterns in Kathmandu Valley, Nepal: Remote sensing and spatial metrics approaches. *Remote Sensing*, 1(3), 534-556 .
- Trauth, M. H. (2025). Introduction to MATLAB. In *MATLAB® Recipes for Earth Sciences* (pp. 9-75). Springer .
- Ullah, W., Ahmad, K., Tahir, A. A., Ullah, S., Rafiq, M. T., & Abdullah-Al-Wadud, M .(۲۰۲۵) .Impacts of tourism on LULC and LST dynamics in district Buner and Shangla, Pakistan. *SCIENTIFIC REPORTS*, 15(1), 9304 .
- USGS. (2024). *Earth explorer-home* <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Wang, S. W., Gebru, B. M., Lamchin, M., Kayastha, R. B., & Lee ,W.-K. (2020). Land Use and Land Cover Change Detection and Prediction in the Kathmandu District of Nepal Using Remote Sensing and GIS. *SUSTAINABILITY*, 12(9), 3925. <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/9/3925>
- Yu, P., Wei, Y., Ma, L., Wang, B., Yung, E. H .K., & Chen, Y. (2024). Urbanization and the urban critical zone. *Earth Critical Zone*, 1(1), 100011. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecz.2024.100011>
- Zhu, Z., Qiu, S., & Ye, S. (2022). Remote sensing of land change: A multifaceted perspective. *Remote Sensing of Environment*, 282, 113266. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113266>



ارزیابی اثرات آتش سوزی بر آلودگی منابع آب های سطحی و زیرزمینی؛ فراتحلیلی بر مطالعات موجود

بابک امیدوار^۱ , رامین سماواتی^۲، مهسا محمدرضاییک^۳

۱. استاد، گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم های محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. نویسنده مسئول: bomidvar@ut.ac.ir

۲. دانشجوی دکترا، محیط زیست منابع آب، پردیس بین المللی کیش دانشگاه تهران، کیش، ایران.

۳. دانشجوی دکترا، مهندسی در سوانح طبیعی، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ ها: دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۴ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷	افزایش فراوانی آتش سوزی در سطح جهان، پیامدهای جدی بر سلامت انسان و محیط زیست به ویژه کیفیت آب داشته است. ورود خاکستر، رسوبات و آلاینده های حاصل از سوختن پوشش گیاهی و مناطق شهری به پیکره آبی، تهدیدی جدی برای آب آشامیدنی و زیستگاه آبی محسوب می شود. هدف این تحقیق، بررسی انواع آلاینده های ناشی از آتش سوزی، نحوه ورود و خروج آلاینده به منابع آب سطحی و زیرزمینی و ارزیابی کمی اثرات آن ها، بر اساس فراتحلیل مطالعات موجود است. این پژوهش از نوع کاربردی و با روش توصیفی و فراتحلیل انجام شده است. نتایج نشان داد که پس از آتش سوزی، غلظت آلاینده های فیزیکی در منابع آبی افزایش یافته و مقادیر شیمیایی واکنش های متغیری را داشته اند، بگونه ای که غلظت آلاینده ها برای ادامه زندگی آبزیان یا کاربرد آب آشامیدنی از حدود قابل قبول فراتر رفته و مجموعه های بیولوژیکی در محیط آبی معمولاً دچار خطرات جدی شده اند. همچنین یافته ها نشان داد، زمان تداوم تأثیر اکثر آلاینده ها بر نقاط پایانی، کمتر از ۵ سال بوده اما در برخی موارد تا ۱۵ سال یا بیشتر هم ادامه یافته است. همچنین یک مدل مفهومی برای ارزیابی اثرات آتش سوزی، بر کیفیت آب و پاسخ نقاط پایانی، ارائه شد. این پژوهش منبعی راهبردی برای مدیران محیط زیست جهت درک تأثیر آتش سوزی بر حوضه های آبخیز است و همچنین چارچوبی راهبردی برای مطالعات آتی سایر محققان فراهم می کند.
واژگان کلیدی: آتش سوزی آلاینده های بیولوژیکی آلاینده های شیمیایی آلاینده های فیزیکی حوضه آبخیز	

استناد: امیدوار، بابک، سماواتی، رامین، محمدرضاییک، مهسا (۱۴۰۴). ارزیابی اثرات آتش سوزی بر آلودگی منابع آب های سطحی و زیرزمینی؛ فراتحلیلی بر مطالعات موجود. *رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط*، ۲(۲)، ۱۸۱-۱۵۹.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045898.1069>

© ۱۴۰۴ (۲۰۲۶) نویسندگان مقاله، نشریه رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط، ناشر: سازمان مطالعه و تدوین کتب دانشگاهی در علوم اسلامی و انسانی (سمت).



Assessment of wildfire consequences on the quality of surface and underground endpoints of the water resources – A meta analyses of the available studies

Babak Omidvar ¹✉ , Ramin Samavati ², Mahsa Mohammadreza beyk ³

1. Professor, Department of Disaster Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. Corresponding author: bomidvar@ut.ac.ir

2. Ph.D. Candidate, Water Resources Environment, Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran.

3. Ph.D. Candidate, Natural Disaster Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

Article Info

History

Received: September 05, 2025

Accepted: December 28, 2025

Keywords

Wild Fire

biological pollutants

chemical pollutants

physical pollutants

Watershed

Abstract

The increase in the frequency of fires worldwide has had serious consequences for human health and the environment, especially water quality. The entry of ash, sediments, and pollutants from burning vegetation and urban areas into water bodies is a serious threat to drinking water and aquatic habitats. The aim of this research is to investigate the types of pollutants resulting from fires, the way pollutants enter and exit surface and groundwater resources, and quantitatively assess their effects, based on a meta-analysis of existing studies. This research is of an applied type and was conducted using a descriptive and meta-analysis method. The results showed that after fires, the concentration of physical pollutants in water resources increased and the chemical values had variable reactions, such that the concentration of pollutants exceeded acceptable limits for the continuation of aquatic life or the use of drinking water, and biological communities in the aquatic environment usually faced serious risks. The findings also showed that the duration of the impact of most pollutants on the endpoints was less than 5 years, but in some cases it continued for 15 years or more. A conceptual model was also presented to assess the effects of fire on water quality and endpoint response. This study is a strategic resource for environmental managers to understand the impact of fire on watersheds and also provides a strategic framework for future studies by other researchers.

Citation: Omidvar, B., Samavati, R., & Mohammad reza beyk, M. (2025). Assessment of wildfire consequences on the quality of surface and underground endpoints of the water resources – A meta analyses of the available studies. *Innovative Approaches in Human–Environment Studies*, 2(2), 159-181.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045898.1069>

© 2025 Authors, Innovative Approaches in Human–Environment Studies.

Publisher: The Organization for Researching and Composing University Textbooks in the Islamic Science and Humanities (SAMT)

مقدمه

بحران آب که به کاهش قابل توجه کیفیت و کمیت آب تعریف می شود؛ بر اساس گزارش مجمع اقتصاد جهانی (WEF)^۱ در سال ۲۰۱۵، در راس فهرست خطرات جهانی قرار داشته و بیشترین تأثیر بالقوه را بر جوامع دارد (نونس^۲ و همکاران، ۲۰۱۸: ۴۶۳).

افزایش فرکانس آتش سوزی در دهه های اخیر، تأثیر زیادی بر سلامت انسان و کیفیت محیطی داشته است. آتش سوزی نه تنها به کیفیت هوا، زیرساخت ها، مناظر و منابع آبی آسیب می رساند بلکه چالش هایی برای تامین آب آشامیدنی، تفریح و زیستگاه های آبی به وجود می آورد (پائول^۳ و همکاران، ۲۰۲۲: ۳۰۶۹۹). همچنین آتش سوزی، پوشش گیاهی و لایه بستر خاک را به شدت در برابر بارندگی آسیب پذیر می کند. بنابراین در پی تغییرات ناشی از آتش سوزی ها در خاک سطحی از جمله دفع آب توسط خاک و کاهش پایداری سنگدانه ها، رواناب سطحی و انتقال رسوب به منابع آبی در منطقه افزایش می یابد (شکل ۱) (بری^۴ و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۶۴۵).

اگرچه اکوسیستم های گیاهی، آب پاک را تأمین می کنند، اما این مناطق همواره با آتش سوزی تهدید می شوند، در پی این روند محیط های آبی واقع در پایین دست منطقه سوخته، از آتش متأثر شده و امنیت تأمین آب در خطر خواهد بود (باسو^۵ و همکاران، ۲۰۲۲: ۲۵). بسیاری از ترکیبات موجود در آب های تحت تأثیر آتش سوزی، سرطانزا هستند. قرار گرفتن در معرض یا خوردن این ترکیبات می تواند برای سلامت انسان به ویژه برای نوزادان و سالخوردگان مضر باشد (استفنز^۶ و همکاران، ۲۰۲۱: ۸۱۰۰۴).

آتش سوزی تجویز شده در مناطق مستعد آتش سوزی، یک انتخاب کم هزینه برای مدیریت مناطق طبیعی است که بر بسیاری از ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک منطقه تأثیر می گذارد (آبراهام^۷ و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۰۲۲). با وجود اهمیت شناخت تأثیر آتش بر منابع آبی، پژوهش چندان در این زمینه انجام نشده و مدیران معمولاً به اطلاعات و ارزیابی های لازم از این مخاطره در زمان وقوع بحران دسترسی ندارند. بنابراین در این پژوهش بر اساس فراتحلیل مطالعات موجود مؤلفه های تأثیر گذار در آلودگی ناشی از آتش سوزی در یک حوضه آبخیز شناسایی و نحوه ورود این آلاینده ها به پیکره آبی بیان شده است. سپس انواع آلاینده ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند. بدین ترتیب بعد از بررسی و تحلیل مطالعات متعدد، راهکار مناسبی برای بررسی و ارزیابی اثرات آتش بر منابع آبی حوضه در یک منطقه مستعد آتش سوزی شناسایی و معرفی شده است.

پیش بینی می شود که این بررسی به مجریان مدیریت کیفیت آب، کمک کند تا اثرات احتمالی آتش سوزی را درک کرده و در طراحی استراتژی ها و سیاست های کاهش و بازیابی موثر باشد. برای محققان، این بررسی وضعیت دانش فعلی را برجسته و چارچوبی راهبردی برای تحقیقات آینده معرفی می کند.

پیشینه تحقیق

تحقیقات هیدرولوژیکی زیادی در مورد اثرات آتش سوزی بر روی خاک، شیب تپه و تا حدی فرآیندهای حوضه آبریز با تمرکز بر نفوذ، رواناب، فرسایش و بازده آب انجام شده است که در ادامه به برخی از آن ها اشاره می شود.

1. World Economic Forum
2. Nunes
3. Paul
4. Brey
5. Basso
6. Stephens
7. Abraham

ابراهام^۱ و همکارانش (۲۰۱۸) در مقاله‌ی "خطر تجمع فلزات پس از آتش‌سوزی در منابع آب سطحی"، با در نظر گرفتن نوسانات اقلیمی و افزایش وقوع آتش‌سوزی‌ها در مناطق طبیعی، به بررسی خطر تجمع فلزات پس از آتش‌سوزی در منابع آب سطحی پرداخته‌اند تا مورد تهیه برنامه‌ها و سیاست‌های مدیریتی مناسب در حین و پس از حوادث آتش‌سوزی به منظور حفظ کیفیت آب آشامیدنی شیوه‌ای کم هزینه فراهم شود (آبراهام و همکاران، ۱۰۲۲:۲۰۱۸).

بلادن و همکارانش (۲۰۱۴) در مقاله‌ی "آتش‌سوزی جنگلی و آینده تأمین آب" به بیان پیامدهای آتش‌سوزی جنگلی بر بسیاری از مصارف آب پایین دست به ویژه تأمین آب آشامیدنی سالم، که ممکن است به زیرساخت‌های اضافی جهت تصفیه و افزایش عملیات و هزینه‌های نگهداری نیاز داشته باشد، پرداخته‌اند. آن‌ها به شناخت مناسبی از اثرات آتش‌سوزی بر حوضه‌های آبخیز دست یافتند و برای حفاظت از منابع آب جهانی که از محیط‌های جنگلی سرچشمه می‌گیرند، به توسعه استراتژی‌های سازگاری و کاهش موثر، اقدام نموده‌اند (بلادن^۲ و همکاران، ۲۰۰۸: ۲۳۵۹).

بلادن و همکارانش، در تحقیقی دیگر، اشکال مختلف نیتروژن وارد شده به آبراه‌های حوضه آبخیز پس از آتش‌سوزی سال ۲۰۰۳ در کوه‌های راکی جنوب غربی آلبرتا را به مدت سه سال، مطالعه کرده‌اند. نتایج حاصل از مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که در این مدت غلظت نترات در حوضه سوخته شده شش و نیم برابر حد مرجع، غلظت نیتروژن آلی محلول (DON)^۳ چهار و یک دهم حد مرجع و نیتروژن کل (TN)^۴ پنج و سه دهم برابر حد مرجع برآورد شد، البته تغییرات غلظت آمونیوم در این حوضه کمتر بوده‌است. نکته قابل توجه در تحقیقات آن‌ها، وجود این آلاینده‌ها ناشی از ذوب برف حتی پس از گذشت سه سال از آتش‌سوزی بود (بلادن و همکاران، ۲۰۱۴).

کمپس و همکارانش (۲۰۱۶) مطالعه‌ای را با هدف ارزیابی نقش آتش‌سوزی در انتشار عناصر کمیاب و بررسی توزیع مجدد آن‌ها با گذشت زمان آتش‌سوزی انجام دادند. برای این منظور، این محققین عناصر وادیموم، منگنز، کوبالت، نیکل، مس، کادمیوم و سرب را در نمونه‌های خاک و خاکستر جمع‌آوری شده پس از آتش‌سوزی جنگلی در شمال مرکزی پرتغال در چهار بازه زمانی (اول بلافاصله پس از آتش‌سوزی سپس در بازه‌های زمانی چهار، هشت و پانزده ماه پس از سانحه) بررسی کردند. به طور کلی تحقیقات آن‌ها نقش آتش‌سوزی جنگلی را در افزایش سطوح عناصر اصلی و کمیاب در خاکستر و خاک سطحی مزارع، نشان داد و اهمیت تجمع آن‌ها در سال اول پس از آتش‌سوزی را برجسته کرد (کمپس^۵ و همکاران، ۲۰۱۶: ۱۳۶۳).

فرریرا^۶ و همکارانش در مقاله‌ی "فرآیندهای تخریب خاک و آب در مناطق سوخته"، بازتاب محدودیت‌های برخی از روش‌ها و تکنیک‌های ارزیابی را بررسی می‌کنند. که این روش‌ها برای ارزیابی فرسایش و پاسخ‌های هیدرولوژیکی پس از آتش‌سوزی تا سال ۲۰۰۸ استفاده می‌شده‌اند و اهمیت آن‌ها را در مقیاس‌های مختلف تحلیل می‌کند (فرریرا^۷ و همکاران، ۲۰۰۸: ۲۷۳).

کیان^۸ و همکارانش جریان زباله‌ای در مناطق سوخته شیب‌دار در جنوب کالیفرنیا در سال ۲۰۱۱ را بررسی کردند تا کنترل‌های هیدرولوژیکی بهتری را در زمان شروع بارندگی انجام دهند. برای نیل به این منظور آن‌ها بزرگی جریان زباله پس از آتش‌سوزی، فشار سیال منفذی بستر کانال و رطوبت خاک را همراه با شیب تپه در ۲۴ نقطه که در پنج

1. Abraham
2. Bladon
3. Dissolved Organic Nitrogen
4. Total Nitrogen
5. Campos
6. Ferreira
7. Ferreira
8. Kean

حوضه مختلف پس از آتش سوزی ۲۰۰۹ در جیسیتا^۱ (کوه‌های سن گابریل^۲ و سانتاینز^۳) سوزانده شده‌اند، را ثبت کردند. این اندازه‌گیری‌ها تفاوت قابل توجهی در دینامیک جریان زباله بین سایت‌ها و رویدادهای متوالی در همان مکان را نشان داد. علی‌رغم این تفاوت‌ها، زمان و بزرگی همه رویدادها به طور مداوم در مدت زمان کوتاه (کمتر از ۳۰ دقیقه) با اوج و شدت بارندگی ارتباط مستقیم داشت و شاخص حجم جریان زباله نیز بهترین همبستگی را با شدت بارندگی کوتاه مدت نشان داد (کیان^۴ و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۱۶).

لانگنز و همکارانش با درک این موضوع که نرخ فرسایش، پس از آتش سوزی تا سه مرتبه بزرگ‌تر از فرسایش پیش از آن خواهد بود و همچنین شدت سوختگی در منطقه، اغلب ناهمگن است، حجم جریان زباله ناشی از یک آتش سوزی جنگلی در مرکز ویکتوریا در استرالیا را در سال ۲۰۱۶ مدل کردند. این مدل تجربی، با بهره‌گرفتن از مدل گسترش آتش با استفاده از داده‌های تاریخی در مورد آب و هوا و احتمال اشتعال برای حوضه مورد مطالعه براساس تجربیات متخصصین درباره انتقال رسوب در منطقه و با فرضیات ساده و مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو، محاسبه شد. همچنین آن‌ها به کمک آنالیز شروع جریان واریزه با شاخص‌های رواناب سطحی و فرسایش‌پذیری سطح خاک، مدل‌سازی را انجام دادند (لانگنز^۵ و همکاران، ۲۰۱۶: ۴۰۷).

تحقیقات منسپیل‌ها و همکارانش (۲۰۱۴) نشان داد که آتش سوزی‌ها در مناطق طبیعی، موجب ایجاد آلودگی از نوع هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs)^۶ در آب‌های زیرزمینی می‌شوند. آن‌ها با ارزیابی اثرات انتشار این نوع آلودگی بر کیفیت آب، معیارهای تصمیم‌گیری علمی برای شیوه‌های مدیریت جنگل پس از آتش سوزی را فراهم کردند. آلاینده‌های آلی چون هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای که در طی آتش سوزی تولید می‌شوند، برای انسان سرطان‌زا است و بر بقا، رشد و تولید مثل بسیاری از گونه‌های آبرزی تأثیر منفی می‌گذارند (منسپیلها^۷ و همکاران، ۲۰۱۴: ۸۰۶).

مودی و همکارانش (۲۰۱۳) بانک اطلاعات موجود درباره اثرات ناشی از آتش سوزی‌ها با ۷۰ سال سابقه تاریخی در مناطق طبیعی در آمریکا را بررسی کردند که دست‌آوردهای زیر را دربرداشت (مودی^۸ و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۰):

۱. آن‌ها به سازماندهی و ترکیب شباهت‌ها و تفاوت‌ها در واکنش‌های پس از آتش سوزی در مناطق مختلف سوخته‌شده در جهان پرداخته‌اند و برای دستیابی به این منظور، الگوهای مشترک و کلیاتی را تعیین کردند که می‌توانند روابط علت و معلولی را توضیح دهند.

۲. روابط عملکردی بین معیارهای اثرات آتش سوزی و خواص هیدرولیکی خاک را شناسایی و کمیت آن را بیان کردند تا شرایط دینامیکی و گذرا پس از آتش سوزی را بهتر نشان دهند.

۳. بین مناظر سوخته و مقدار بارش که اغلب محرک اصلی رواناب پس از آتش سوزی است و واکنش‌های فرسایشی که بدنال آن رخ می‌دهند در مقیاس متوسط زمانی و با در نظر گرفتن متغیر مکانی، تعامل برقرار کردند.

نریس و همکارانش (۲۰۱۷) تحقیقی را منتشر کردند که برای اولین بار از مدل پروژه پیش‌بینی فرسایش آب، برای پیش‌بینی رویدادهای فرسایش و رواناب در خاک‌های آتشفشانی متأثر از آتش در اروپا استفاده کرده‌است. برای این مدل‌سازی دو منطقه تحت تأثیر آتش سوزی‌های جنگلی در سال ۲۰۱۵ در تنریف^۹ (اسپانیا) انتخاب شد که شدت

1. Jesusita
2. San Gabriel
3. Santa Ynez
4. Kean
5. Langhans
6. Polycyclic aromatic hydrocarbons
7. Mansilha
8. Moody
9. Tenerife

سوختگی در آن در سطح متوسط خاک برآورد شده بود و شرایط آب و هوایی (میانگین بارندگی سالانه به ترتیب ۷۵۰ و ۲۱۰ میلی متر) در نظر گرفته شد (نریس^۱ و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۸۸۴۵).

نونس و همکارانش (۲۰۱۶) با معرفی یک مدل ساده هیدرولوژیکی که دفع آب خاک را توصیف می کرد و از مقایسه داده های استخراج شده از یک مزرعه اکالیپتوس نسوخته با دو مزرعه اکالیپتوس سوزانده شده در شمال پرتغال بدست آمد، توانستند چرخه های فصلی آب گریزی خاک را نشان دهند. نتایج حاصل از تحقیقات آنها نشان داد که حتی یک رویکرد ساده برای شبیه سازی دفع آب خاک می تواند عملکرد مدل های هیدرولوژیکی را در جنگل های اکالیپتوس به ویژه پس از آتش سوزی به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد (نونس^۲ و همکاران، ۲۰۱۶: ۴۶۳).

در راستای گزارش های متعددی که درباره ارتباط بین سیل های ناگهانی^۳، سیلاب های گل^۴ و لغزش های زمین^۵ در مناظر سوخته جنوب شرقی استرالیا با جریان های زباله پس از سال ۲۰۰۰ منتشر شده، نیمن^۶ و همکارانش تحقیقاتی را ارائه کردند که مستندی سیستماتیک از رویدادهای فرسایشی بزرگ پس از آتش سوزی جنگلی در جنوب شرقی استرالیا را نشان می دهد. این تحقیق با تمرکز بر حوضه های آبریز کوچک (> ۵ کیلومتر مربع) در شرق ویکتوریا که بین سال های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۹ توسط آتش سوزی های جنگلی سوخته بودند، انجام پذیرفت و به اهدافی چون تعیین میزان فرسایش ناشی از جریان زباله، شناسایی آستانه های بارندگی و ویژگی های هیدرولوژیکی کلیدی در منطقه مورد مطالعه دست یافتند. نتایج این تحقیق نشان داد که منشأ سیزده مورد از شانزده رویداد فرسایشی بررسی شده، جریان های زباله های ناشی از رواناب بودند. بنابراین بر اساس یافته های آنها، جریان های زباله های تولید شده از رواناب در جنگل های اکالیپتوس خشک، فرآیند مهمی تلقی شده اند که در ارزیابی خطر هیدرولوژیکی پس از آتش سوزی در حوضه آبخیز استرالیای شرقی در نظر گرفته می شود (نیمن^۷ و همکاران، ۲۰۱۱: ۳۸۳).

آتش سوزی شدید جنگلی، در آگوست ۲۰۰۳، ۶۲ درصد از نهر فیشرپ^۸، حوضه آبخیز ۱۵۸ کیلومتر مربعی در مرکز بریتیش کلمبیا^۹ و کانادا را سوزاند. اوونسو همکارانش، جریان رسوب های معلق نهر فیشرپ در دوره زمانی ۲۰۰۴-۲۰۱۰ را تعیین کردند و مقایسه این اطلاعات با داده های نهر جیمیسون^{۱۰} انجام شد که در همان حوضه آبخیز قرار داشت اما تحت تأثیر آتش سوزی قرار نگرفته بود. بررسی ها نشان داد که اگرچه کل رواناب سالانه افزایش یافته بود اما اوج جریان در نهر فیشرپ پس از آتش سوزی به طور قابل توجهی بیشتر از قبل از آن نبود (اوونس^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۲۸).

آتش سوزی هیمن^{۱۲} که در سال ۲۰۰۲ رخ داد، بزرگترین آتش سوزی در تاریخ کلرادو^{۱۳} گزارش شده است. بنابراین میزان احتراق با شدت بالا بر تامین آب دنور^{۱۴} تأثیر شدید داشت که باعث شد توجه عمومی بر اثرات ناشی از آتش سوزی بر کیفیت آب متمرکز شود. محققینی چون رهادس و همکارانش شیمی رودخانه، دما و رسوب را قبل از

1. Neris
2. Nunes
3. Flash floods
4. Mud's Flood
5. Landslides
6. Nyman
7. Nyman
8. Fishtrap Creek
9. British Columbia
10. Jamieson
11. Owens
12. Hayman
13. Colorado
14. Denver

آتش سوزی و در فواصل ماهانه به مدت ۵ سال پس از آتش سوزی کنترل کردند. نتایج حاصل از تحقیقات آن‌ها حاکی از این واقعیت بود که وسعت حوضه سوخته، ارتباط نزدیکی با شدت انتشار نیترات در ذخایر آبی و کدورت جریان آب پس از آتش سوزی دارد. به گونه‌ای که مناطق سوخته شده با شدت بالا (منظور شدت سوختگی بیش از ۴۵ درصد مساحت خود)، دو برابر سایر مناطق نیترات و چهار برابر کدورت داشتند (رهادس^۱ و همکاران، ۲۰۱۱: ۴۰۳).

اسمیت و همکارانش (۲۰۱۱) در مقاله‌ی "اثرات آتش سوزی بر کیفیت آب در حوضه‌های جنگلی: مروری با پیامدهای تأمین آب" نشان دادند که اثر آتش سوزی بر کیفیت آب به میزان قابل توجهی متفاوت است. اغلب افزایش مقدار رسوب، مواد مغذی و شار عناصر کمیاب پس از آتش سوزی در حوضه‌های آبخیز گزارش شده‌است و آتش سوزی‌های جنگلی معمولاً تأمین آب آشامیدنی حوضه‌های جنگلی را مختل می‌کنند (اسمیت^۲ و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۷۰).

آتش سوزی‌ها به‌طور فزاینده‌ای، منبع انتشار آلودگی اکوسیستم‌های آبی، از طریق تولید مواد پیرولیتیک^۳ مضر و حمل و نقل بعدی آن‌ها (عمدتاً به کمک خاکستر)، شناخته می‌شوند. برای بررسی اثرات مخرب رواناب پر از خاکستر از مناطق سوخته بر کیفیت آب، سیلوا و همکارانش نمونه‌های خاکستر را بلافاصله پس از آتش سوزی جنگل جمع‌آوری کردند و سپس برای تهیه نمونه‌های آب خاکستری (AEA)^۴ هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای^۵ (PAHs) را تجزیه و تحلیل و عناصر شیمیایی چون کلسیم، گوگرد، منیزیم، پتاسیم و سدیم را تحلیل و بررسی کردند. نتایج مطالعات آن‌ها در تحقیقی در سال ۲۰۱۵ با عنوان "ارزیابی سمیت عصاره‌های آبی خاکستر ناشی از آتش سوزی جنگل" منتشر شد و گواه این مهم بود که در نمونه‌های برداشت شده تنها دو نوع آروماتیک چند حلقه‌ای (یعنی فناترن و نفتالین) با وزن مولکولی کم قابلیت اندازه‌گیری داشتند. به این موازات، در نمونه آب خاکستری بعنوان نمونه جمع‌آوری شده، بررسی‌های غربالگری اکوتوکسیکولوژیک^۶ با چهار گونه آبیزی استاندارد از گروه‌های عملکردی مختلف و سطوح تغذیه‌ای انجام شد. آنالیز نتایج حاصل از این غربال‌گری مشخص کرد که آلاینده‌ها در کاهش رشد دو گروه جلبک اصلی یعنی "ریز جلبک آب‌های شیرین"^۷ و "عدسک آبی"^۸ در اکوسیستم تأثیرگذار بوده و از شب‌تابی^۹ باکتری "ویبریوناسه"^{۱۰} جلوگیری کرده است. به طور کلی، نتایج حاضر بر نقش آتش سوزی‌های جنگلی به عنوان منبع بالقوه انتشار آلودگی به بدنه‌های آبی پایین دست تأکید می‌کند و معتقد است این روند، شرایط شیمیایی و اکولوژیکی را به خطر می‌اندازد (سیلوا^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۵: ۴۰۱).

سیلینس و همکارانش (۲۰۱۴) پیوندهای اکوهیدرولوژیکی بین تولید فسفر، جلبک‌ها، بی‌مهرگان کفزی و ماهی‌ها به مدت ۴ سال پس از آتش سوزی شدید جنگلی در کوه‌های راکی (آلبرتا، کانادا) را مطالعه کردند. بررسی‌های این گروه از محققین مشخص ساخت که میانگین غلظت تمام اشکال فسفر ۲ تا ۱۳ برابر در رواناب‌های ناشی از منطقه سوخته، بیشتر از جریان‌های نسوخته بوده و با بازیابی کند آشفستگی همراه بود. ورود این حجم فسفر با پاسخ‌های اکولوژیکی شدید در موجودات زنده رودخانه توأم شد و بهره‌وری سالانه جلبک‌ها در نه‌های درون حوضه آبخیز سوخته‌شده ۵ تا ۷۱ برابر بیشتر از حوضه‌های مرجع تا ۵ سال پس از آتش سوزی ادامه داشت. تولید جلبک در این حجم

1. Rhoades
2. Smith
3. pyrolytic
4. Aqueous Extracts of Ash (AEA)
5. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)
6. ecotoxicological
7. Pseudokirchneriella subcapitata
8. Lemna minor
9. luminescence
10. Vibrio fischeri
11. Silva

زیاد، تغییرات بزرگی در ساختار جامعه بی مهرگان کفزی ایجاد کرد، زیست توده تغییر کرد، تنوع گونه‌ها تحت تاثیر قرار گرفت و حتی در ترکیب گونه‌های محلی تغییراتی مشاهده شد (سیلینس^۱ و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۵۰۸).

بنابراین آتش‌سوزی‌های جنگلی، اغلب کیفیت آب را با انتقال خاکستر و خاک فرسوده به رودخانه‌ها و مخازن، تهدید می‌کند. توانایی پیش‌بینی خطرات منابع آب ناشی از آتش‌سوزی‌های جنگلی برای اجرای طرح‌های آمادگی آتش‌سوزی مؤثر بوده و نقش اساسی برای اقدامات کاهش پس از آتش‌سوزی دارد.

سانتین و همکارانش در مقاله‌ای که در سال ۲۰۱۵ منتشر کردند. برای تعیین کمیت و ویژگی‌های خاکستر تولید شده تحت شدت‌های مختلف آتش‌سوزی و پتانسیل آلودگی آب مربوطه، این رویکرد را برای آتش‌سوزی جنگلی اکالیتوس خشک استرالیا اعمال کردند. آتش‌سوزی بالمورال^۲ در اکتبر ۲۰۱۳، ۱۲۶۹۴ هکتار از حوضه آبخیز جنگلی سیدنی را تحت تاثیر قرار داد. بارهای خاکستر قابل توجهی تولید کرد که با شدت آتش افزایش یافت. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که با وجود غلظت نسبتاً پایین آلاینده‌های بالقوه، بار کل خاکستر قابل توجهی بوجود آمده که اگر این حجم از آلاینده بر اثر فرسایش روانابی به شبکه هیدرولوژیکی منتقل شوند، خطر آلودگی آب حتمی خواهد بود (سانتین^۳ و همکاران، ۲۰۱۵: ۱).

تأثیر آتش‌سوزی‌ها بر منابع آبی تاکنون در مقیاس محلی مطالعه شده‌است، اما ربین و همکارانش، میزان بالقوه این اثرات در مقیاس جهانی را بررسی کردند. آن‌ها با ارائه یک شاخص فضایی صریح از در معرض قرار گرفتن، اولین گام را به سمت ارزیابی جهانی خطرات بالقوه آتش‌سوزی بر آب‌ها (WWR^۴) برداشته‌اند. در مطالعات آن‌ها چندین متغیر مربوط به آتش‌سوزی و در دسترس بودن آب به عنوان شاخص‌های مواجهه، معرفی و نرمال شده‌اند. سپس تجمیع آن شاخص‌ها بر اساس وزن فردی بدست آمدند. شاخص نهایی، بیشترین حد در معرض خطر قرار گرفتن را در جنگل‌های مرطوب و خشک استوایی و حد متوسط را برای رشته کوه‌ها و بوته‌زارهای خشک، نشان داده و کمترین مقدار را در عرض‌های جغرافیایی بالایی نشان می‌دهد. این محققین معتقداند که چنین رویکردی می‌تواند بینش‌های مهمی را برای امنیت آب با هدایت حفظ منابع آب شیرین جهانی ارائه دهد (ربین^۵ و همکاران، ۲۰۱۶: ۲۲).

تحقیقات تورتون در ۲۰۱۷ مشخص می‌کند که کیفیت آب به سبب ورود آلاینده‌ها به پیکره آبی و تغییرات شدید DOC ناشی از آتش‌سوزی شدید سال ۲۰۱۶ در اطراف فورت مک‌موری^۶، آلبرتا، کانادا، را بشدت تحت تاثیر قرار داده تا آنجایی که دفتر بیمه کانادا، آن را گران‌ترین فاجعه در تاریخ کانادا معرفی کرده‌است. در پی این آتش‌سوزی مناطق وسیعی از جنگل‌های شمالی بالادست سوخته و نگرانی‌های زیادی از جمله تهدید تأمین آب آشامیدنی را برانگیخت و منجر به افزایش بیش از ۱ میلیون دلاری هزینه‌های مرتبط در سال اول پس از آتش‌سوزی شد (تورتون^۸، ۲۰۱۷).

پژوهش دیگر آبراهام (۲۰۱۸) آشکار کرد که سایت‌های معدنی رها شده و قدیمی که معمولاً منبع جیوه در خود جای داده‌اند، یک خطر بالقوه در بلندمدت برای منطقه هستند. مشاهدات ابراهام مشخص کرد که پس از آتش‌سوزی تجویز شده در منطقه، غلظت جیوه در خاک سطحی ۹۷٪ کاهش یافت که نشان دهنده سطح تبخیر جیوه در هنگام آتش‌سوزی است. پس از اولین بارندگی شدید فصلی، در منابع آبی منطقه غلظت جیوه ۳۵٪ افزایش یافت، که نشان می‌دهد خاکستر و ضایعات معدن حاصل از آتش‌سوزی، به کمک رواناب ناشی از ریزش جوی در سطح زمین جاری شده و به بدنه آبی در

1. Silins
2. Balmoral
3. Santin
4. Wildfire Water Risk (WWR)
5. Robinne
6. Dissolved Organic Carbon
7. Fort McMurray
8. Thurton

پایین دست وارد شده اند. بنابراین قبل از انجام اقدامات مدیریتی چون اعمال تغییرات در کاربری زمین، کنترل علف های هرز با آتش سوزی های تجویزی به بررسی دقیق محلی نیاز است (آبراهام و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۴۴).

شهر لس آنجلس در حوضه آبخیز رودخانه لس آنجلس به مقدار ۸۳۴ مایل مربع قرارداد. از ۸ ژانویه ۲۰۲۵ حداقل سه آتش سوزی در سراسر این شهر رخ داد. دود و سوختگی شدید شهر، نشانی از انواع آلودگی های ایجاد شده است. نیاز آبی برای اطفای حریق باعث شد که سه مخزن آب موجود در منطقه که هر کدام یک میلیون گالن گنجایش داشتند در کمتر از بیست و چهار ساعت به پایان برسد (وبستر^۱، ۲۰۲۵، IF12871). بنابراین تانکرهای هوایی در حال تخلیه هزاران گالن بازدارنده شعله قرمز به نام (Phos-Chek)^۲ در تپه های اطراف لس آنجلس هستند تا ویرانی ناشی از آتش سوزی های متعدد جنگلی را محدود کنند. در حالی که سازندگان این بازدارنده ادعا دارند که مواد سرطانزا در آن وجود ندارد اما در لیست مواد غیر قابل قبول سازمان جنگل های آمریکا، قرار داشته و می توانند حاوی فلزات سنگین سمی مانند کادمیوم و کروم باشد، که وارد آب های سطحی یا زیرزمینی خواهد شد (چپل^۳، ۲۰۲۵). نتایج تحلیل تحقیقات بررسی شده در این پژوهش به طور خلاصه در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱. مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه آتش سوزی و آلودگی منابع

محقق مسئول	سال	خلاصه نتایج
بلادن	۲۰۰۳	اشکال مختلف نیتروژن وارد شده به آبراه های حوضه آبخیز پس از آتش سوزی سال ۲۰۰۳ در کوه های راکی جنوب غربی آلبرتا را به مدت سه سال مطالعه کرده اند.
فریرا	۲۰۰۸	در خصوص ارزیابی فرسایش و پاسخ های هیدرولوژیکی پس از آتش سوزی تحقیق کرده است.
استین	۲۰۰۹	پتانسیل خطر بالقوه در نقاط پایانی را تحلیل کرده است.
کیان	۲۰۱۱	به بررسی جریان زباله ای در مناطق سوخته شیب دار در جنوب کالیفرنیا در سال ۲۰۱۱ می پردازند.
نیمن	۲۰۱۱	مستندی سیستماتیک از رویدادهای فرسایشی بزرگ پس از آتش سوزی جنگلی در جنوب شرقی استرالیا بین سال های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ را تهیه کردند.
رهاس	۲۰۱۱	نتایج حاصل از تحقیقات آنها نشان داد که وسعت حوضه سوخته ارتباط نزدیکی با شدت انتشار نیترات در ذخایر آبی و کدورت جریان آب پس از آتش سوزی دارد.
اسمیت	۲۰۱۱	تحقیقات آنها نشان داد که اثر آتش سوزی بر کیفیت آب متفاوت است. اغلب افزایش مقدار رسوب، مواد مغذی و شار عناصر کمیاب پس از آتش سوزی در حوضه های آبخیز گزارش شده است و آتش سوزی های جنگلی معمولاً تأمین آب آشامیدنی حوضه های جنگلی را مختل می کنند.
اوونس	۲۰۱۳	یافته های این محققین حاکی از افزایش رواناب در کل حوضه مورد مطالعه است.
مودی	۲۰۱۳	بانک اطلاعات در خصوص اثرات ناشی از آتش سوزی ها با سابقه تاریخی ۷۰ ساله در مناطق طبیعی در آمریکا را تهیه کردند.
سیلینس	۲۰۱۴	پیوندهای اکوهیدرولوژیکی بین تولید فسفر، جلبک ها، بی مهرگان کفزی و ماهی ها به مدت ۴ سال پس از آتش سوزی شدید جنگلی در کوه های راکی (آلبرتا، کانادا) مورد مطالعه قرار داده اند.
منسیل ها	۲۰۱۴	آلودگی از نوع هیدروکربن های آروماتیک چند حلقه ای (PAHs) در آب های زیرزمینی را پس از آتش سوزی بررسی کردند.
بلادن	۲۰۱۴	پیامدهای آتش سوزی جنگلی بر بسیاری از مصارف آب پایین دست به ویژه تأمین آب آشامیدنی سالم را بیان کردند که ممکن است به زیر ساخت های اضافی برای تصفیه و افزایش عملیات و هزینه های نگهداری نیاز داشته باشد.
سیلوا	۲۰۱۵	به بررسی اثرات مخرب رواناب پر از خاکستر از مناطق سوخته بر کیفیت آب پرداخته اند.
ساتینو	۲۰۱۵	کمیت و ویژگی های خاکستر تولید شده تحت تاثیر میزان مختلف آتش سوزی و پتانسیل آلودگی آب را تعیین کردند.

1. Webster

۲. PHOS-CHEK یک بازدارنده آتش پایدار و مستقر بر سطح زمین است که قبل از نزدیک شدن آتش بر روی پوشش گیاهی قابل اشتعال و مواد سلولزی پاشیده می شود و تا زمانی باراندگی در منطقه باقی می ماند.

3. Chappell

ادامه جدول ۱. مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه آتش سوزی و آلودگی منابع

محقق مسئول	سال	خلاصه نتایج
لانگنز	۲۰۱۶	حجم جریان زباله ناشی از یک آتش سوزی جنگلی در مرکز ویکتوریا در استرالیا را در سال ۲۰۱۶ مدل کردند.
کمپس	۲۰۱۶	نقش آتش سوزی در انتشار عناصر کمیاب و بررسی توزیع مجدد آن‌ها با گذشت زمان از آتش سوزی را ارزیابی کرد
ربین	۲۰۱۶	تأثیر آتش سوزی‌ها بر منابع آبی در مقیاس جهانی بررسی کردند
نونس	۲۰۱۶	یک مدل ساده هیدرولوژیکی که دفع آب خاک را توصیف می‌کرد و از مقایسه داده‌های استخراج شده از یک مزرعه اکالیپتوس نسوخته با دو مزرعه اکالیپتوس سوزانده شده در شمال پرتغال بدست آمد، توانستند چرخه‌های فصلی آب‌گیری خاک را نشان دادند.
تورتون	۲۰۱۷	پژوهش آنها بیان می‌دارد که کیفیت آب به سبب ورود آلاینده‌ها به پیکره آبی و تغییرات شدید DOC ناشی از آتش-سوزی شدید سال ۲۰۱۶ در اطراف فورتمک‌موری، آلبرتا، کانادا، بشدت تحت تأثیر قرار گرفته‌است.
نریس	۲۰۱۷	برای اولین بار از مدل پروژه پیش‌بینی فرسایش آب برای پیش‌بینی رویدادهای فرسایش و رواناب در خاک‌های آتشفشانی متأثر از آتش در اروپا استفاده کرد.
آبراهام	۲۰۱۸	به بررسی خطر تجمع فلزات پس از آتش سوزی در منابع آب سطحی پرداخته‌اند تا درباره تهیه برنامه‌ها و سیاست‌های مدیریتی مناسب در حین و پس از حوادث آتش سوزی به منظور حفظ کیفیت آب آشامیدنی شیوه‌ای کم هزینه فراهم شود.
آبراهام	۲۰۱۸	تحقیقات او مشخص کرد که سایت‌های معدنی رها شده و قدیمی که معمولاً منبع جیوه در خود جای داده‌اند، یک خطر بالقوه در بلندمدت برای منطقه بشمار می‌آیند.
بری	۲۰۲۱	بلاهای آبخاری ناشی از آتش سوزی و تأثیر آنها بر منابع آبی را بررسی کردند که به دلیل تخریب خانه‌ها و زیرساخت‌ها و از بین رفتن جاده‌ها ایجاد شده‌است.
پیریکارد	۲۰۲۱	در باره هزینه های تصفیه آلودگی آب ناشی از آتش سوزی تحقیق کرده است.
پنینو	۲۰۲۲	آنها دریافتند که سیستم‌های آب آشامیدنی عمومی در پایین دست آتش سوزی‌های بزرگ، غلظت بالایی از ترکیباتی مانند نیترات و آرسنیک را تجربه کرده‌اند.
پائول	۲۰۲۲	تأثیر آتش سوزی مناطق شهری بر روان‌آب‌ها را تعیین کردند.
ربین	۲۰۲۴	مدل کاهش خطر ورود آلاینده‌ها به حوضه آبخیز را قبل از وقوع آتش سوزی تبیین کرده است.
وبستر	۲۰۲۵	اطلاعات آتش سوزی لس‌آنجلس تا ۱۱ ژانویه ۲۰۲۵ را برای سرویس تحقیقات کنگره آمریکا تنظیم کرده است.

روش تحقیق

پژوهش کاربردی حاضر، از نوع کیفی مبتنی بر شیوه فراتحلیل^۱ برای ترکیب نتایج مطالعات پیشین است، از این‌رو برای جمع‌آوری داده‌ها از روش اسناد کاوی استفاده شده‌است. جمع‌آوری اطلاعات و بررسی داده‌ها با شیوه کتابخانه‌ای صورت پذیرفت و برای تجزیه و تحلیل داده‌های گردآوری شده از کتاب، پایان‌نامه، مقالات علمی معتبر و اسناد علمی مرتبط با آلودگی منابع آب ناشی از آتش سوزی در یک حوضه آبخیز استفاده شده‌است. بدین ترتیب داده‌های جمع‌آوری شده برای این پژوهش در یک فرآیند مبتنی بر توصیف، تحلیل، استنتاج و ترکیب داده‌ها، تبیین و تجزیه و تحلیل شده‌است.

هدف اصلی این مطالعه بررسی نحوه ورود و تأثیر آلاینده‌های آتش سوزی به منابع آبی است. همچنین در پی آن است که چارچوب شیوه ردیابی آلاینده‌ها پس از آتش سوزی در حوضه‌های آبخیز را شناسایی کند. این پژوهش با مرور و تحلیل یافته‌های مطالعات متعدد یک مدل مفهومی، برای ارزیابی تأثیر آلاینده‌های ناشی از آتش سوزی در حوضه آبخیز معرفی می‌کند، سپس چارچوبی برای پیش‌بینی خطرات آلودگی آب پس از آتش سوزی را ارائه می‌دهد و در نهایت تأثیر کلی آتش در حوضه آبخیز و روند ورود آلاینده‌ها به آن را تبیین می‌نماید.

تحقیق حاضر در راستای دست‌یابی به اهداف مذکور، بدنبال یافتن پاسخ پرسش‌های زیر است:

۱. روش فراتحلیل یا متا آنالیز (Meta-Analysis)، یک روش کمی و عینی برای ترکیب نتایج مطالعات پیشین در یک موضوع خاص است.

۱. آتش سوزی چه تأثیری بر حوضه آبخیز دارد؟
۲. آتش سوزی چگونه منابع آبی یک حوضه آبخیز را آلوده می‌کند؟
۳. آتش سوزی چه نوع آلاینده‌هایی را به پیکره آبی یک حوضه وارد می‌کند؟

بحث و یافته‌های تحقیق

تأثیر آتش سوزی طبیعی بر حوضه آبخیز

بررسی مطالعات متعدد درباره پاسخ به این پرسش که «آتش سوزی چه تأثیری بر حوضه آبخیز دارد؟» نشان می‌دهد که میزان تأثیرات آتش سوزی بر اکوسیستم‌های آبی به شدت سوختگی، رژیم بارندگی پس از آتش سوزی، پوشش زمین قبل از آتش سوزی و تاریخچه اختلالات منطقه آسیب دیده، بستگی دارد، زیرا این امر بر بهبود پس از آتش سوزی تأثیر می‌گذارد. به همین سبب شدت سوختگی، عامل پیش‌بینی‌کننده اثرات آتش سوزی شناخته شده و در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و فرسایش خاک پس از آتش سوزی مورد توجه قرار می‌گیرد. همچنین بازیابی پوشش گیاهی و خواص متفاوت خاک شرایط متفاوتی را به هنگام شبیه‌سازی آتش سوزی ایجاد می‌کند (باسو و همکاران، ۲۰۲۲: ۲۵).

همچنین براساس یافته‌های ناشی از تحلیل پژوهش‌های مختلف، در حالت کلی، کاهش نفوذپذیری خاک و از بین رفتن پوشش گیاهی پس از آتش سوزی، از مهم‌ترین عوامل افزایش مقدار رواناب در حوضه است. بدین ترتیب بارندگی‌های پس از آتش سوزی سبب ورود حجم عظیمی از خاکستر و آلاینده‌های بیوفیزیکی و بیوشیمیایی به منابع آبی در سطح و پایین دست حوضه آبخیز می‌شوند.

تأثیر آتش سوزی شهری - طبیعی بر منابع آب

شهرهایی که در مناطق طبیعی گسترش و رشد کرده‌اند به (WUI^۱) معروف هستند. آتش سوزی در این مناطق خسارات گسترده‌تری دارد مانند لس‌آنجلس (لی^۲ و همکاران، ۲۰۲۳: ۵۷۸۹). آتشی که ۱۵۰ کیلومتر مربع از مناطق طبیعی در لس‌آنجلس را در بر گرفته، بیش از ۱۵۰ میلیارد دلار خسارت وارد کرده‌است.

بر اساس یافته‌های این تحقیق می‌توان انتظار داشت، آلاینده‌های متنوعی که از سوختن شهری نظیر لس‌آنجلس در هوا و سطح زمین ایجاد شده (چگنت^۳، ۲۰۲۵). علاوه بر انتشار ماده Phos-Chek که برای اطفای حریق استفاده می‌شود، احتمالاً شرایط خطرناکی را در حوضه آبخیز لس‌آنجلس ایجاد کند (شکل ۱۰).



ج) دود و آلودگی هوا ناشی از آتش در لس‌آنجلس



ب) تانکر هوایی در حال تخلیه Phos-Chek در سطح حوضه



الف) رواناب ناشی از اطفای حریق

شکل ۱۰ آتش سوزی لس‌آنجلس در ژانویه ۲۰۲۵

الف) نمایی از رواناب ناشی از اطفای حریق را در مناطق سوخته شده شهر، نشان می‌دهد.

ب) یک تانکر هوایی را در حال تخلیه مواد بازدارنده آتش در سطح حوضه آبخیز لس‌آنجلس نشان می‌دهد.

ج) آلودگی هوا ناشی از سوختن شهر لس‌آنجلس را نشان می‌دهد (منبع: www.latimes.com, www.nbcnews.com, www.npr.org).

در ادامه به مهمترین اثرات ناشی از آتش سوزی لس آنجلس بر حوضه آن اشاره شده است:

۱. اثرات فوری کیفیت آب

آلودگی رواناب: این آتش سوزی می تواند منجر به انتشار آلاینده های مختلف از جمله فلزات سنگین، هیدروکربن ها و ذرات معلق از ساختارهای سوخته و پوشش گیاهی شود. هنگام بارش باران، این آلاینده ها به سیستم های زهکشی و آب های مجاور نفوذ می کنند.

افزایش بارگیری مواد مغذی: سوزاندن پوشش گیاهی سبب شستشوی مواد مغذی، به ویژه نیتروژن و فسفر خواهد شد همچنین منجر به شکوفایی جلبک ها در آب، کاهش سطح اکسیژن و آسیب رساندن به آبزیان می شود.

۲. تغییر در زیرساخت تامین آب

آسیب به سیستم های آب: آتش سوزی مذکور می تواند به زیرساخت های تامین آب: لوله ها، تصفیه خانه ها و مخازن آسیب رسانده و منجر به اختلال در تامین آب شود.

آلودگی منبع آب: اگر آتش سوزی در نزدیکی منابع آب (مانند رودخانه ها، دریاچه ها) رخ دهد، رواناب، خاکستر و جریان زباله ای ناشی از این آتش رودخانه لس آنجلس را آلوده خواهد کرد و فرآیندهای تصفیه آب آشامیدنی را پیچیده می کند.

۳. تغییرات هیدرولوژیکی

تغییر الگوهای رواناب: این آتش سوزی گسترده پوشش زمین را تغییر داده است و احتمالاً بر نحوه جذب آب در زمین و میزان سرازیر شدن آن به نهرها و رودخانه ها تأثیر خواهد گذاشت.

فرسایش خاک: از بین رفتن پوشش گیاهی منجر به افزایش فرسایش خاک، کاهش توانایی زمین برای حفظ آب و تأثیر بر سفره های آب محلی و تغذیه آب زیرزمینی می شود.

۴. اثرات بلند مدت اکوسیستم

بازیابی پوشش گیاهی: روشی که پوشش گیاهی پس از آتش سوزی، بهبود می یابد و بر کیفیت و کمیت آب تأثیر می گذارد. ممکن است برخی از مناظر به سرعت بهبود یافته و برخی دیگر سال ها طول بکشد و بر چرخه آب محلی تأثیر بگذارد.

تغییر زیستگاه: تنوع زیستی نقش اساسی در حفظ سیستم های آب سالم دارد. تغییر در اکوسیستم های محلی می تواند بر تنوع زیستی تأثیر بگذارد.

۵. بهداشت عمومی و نگرانی های ایمنی

کیفیت آب آشامیدنی: آلاینده ها اگر وارد منابع آب آشامیدنی شوند، برای سلامتی انسان خطراتی را ایجاد می کنند از این رو نیاز به اجرای اقدامات اضطراری است تا از سلامت آب اطمینان حاصل شود.

ایمنی آب های تفریحی: آب های آلوده شده، ممکن است برای استفاده تفریحی ناامن شوند و بر رفاه جامعه و اقتصاد محلی تأثیر بگذارند.

ردپای آلودگی آب پس از آتش سوزی

برای پاسخ دادن به پرسش دوم تحقیق «آتش سوزی به چه نحوی منابع آبی یک حوضه آبخیز را آلوده می کند؟» ابتدا باید ردپای آب در حوضه را بررسی کنیم. آب در یک حوضه آبخیز در سیستم های سطحی مانند رودخانه ها و نهرها،

حوضه‌های آبخیز شامل طیف وسیعی از انواع اکوسیستم‌ها از جمله ارگانیسم‌هایی هستند که اقدامات حیاتی را برای حفظ آب آشامیدنی سالم انجام می‌دهند. درختان و سایر گیاهان از طریق سیستم ریشه خود، خاک را تثبیت کرده و مقدار آب و مواد مغذی موجود در اکوسیستم را با استفاده از آب تنظیم می‌کنند. خاک‌ها با جذب نزولات جوی و حذف آلاینده‌ها به مثابه سیستم‌های تصفیه عمل کرده و در نه‌رها، حشرات، حیوانات کوچک و میکروارگانیسم‌ها مانند باکتری‌ها و قارچ‌ها، مواد آلی و ترکیبات محلول را تجزیه می‌کنند و بیشتر موادی را که آب آشامیدنی را آلوده می‌کنند، از بین می‌برند. آتش‌سوزی‌های جنگلی این فرآیندها را مختل کرده و در نتیجه دسترسی به منابع آبی و کیفیت آن‌ها را برای یک دوره چند ساله یا حتی ده‌ها سال پس از خاموش شدن آتش تهدید می‌کنند. آتشی که یک حوضه آبخیز را می‌سوزاند می‌تواند بیش از ۹۰ درصد پوشش گیاهی منطقه را از بین ببرد و خاک آن حوضه را تغییر دهد بنابراین ریشه گیاهان سوخته، دیگر نمی‌تواند خاک را تثبیت کرده با آب را جذب کند (شکل ۲). (باسو و همکاران، ۲۰۲۲: ۲۵).



شکل ۳ بسته شدن راه آب راه های اثر جبر بان زباله ای ناشی از آتش سوزی (باسو و همکاران: ۲۰۲۲)

بدین ترتیب ردپای آلودگی آب پس از آتش سوزی در سطح یک حوضه را باید در ذخایر آب زیرزمینی، پوشش گیاهی و شرایط هیدرولوژیکی و فرسایش خاک، مناطق پایین دست و مناطق شهری - طبیعی^۱ دنبال کرد، برای این منظور در ادامه عوامل یاد شده، تجزیه و تحلیل می شوند.

تأثیر آتش‌سوزی بر ذخایر آب زیرزمینی

آتش‌سوزی‌های مناطق طبیعی رابطه مستقیم با تغییر خالص سطح آب‌های زیرزمینی دارند به گونه‌ای که افزایش جریان آب به داخل نهرها پس از آتش‌سوزی، می‌تواند در پرکردن آب‌های زیرزمینی مفید باشد. از طرفی با کاهش توانایی خاک برای جذب مقدار آبی که به طور معمول در آب‌های زیرزمینی نفوذ کرده، می‌تواند سطح آب‌های زیرزمینی را تا دو سال کاهش دهند. در واقع در طول آتش‌سوزی‌های شدید، بسبب وجود دمای بالا، ساختار و شیمی خاک به گونه‌ای تغییر می‌کند که سطح خاک، آب‌گریزتر شده و خاک بارش کمتری را جذب خواهد کرد و آب به راحتی روی سطح خاک جریان می‌یابد و ذرات خاک، رسوبات و مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر را با خود می‌برد (ویلیام و همکاران، ۲۰۲۲: ۶۹۱۱۹). بنابراین آتش‌سوزی‌ها با تغییر مقدار آب در مخازن آب زیرزمینی، مانند سفره‌های زیرزمینی، شرایط زیرزمینی را نیز تغییر می‌دهد.

تأثیر آتش‌سوزی‌ها بر پوشش گیاهی

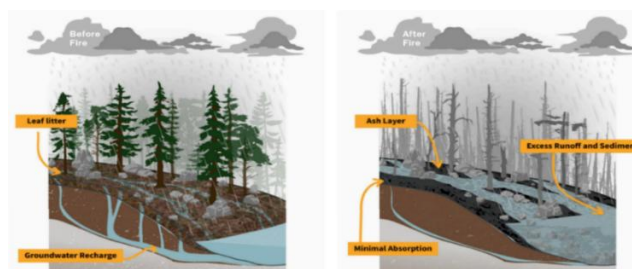
بررسی مطالعات متعدد حاکی از آن است که آتش‌سوزی‌های پوشش گیاهی یکی از مهم‌ترین اختلالات در جهت بهبود و برگشت پذیری منطقه آسیب‌دیده است. از جمله تحقیقات (نونس و همکاران، ۲۰۱۸: ۴۶۳). که بیان می‌دارد سالانه حدود ۴ درصد از سطح زمین‌های پوشش‌دار جهانی تحت تأثیر آتش‌سوزی قرار می‌گیرند. اهمیت این آمار به این دلیل است که اکوسیستم‌های مستعد آتش‌سوزی مانند جنگل‌ها، چمن‌زارها و مراتع، ۶۰ درصد از آب ۱۰۰ شهر بزرگ جهان را تأمین می‌کنند. درحالی‌که مساحت جهانی زمین‌های سوخته در دو دهه گذشته تا حدود ۲۰ درصد کاهش یافته، اما عمدتاً به دلیل گسترش کشاورزی، بسیاری از مناطق حیاتی، برای تأمین آب در معرض خطر فزاینده آتش‌سوزی قرار گرفته‌اند. علت این امر تغییرات اقلیم، طولانی‌تر شدن فصل آتش‌سوزی در بسیاری از مناطق رها شدن زمین و گرایش به آتش‌سوزی‌های تجویزی در ابعاد گسترده‌تر است.

تأثیر آتش‌سوزی‌های تجویز شده بر یک حوضه آبخیز

آتش‌سوزی‌های تجویز شده، برخلاف آتش‌سوزی‌های جنگلی، تأثیر منفی بر منابع آبی ندارد بلکه سوختگی‌های تجویز شده با شدت کم، گرمایش خاک را محدود می‌کند و در نتیجه احتمال ایجاد خاک‌هایی که آب را دفع می‌کنند و منجر به آبشارهای فرسایشی، رواناب و جریان‌های زیاده می‌شود، در آن‌ها کمتر است (استفنز و همکاران، ۲۰۲۱: ۸۱۰۰۴).

تأثیر آتش‌سوزی بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی

بررسی ربین حاکی از آن است که خاکستر و رسوبات ناشی از آتش‌سوزی اکوسیستم گیاهی، منجر به افزایش کدورت و دمای آب می‌شود. تجمع این عوامل منجر به افزایش فعالیت بیولوژیکی در اکوسیستم آبی شده و سطح اکسیژن محلول را در محیط کاهش می‌دهد، بدین ترتیب بقای حیات آبزیان را به خطر می‌اندازند (ربین، ۲۰۲۴).



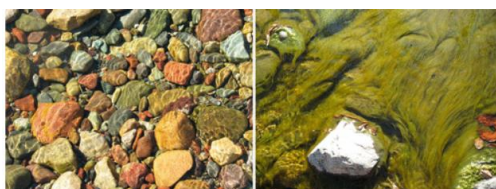
شکل ۴ نمای شماتیک از رواناب حاوی خاکستر و افزایش کدورت منابع آبی در حوضه پس از آتش‌سوزی (منبع: ربین، ۲۰۲۴)

تحقیقات (آبراهام و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۰۲۲) نشان می‌دهد، اولین بارندگی شدید پس از آتش‌سوزی و رواناب‌های متوالی ناشی از آن، در فرسایش خاک و انتقال خاکستر و رسوبات نقش مهمی دارد و به طور طبیعی با انتقال عناصر سمی، از جمله جیوه و سایر آلاینده‌ها به اکوسیستم‌های آبی پایین دست همراه است. بنابراین فرآیندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی در صورت وقوع طوفان پس از آتش‌سوزی تسریع شده و اغلب با هم ترکیب و موجب کاهش کیفیت آب می‌شود (شکل ۴).

تأثیر آتش‌سوزی بر مناطق شهری - طبیعی

بررسی مطالعات متعدد مشخص کرد که در سراسر ایالات متحده، سیستم‌های آب آشامیدنی عمومی در مناطق شهری پس از آتش‌سوزی‌های بزرگ، غلظت بالایی از ترکیباتی مانند نیترات و آرسنیک دارند که در برخی موارد، از سطوح قابل قبول بر اساس قانون آب آشامیدنی ایمن بالاتر رفته است (پنینو^۱ و همکاران، ۲۰۲۲: ۱۴۹۸۹۰). اگر آتش‌سوزی مناطق طبیعی با سرایت آتش به منطقه شهری همراه باشند، بطور مستقیم به زیرساخت‌های آبی در این مناطق صدمه وارد خواهند کرد و تجمع آلاینده‌ها (از جمله بنزن) افزایش یافته و بحران جدی برای حوضه آبخیز در آن منطقه بوجود خواهند آورد (پائول و همکاران، ۲۰۲۲: ۳۰۶۹۹).

چنین بلایای آبخیزی به دلیل تخریب خانه‌ها و زیرساخت‌ها و از بین رفتن جاده‌ها یا اختلال در دسترسی به آن‌ها مانند آنچه در کالیفرنیا در سال ۲۰۱۸ رخ داد، مانع برگشت‌پذیری سریع جامعه می‌شود. شکل ۵ رانش گل در سال ۲۰۲۱ در مناطقی که در آتش‌سوزی گریزلی کلرادو در سال ۲۰۲۰ سوخته بودند را نشان می‌دهد که ۷۰ آبراه را در حوضه آبخیز منطقه بست. بگونه‌ای که عواقب این آتش‌سوزی جنگلی بر تامین آب در مناطق مجاور تا فاصله ۱۰۰ مایلی مشاهده شده است (بری و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۶۴۵).



شکل ۵ نمونه‌هایی از بستر جریان نسوخته (سمت چپ) و پس از آتش‌سوزی (راست) (منبع: بلادن و همکاران، ۲۰۱۴)

لوله‌های آبی که آتش‌سوزی آن‌ها را تخریب کرده، می‌تواند منبع آلودگی ذخایر آبی باشد. این لوله‌ها معمولاً برای تحمل دمای بالا ساخته نشده از این رو اغلب در طول آتش‌سوزی و پس از آن، دچار آسیب‌دیدگی گسترده می‌شوند (شکل ۲). برای مثال، آتش‌سوزی که کمپ پارادایس کالیفرنیا را در سال ۲۰۱۸ ویران کرد، زیرساخت‌های آب شهر را نیز نابود و شبکه توزیع آب محلی را برای ماه‌ها پس از وقوع آتش‌سوزی آلوده کرد. بنابراین کیفیت پایین آب برای یک دوره طولانی کارآمدی تصفیه‌خانه‌ها را در طول زمان کاهش می‌دهد هزینه‌های زیادی برای شرکت‌ها و جوامع محلی دارد. به عنوان مثال، پس از یک آتش‌سوزی بزرگ در سال ۲۰۰۳، شهر دنور کلرادو، ۲۷ میلیون دلار برای بازسازی زیرساخت‌های آبی خود، از بازسازی اکوسیستم تا حذف رسوب، هزینه کرد (پیریکارد^۲ و همکاران، ۲۰۲۱: ۲۴۳۳).

بنابراین یافته‌های این پژوهش تأکید دارند که در جوامع وابسته یا پایین دست مناطق سوخته، به دلیل سوختن ماشین‌ها، خانه‌ها و سایر زیرساخت‌ها در طول آتش‌سوزی، ترکیبات سمی آزاد می‌شود که منابع آب را آلوده کرده و مشکلات جدی برای کیفیت و در دسترس بودن آب ایجاد می‌کند.

آلاینده‌ها

پاسخ به آخرین پرسش این تحقیق «آتش‌سوزی چه نوع آلاینده‌هایی را به پیکره آبی یک حوضه وارد می‌کند؟» نیازمند شناسایی انواع رسوبات حاوی آلاینده‌های ناشی از آتش‌سوزی در سطح منطقه و برآورد این آلاینده‌ها است که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

انواع رسوبات وارد شده به اکوسیستم‌های آبی پس از آتش‌سوزی در یک حوضه آبخیز مطالعات انجام شده در مورد نوع رسوبات ناشی از آتش در مناطق مختلف، بیانگر آن است که مقادیر زیادی خاکستر در نقاطی که پوشش گیاهی ضخیم‌تری دارند به ویژه آتش‌هایی که شاخه‌های درختان را از بین می‌برند، بوجود می‌آید (ترین^۱ و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۰). از طرفی ویژگی‌های سطح زمین از جمله شدت سوختگی، ناهمواری سطح، شیب و خصوصیات توپوگرافی، اتصال فرآیندهای انتقال جریان زمینی را کنترل می‌کنند که به نوبه خود بر تحویل آلاینده‌ها به آب‌های دریافت‌کننده تأثیر می‌گذارد. در مقابل، ویژگی‌های محیط آبی مانند حجم، رژیم جریان، دما و طبقه‌بندی بر فرآیندهایی از جمله رقیق‌سازی آلاینده، تضعیف، تبدیل و تجزیه تأثیر گذار هستند.

نونس در تحقیقات خود متوجه شد که در محیط آبی، مخلوط خاک سطحی و خاکستر رسوب شده، غلظت مواد مغذی را افزایش می‌دهند بنابراین منبع مهم آلودگی بشمار می‌آیند چرا که حامل مواد خطرناک مانند فلزات و هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) هستند (نونس و همکاران، ۲۰۱۸: ۴۶۳).

یکی دیگر از مهمترین آلاینده‌هایی که در مطالعات فراوانی تجزیه و تحلیل شده، عنصر جیوه است. محققان، نگرانی‌های زیادی درباره ورود جیوه به منابع آبی دارند چون تأثیرات منفی بر سلامت انسان و اکوسیستم می‌گذارد (آبراهام و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۴۴). یافته‌های این پژوهش در مورد ارزیابی میزان جیوه وارد شده به پیکره آبی پس از آتش‌سوزی، نشان می‌دهد که اگر جیوه به محیط آبی، وارد شود به راحتی به متیل جیوه سمی تبدیل می‌شود. گیاهان و جانوران آبرزی مانند ماهی‌ها، جیوه را یا مستقیماً با تماس پوستی، استنشاق و بلع ذرات خاک یا از طریق مکانیسم زنجیره غذایی، جذب می‌کنند، که حاکی از خطرزایی تجمع زیستی این عنصر فلزی است.

براساس یافته‌های این تحقیق، نوع رسوبات وارد شده به اکوسیستم‌های آبی نسبتاً متنوع است و نه تنها به لایه خاکستری رسوب شده بر روی سطح خاک وابسته است، بلکه به درجه اتصال بین منطقه سوخته و بدنه آبی پایین دست نیز بستگی دارد. آلودگی‌های ناشی از آتش‌سوزی‌های تجویزی می‌توان گفت این نوع آتش‌سوزی‌ها باعث آزاد شدن جیوه به اتمسفر و خاک منطقه شده که اغلب با بارش و رواناب‌های ناشی از آن و همچنین به کمک فعالیت بادی به منابع آب می‌رسند.

برآورد میزان آلودگی

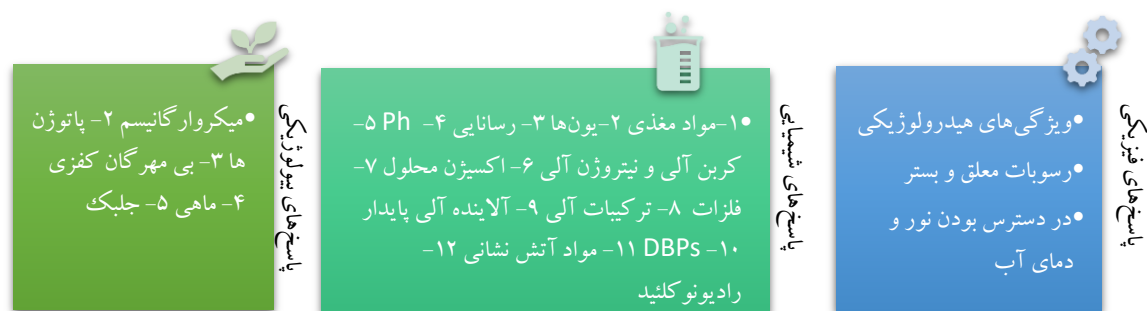
برآورد میزان آلودگی رواناب‌ها و سایر ذخایر آبی ناشی از انتقال آلاینده‌ها از مناطق سوخته به پیکره آبی در حوضه آبخیز از جمله تخمین اختلالات کیفیت آب، بررسی میزان آسیب زیستگاه گونه‌های حساس و شناسایی میزان خطرزایی رسوبات آلوده از دیدگاه مدیریتی حائز اهمیت است و تا حد زیادی به تأثیر آن بر نقاط بیولوژیکی پایانی بستگی دارد.

پائول و همکارانش (۲۰۲۲) مدل مفهومی را ارائه که متخصصین محیط‌زیست و سازمان آب در آمریکا نیز آن را تأیید کرده‌اند. در این مدل، اهداف مدیریتی براساس شاخصه‌های کاربری (زندگی مشترک آبیان، تفریح و استفاده از آب آشامیدنی) تعیین شده‌است. این کاربری‌ها بر اساس برنامه‌های مدیریتی، تعیین و کنترل کیفیت آب (شامل ارزیابی، تعیین حداکثر بار روزانه (TMDL)^۱ و کنترل منبع غیر نقطه‌ای) طراحی شده‌اند. همان گونه که در شکل ۹ آمده‌است در این مدل، پاسخ‌ها براساس سه گروه کلی (شکل ۶) دسته‌بندی شده‌اند:

الف) پاسخ‌های فیزیکی که ویژگی‌های هیدرولوژیکی، جریان‌های آشغال و خاکستر، نور و دمای آب را بررسی می‌کنند.

ب) پاسخ‌های شیمیایی که ۱) مواد مغذی^۲، ۲) کلسیم، پتاسیم و یون‌های دیگر، ۳) رسانایی^۳ (pH / قلیائیت، ۵) کربن آلی و نیتروژن آلی^۴، ۶) اکسیژن محلول^۵، ۷) فلزات و سایر مواد شیمیایی معدنی^۶، ۸) ترکیبات آلی و آلاینده‌های آلی پایدار^۷ و مواد آلی محلول (DOM)^۸ و پلی استان (POM)^۹، ۹) محصولات جانبی ضد عفونی (DBPs)^{۱۰}، ۱۰) مواد شیمیایی آتش نشانی^{۱۱} و در نهایت ۱۱) رادیونوکلئیدها^{۱۲} را تجزیه و تحلیل می‌کنند.

ج) پاسخ‌های بیولوژیکی که شامل عکس‌العمل‌های زیستی در ۱) میکروارگانیسم‌ها / پاتوژن‌ها ۲) بی‌مهرگان کفزی ۳) ماهی‌ها و ۴) جلبک‌ها است (پائول و همکاران، ۲۰۲۲: ۳۰۶۹۹).



شکل ۶ دسته‌بندی نقاط پایانی برای پاسخ به آلاینده‌های ناشی از آتش سوزی در حوضه آبخیز

مدل مفهومی شکل (۹) بیان می‌دارد که آتش سوزی با از بین بردن پوشش گیاهی در منطقه سبب افزایش فرسایش خاک و افزایش رواناب در سطح حوضه آبخیز می‌شود. همچنین انواع یون‌ها و فلزات، مواد آلی پایدار، مواد آزاد شده در فرآیند اطفاء حریق و خاکستر از طریق رواناب ناشی از بارندگی و سیل به پیکره آبی رسیده و با ایجاد آلودگی، کدورت، تغییر قلیائیت، افزایش دمای آب، کاهش اکسیژن محلول، اتروفیکاسیون و تغییر در شرایط اکوسیستمی بر زندگی آبیان، تصفیه آب و مصارف تفریحی اثر نامطلوب دارد.

1. Total Maximum Daily Load
2. Nutrients
3. Conductivity
4. Organic Carbon and Organic Nitrogen
5. Dissolved Oxygen
6. Metals and Other Inorganic Chemicals
7. Organic Compounds and Persistent Organic Pollutants
8. Dissolved Organic Matter (DOM)
9. Polyoxymethylene (POM)
10. Disinfection Byproducts (DBPs)
11. Fire Fighting Chemicals
12. Radionuclides

نقاط پایانی را می‌توان از نظر حجم آب یا میزان سمیت رسوب، بررسی و یا از طریق شاخص‌های بیولوژیکی ارزیابی کرد. پتانسیل خطر بالقوه را می‌توان با مقایسه غلظت آلاینده‌ها در رواناب با معیارهای کیفیت آب برای محافظت از موجودات آبی حساس ارزیابی کرد. این اثرات ممکن است مدت کوتاهی پس از ورود رواناب پس از آتش‌سوزی به پهنه دریافت‌کننده آب و یا در طول زمان آشکار شود (استین^۱ و همکاران، ۲۰۰۹: ۱).

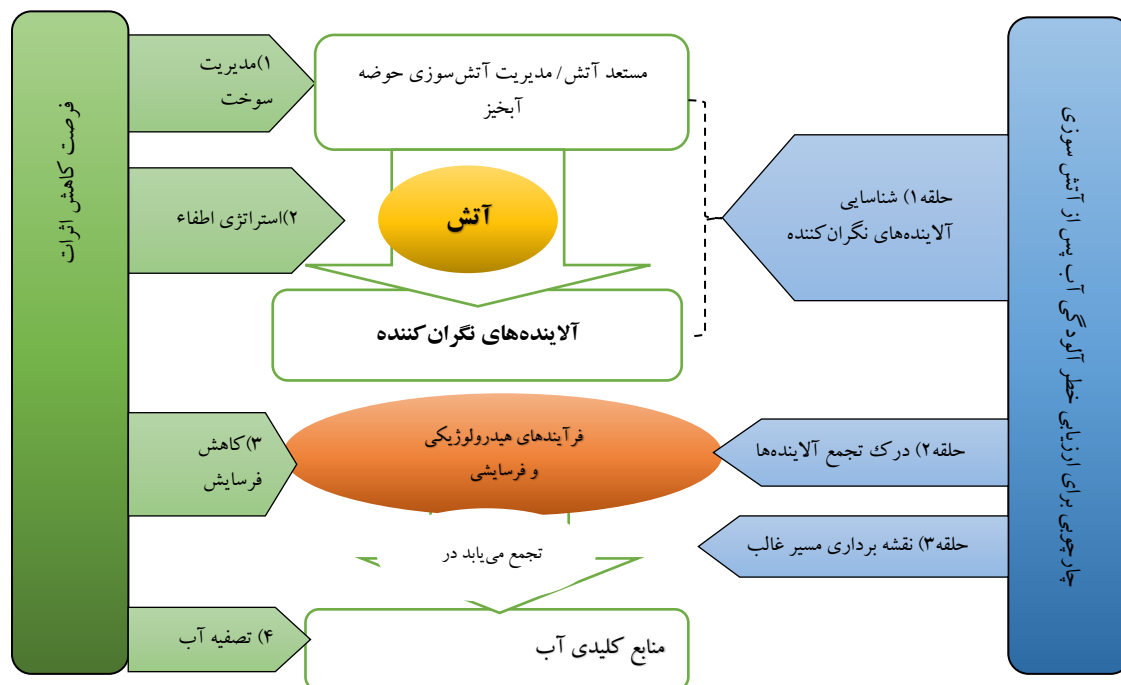
یافته‌های این پژوهش تأکید دارند که تغییر در کیفیت آب ممکن است از اثرات مستقیم رواناب و اثرات غیرمستقیم مرتبط با رسوب هوایی خاکستر ناشی شود. نتایج بررسی تحقیقات متنوع که در شکل (۷) آورده شده است، بیان می‌دارد که مناطق مستعد آتش‌سوزی نیازمند مدیریت فراکنشی هستند. بدین ترتیب می‌توان انتظار داشت که با مدیریت پیشگیرانه در فرصت مناسب و پیش از آن که آلاینده‌ها بتوانند در محیط‌های آبی تجمع یابند یا فرآیندهای هیدرولوژیکی را تحت تأثیر قرار دهند، بتوان از حجم تأثیرات منفی آتش در آلوده کردن منابع کلیدی در حوضه کاست (شکل ۷).

در همین خصوص ربین در رساله دکترای خود جهت کاهش شدت اثرات نامطلوب سوختگی در حوضه آبخیز به موارد زیر اشاره می‌کند (شکل ۷):

الف) مدیریت سوخت مناسب می‌تواند خطر ورود آلاینده‌ها به حوضه آبخیز را قبل از وقوع آتش‌سوزی کاهش

دهد،

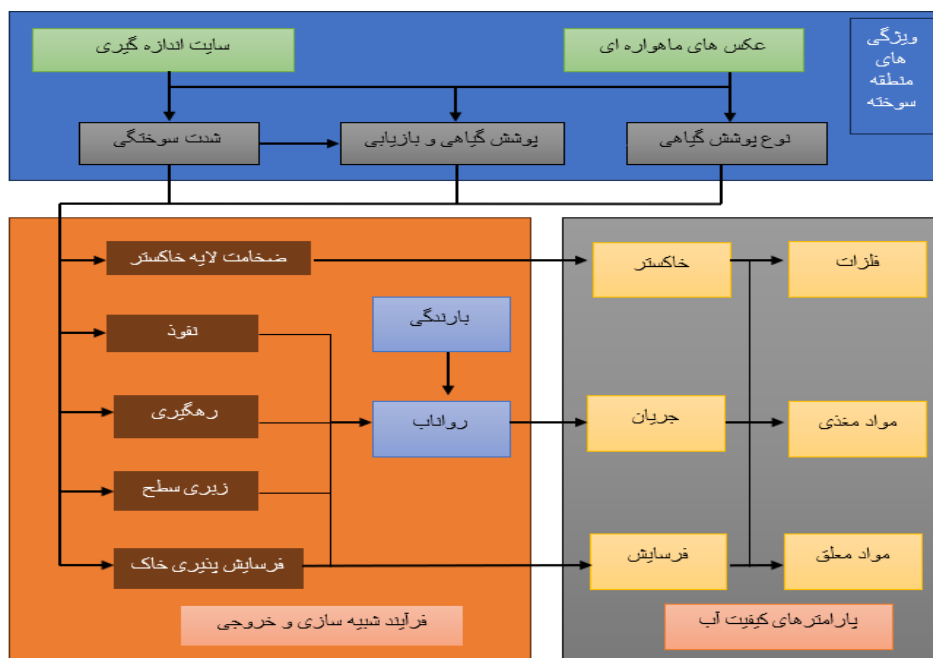
- ب) اطفاء حریق ممکن است گسترش آتش‌سوزی را در مناطق حساس محدود کند،
 ج) اقدامات اضطراری پس از آتش‌سوزی می‌تواند تجمع و انتقال آلاینده‌ها به ذخایر آبی را کاهش دهد،
 د) تصفیه خانه‌ها را می‌توان برای رفع نیازهای خاص ضد آلودگی اصلاح کرد (ربین^۲، ۲۰۲۴).



شکل ۷ چارچوبی برای پیش‌بینی خطرات آلودگی آب پس از آتش‌سوزی (منبع: نونس و همکاران، ۲۰۱۶)

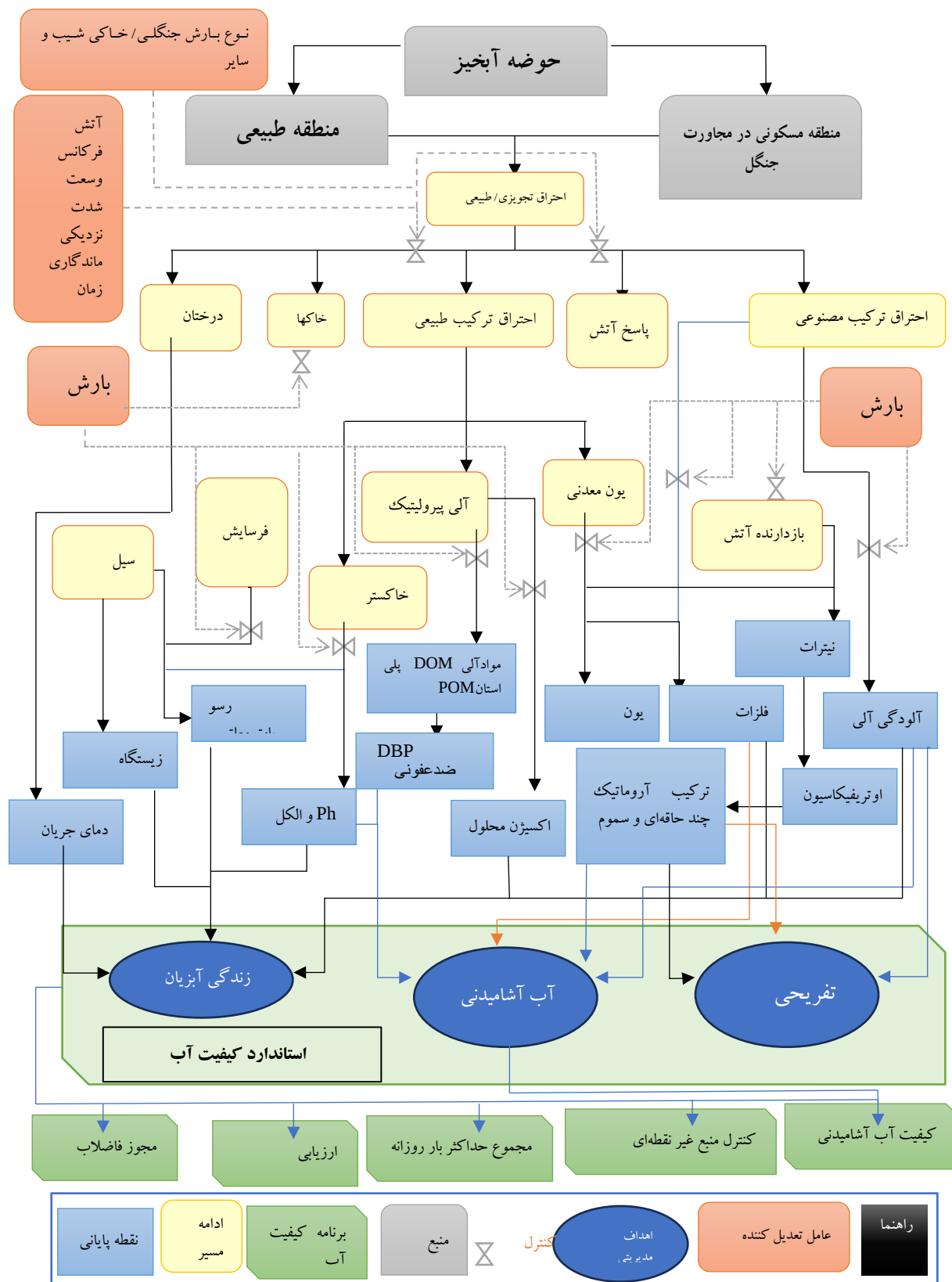
بنابراین جامعه تحقیقاتی نقش بسزایی در ارزیابی خطر آلودگی آب در مناطق مستعد آتش سوزی دارند. برای انجام این کار، یک چارچوب ساده برای ارزیابی خطر آلودگی آب پس از آتش سوزی پیشنهاد شده که شامل (شکل ۷) (نونس و همکاران، ۲۰۱۶: ۴۶۳):

۱. شناسایی آلاینده‌های ممکن و ذخایر آب حوضه.
 ۲. درک فرآیندهای مسلط حاکم بر تجمع آلاینده‌ها.
 ۳. نقشه برداری از مسیرهایی که اغلب آلاینده‌ها را به نقاط پایانی مرتبط می‌کنند.
- در شکل (۸) نحوه تأثیر کلی آتش در حوضه آبخیز و روند ورود آلاینده‌ها به آن آمده است. مطابق با آن لازم است شدت سوختگی را از طریق اندازه گیری منطقه سوخته شده یا بررسی پوشش گیاهی سوخته، از طریق تصاویر ماهواره‌ای بدست آورد. سپس برای ارزیابی باید داده‌های مربوط به مؤلفه‌های خاکستر تولید شده، تغییرات نفوذ، زبری سطح و میزان فرسایش خاک را جمع آوری کرد.



شکل ۸ مدل تأثیر کلی آتش در حوضه آبخیز و روند ورود آلاینده‌ها به آن (منبع: باسو و همکاران، ۲۰۲۲)

براساس شکل (۸)، به دلیل از بین رفتن پوشش گیاهی و خاک سطحی افزایش رواناب پس از بارندگی در سطح منطقه بوجود می‌آیند. بدین ترتیب انتظار می‌رود آلاینده‌های بیشتری به پیکره آبی وارد شود. بنابراین سوختگی سطح خاک، کاهش نفوذپذیری، از بین رفتن پوشش گیاهی و افزایش رواناب، باعث می‌شوند که فرسایش خاک افزایش یافته و ورود آلاینده‌ها و رسوبات زباله‌ای به منابع آبی در منطقه ادامه یابد. خاکستر ناشی از سوختن پوشش گیاهی و خاک منطقه سرشار از عناصر فلزی است که توسط فرسایش بادی یا آبی وارد پیکره آبی می‌شود. به طور خلاصه ورود حجم زباله‌ای و رسوبات ناشی از آتش سوزی منجر به افزایش کدورت آب شده و اکسیژن محلول در آن را کاهش می‌دهد و به آلودگی آب‌ها منتهی می‌شود فلزات و مواد مغذی که از این طریق وارد آب‌ها شده‌اند سبب ایجاد اوتریفیکاسیون و تجمع زیستی شده و اکوسیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهند.



شکل ۹ مدل مفهومی ارزیابی تأثیر آلاینده‌های ناشی از آتش‌سوزی در حوضه آبخیز (منبع: پائول و همکاران، ۲۰۲۲)

نتیجه گیری

بررسی مطالعات متعدد مشخص کرد که آتش سوزی‌ها به طور منظم بر کیفیت آب تأثیر می‌گذارند، پیامدهای آتش سوزی بر اساس عواملی مانند نوع و وضعیت اکوسیستم آسیب دیده، فراوانی تاریخی و شدت آتش سوزی در منطقه، شدت بارندگی بعدی، بهبودی منظر پس از آتش سوزی، و ظرفیت محلی برای تصفیه آب آلوده یا به دست آوردن آب از منابع جایگزین می‌تواند بر ذخایر آب زیرزمینی، پوشش گیاهی، فرایندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی تأثیر بگذارد و انواع آلودگی‌ها را در مناطق پایین دست وارد کند و پاسخ رژیم جریان بارندگی را تغییر می‌دهند بدین ترتیب خطرات بالقوه‌ای برای منابع آب به همراه دارند، از جمله مواردی که برای تأمین آب آشامیدنی و زیستگاه‌های آبی وجود ایجاد می‌کنند.

آلاینده‌ها از طریق رسوب بادی یا با رواناب‌های بعدی به پیکره منابع و ذخایر آبی در منطقه وارد می‌شوند. این آلاینده‌ها شامل رسوبات، ترکیبات آلی محلول و فلزات هستند که منابع آب آشامیدنی را تهدید می‌کند. در واقع تحقیقات متعدد بیان کرده‌اند که مقدار آلاینده‌های کیفی آب (نیترات، برخی فلزات، بنزن و محصولات جانبی ضد عفونی) از حد آن‌ها نسبت به قبل از آتش سوزی در محیط آبی فراتر رفته و اغلب با چندین مرتبه افزایش از سطح قابل قبول، مشاهده می‌شوند.

بر اساس نتایج فراتحلیل مشخص شد که آتش سوزی از طریق رسوبات هوایی، حمل خاکستر، رواناب‌ها و جریان زباله‌ای سبب آلودگی منابع آبی می‌شود. آتش سوزی با ایجاد آلودگی در رواناب، افزایش بار مواد معلق بر کیفیت آب، تغییر الگوی رواناب و فرسایش خاک بر سیستم هیدرولوژیکی حوضه و با از بین بردن پوشش گیاهی و خاک سطحی بر زیستگاه اثر می‌گذارد. همچنین آتش سوزی سبب آسیب به زیر ساخت‌ها و منابع آبی شده، کیفیت آب آشامیدنی را تغییر می‌دهد و بر مصارف تفریحی اثر مخرب دارد. آتش سوزی انواع آلاینده‌های فیزیکی، بیوشیمیایی و بیوزیستی را وارد پیکره آبی می‌کند.

پس از تحلیل مطالعات متعدد، یک مدل مفهومی برای پاسخ آلاینده‌ها در نقاط پایانی پس از آتش سوزی در حوضه آبخیز معرفی شد و در مورد انواع آلاینده‌هایی که به سبب آتش سوزی وارد پیکره آبی حوضه می‌شوند، این نتیجه به دست آمد که آتش سوزی سبب از بین رفتن خاک سطحی و پوشش گیاهی شده که خود منجر به کاهش نفوذپذیری خاک و افزایش رواناب در سطح حوضه می‌گردد، پس از آتش سوزی حجم جریان زباله‌ای افزایش یافته و با ورود انواع یون‌ها و فلزات، مواد آلی پایدار، مواد آزاد شده در فرآیند اطفاء حریق و یا ترکیبات متنوع موجود در خاکستر که از طریق رواناب ناشی از بارندگی و سیل به پیکره آبی رسیده و با ایجاد آلودگی، کدورت، تغییر قلیائیت، افزایش دمای آب، کاهش اکسیژن محلول، اتروفیکاسیون و تغییر در شرایط اکوسیستمی بر زندگی آبزیان، تصفیه آب و مصارف تفریحی اثر نامطلوب دارد. برای نمونه بررسی‌ها نشان داد که آتش سوزی توانسته غلظت جیوه در منابع آبی را تا ۳۵٪ و غلظت نیتروژن آلی محلول را تا چهار برابر حد مجاز و نیتروژن کل را تا پنج برابر، فسفر را ۲ تا ۱۳ برابر افزایش دهد.

بر اساس اطلاعاتی که از تحقیقات مختلف بدست آمد می‌توان اظهار داشت که برای ارزیابی شدت و مقدار آلودگی در منابع آبی موجود در یک حوضه آبخیز که بر اثر آتش سوزی تولید می‌شوند و به منابع آبی می‌رسند لازم است در ابتدا شدت سوختگی در منطقه را مشخص کنیم. سپس مولفه‌های نفوذ، زبری سطح و فرسایش که بر مقدار رواناب تأثیر گذار هستند تجزیه و تحلیل شوند. در ادامه باید رسوبات معلق و ته‌نشین شده در منابع آبی بررسی شوند. این آلاینده‌ها می‌توانند فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی باشند و پاسخ اکوسیستم آبی به آن‌ها در کاربری محیط آبی، نحوه تصفیه و برگشت پذیری محیط به شرایط عادی تأثیر گذار است.

پیشنهادهای

آلاینده‌های مختلفی که در اثر آتش‌سوزی، در یک منطقه وجود می‌آید، می‌توانند سبب آلوده شدن منابع آب زیرزمینی یا آب آشامیدنی شده و بر تصفیه آب‌ها تأثیرگذار باشد همچنین موجب اختلالات اکوسیستمی در یک حوضه آبخیز شوند، از این رو پیشنهاد می‌شود بر اساس مدل‌ها و راهکار اشاره شده در تحقیق حاضر، به جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز در مناطق مستعد آتش‌سوزی پرداخته شود و بانک اطلاعات غنی در این خصوص تهیه گردد. همچنین در راستای دست‌یابی به اهداف مدیریت فراکنشی پیشنهاد می‌شود با ایجاد آتش‌سوزی‌های تجویزی به بررسی آلودگی‌های ناشی از آتش بر منابع آبی در مناطق مستعد آتش‌سوزی اقدام شود.

روش فراتحلیل یا متا آنالیز (Meta-Analysis)، یک روش کمی و عینی برای ترکیب نتایج مطالعات پیشین در یک موضوع خاص است. همچنین روش مناسبی برای خلاصه سازی نتایج تعداد زیادی از تحقیقات، در مقایسه با داوری ذهنی درباره تحقیقات است. فراتحلیل روشی برای ترکیب و مقایسه مطالعات انجام شده در حوزه های مختلف علمی از جمله علوم اجتماعی، علوم رفتاری، علوم پزشکی، علوم زیست محیطی و علوم کشاورزی است. فراتحلیل عبارت از رویکرد کمی که برای ترکیب نظام مند، تحقیقات قبلی و آن چه که توسط محققین پیشین انجام شده است برای دست یابی به جمع بندی درباره بدنه تحقیق و کشف دانش جدید انجام می شود. این تکنیک کمی تواننده اثربخشی یافته ها، کشف خلأ علمی و برنامه ریزی برای پژوهش های جدید در زمینه موضوع کاربردی مورد نظر منجر شود. در فراتحلیل، ادبیات موضوع از منابع مکتوب مورد بررسی نظام مند قرار می گیرد

منابع

- Abraham, J., Dowling, K., & Florentine, S. (2018). Controlled burn and immediate mobilization of potentially toxic elements in soil, from a legacy mine site in Central Victoria, Australia. *Science of the Total Environment*, 616, 1022-1034.
- Abraham, J., Dowling, K., & Florentine, S. (2018). Effects of prescribed fire and post-fire rainfall on mercury mobilization and subsequent contamination assessment in a legacy mine site in Victoria, Australia. *Chemosphere*, 190, 144-153.
- Basso, M., Serpa, D., Mateus, M., Keizer, J. J., & Vieira, D. C. S. (2022). Advances on water quality modeling in burned areas: a review. *PLoS Water*, 1(7), e0000025.
- Bladon, K. D., Emelko, M. B., Silins, U., & Stone, M. (2014). *Wildfire and the future of water supply*.
- Bladon, K. D., Silins, U., Wagner, M. J., Stone, M., Emelko, M. B., Mendoza, C. A., ... & Boon, S. (2008). Wildfire impacts on nitrogen concentration and production from headwater streams in southern Alberta's Rocky Mountains. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(9), 2359-2371.
- Brey, S. J., Barnes, E. A., Pierce, J. R., Swann, A. L., & Fischer, E. V. (2021). Past variance and future projections of the environmental conditions driving western US summertime wildfire burn area. *Earth's future*, 9(2), e2020EF001645.
- Campos, I., Abrantes, N., Keizer, J. J., Vale, C., & Pereira, P. (2016). Major and trace elements in soils and ashes of eucalypt and pine forest plantations in Portugal following a wildfire. *Science of the Total Environment*, 572, 1363-1376.
- Chappell B. (2025). What is the flame retardant that planes are dropping on the LA fires?. *NPR*
- Chognot J P. (2025). Los Angeles wildfires in figures. *PHYS*
- Li, S., Dao, V., Kumar, M., Nguyen, P., & Banerjee, T. (2022). Mapping the wildland-urban interface in California using remote sensing data. *Scientific reports*, 12(1), 5789.
- Ferreira, A. J. D., Coelho, C. D. O., Ritsema, C. J., Boulet, A. K., & Keizer, J. J. (2008). Soil and water degradation processes in burned areas: Lessons learned from a nested approach. *Catena*, 74(3), 273-285.
- Kean, J. W., Staley, D. M., & Cannon, S. H. (2011). In situ measurements of post-fire debris flows in southern California: Comparisons of the timing and magnitude of 24 debris-flow events with rainfall and soil moisture conditions. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F4).
- Langhans, C., Smith, H. G., Chong, D. M., Nyman, P., Lane, P. N., & Sheridan, G. J. (2016). A model for assessing water quality risk in catchments prone to wildfire. *Journal of Hydrology*, 534, 407-426.
- Mansilha, C., Carvalho, A., Guimarães, P., & Espinha Marques, J. (2014). Water quality concerns due to

- forest fires: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) contamination of groundwater from mountain areas. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 77(14-16), 806-815.
- Moody, J. A., Shakesby, R. A., Robichaud, P. R., Cannon, S. H., & Martin, D. A. (2013). Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes. *Earth-science reviews*, 122, 10-37.
- Neris, J., Elliot, W. J., Doerr, S. H., & Robichaud, P. R. (2017, April). Development of a model to predict ash transport and water pollution risk in fire-affected environments. *In EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 18845).
- Nunes, J. P., Doerr, S. H., Sheridan, G., Neris, J., Santín, C., Emelko, M. B., ... & Keizer, J. (2018). Assessing water contamination risk from vegetation fires: Challenges, opportunities and a framework for progress. *Hydrological Processes*, 32(5), 687-694.
- Nunes, J. P., Malvar, M., Benali, A. A., Rial Rivas, M. E., & Keizer, J. J. (2016). A simple water balance model adapted for soil water repellency: application on Portuguese burned and unburned eucalypt stands. *Hydrological Processes*, 30(3), 463-478.
- Nyman, P., Sheridan, G. J., Smith, H. G., & Lane, P. N. (2011). Evidence of debris flow occurrence after wildfire in upland catchments of south-east Australia. *Geomorphology*, 125(3), 383-401.
- Owens, P. N., Giles, T. R., Petticrew, E. L., Leggat, M. S., Moore, R. D., & Eaton, B. C. (2013). Muted Responses of streamflow and suspended sediment flux in a wildfire-affected watershed. *Geomorphology*, 202, 128-139.
- Paul, M. J., LeDuc, S. D., Lassiter, M. G., Moorhead, L. C., Noyes, P. D., & Leibowitz, S. G. (2022). Wildfire induces changes in receiving waters: A review with considerations for water quality management. *Water Resources Research*, 58(9), e2021WR030699.
- Pennino, M. J., Leibowitz, S. G., Compton, J. E., Beyene, M. T., & LeDuc, S. D. (2022). Wildfires can increase regulated nitrate, arsenic, and disinfection byproduct violations and concentrations in public drinking water supplies. *Science of the Total Environment*, 804, 149890.
- Prichard, S. J., Hessburg, P. F., Hagmann, R. K., Povak, N. A., Dobrowski, S. Z., Hurteau, M. D., ... & Khatri-Chhetri, P. (2021). Adapting western North American forests to climate change and wildfires: 10 common questions. *Ecological applications*, 31(8), e02433.
- Rhoades, C. C., Entwistle, D., & Butler, D. (2011). The influence of wildfire extent and severity on streamwater chemistry, sediment and temperature following the Hayman Fire, ColoradoA. *International Journal of Wildland Fire*, 20(3), 430-442.
- Robinne, F. (2024). Effects of forest fires on watershed ecosystems. *Water Resources Division of the Government of Northwest Territories*.
- Robinne, F. N., Miller, C., Parisien, M. A., Emelko, M. B., Bladon, K. D., Silins, U., & Flannigan, M. (2016). A global index for mapping the exposure of water resources to wildfire. *Forests*, 7(1), 22.
- Santín, C., Doerr, S. H., Otero, X. L., & Chafer, C. J. (2015). Quantity, composition and water contamination potential of ash produced under different wildfire severities. *Environmental Research*, 142, 297-308.
- Silins, U., Bladon, K. D., Kelly, E. N., Esch, E., Spence, J. R., Stone, M., ... & Tichkowsky, I. (2014). Five-year legacy of wildfire and salvage logging impacts on nutrient runoff and aquatic plant, invertebrate, and fish productivity. *Ecohydrology*, 7(6), 1508-1523.
- Silva, V., Pereira, J. L., Campos, I., Keizer, J. J., Gonçalves, F., & Abrantes, N. (2015). Toxicity assessment of aqueous extracts of ash from forest fires. *Catena*, 135, 401-408.
- Smith, H. G., Sheridan, G. J., Lane, P. N., Nyman, P., & Haydon, S. (2011). Wildfire effects on water quality in forest catchments: A review with implications for water supply. *Journal of Hydrology*, 396(1-2), 170-192.
- Stein, E. D., & Brown, J. (2009). Effects of post-fire runoff on surface water quality: Development of a southern California regional monitoring program with management questions and implementation recommendations. *Southern California Coastal Water Research Project Technical Report*, 598, 1-36.
- Stephens, S. L., Thompson, S., Boisramé, G., Collins, B. M., Ponisio, L. C., Rakhmatulina, E., ... & Wilkin, K. (2021). Fire, water, and biodiversity in the Sierra Nevada: A possible triple win. *Environmental Research Communications*, 3(8), 081004.
- Thurton, D. (2017). Fort McMurray seeing big spike in water-treatment costs. *CBC News Edmonton*.
- Tran, T., Baribeau, H., & Sullivan, L. (2021). Mitigate wildfire impacts on drinking water quality and operations. *Opflow*, 47(5), 10-15.
- Webster E M. (2025). January 2025 Los Angeles County Wildfire., *congressional research service*. IN FOCUS, IF12871
- Williams, A. P., Livneh, B., McKinnon, K. A., Hansen, W. D., Mankin, J. S., Cook, B. I., ... & Lettenmaier, D. P. (2022). Growing impact of wildfire on western US water supply. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(10), e2114069119