



Association Between Urban Physical Expansion, Air Quality Changes, and Land Surface Temperature in Ahvaz: Implications for Environmental Health (2005–2025)

Davood Rahmani¹, Neda Orak^{*1} , Katayoun Varshosaz², Fatemeh Karimi Organi¹, Sina Attarroshan¹

1. Department of Environment, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

2. Department of Environmental Management-HSE, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Received: 2026/04/28

Accepted: 2026/07/02

Abstract

Background and Aim: Rapid urbanization in metropolitan areas in arid and semi-arid regions has had significant impacts on climatic conditions, public health, and the environment. This study aimed to investigate the relationship between the physical growth pattern of Ahvaz City and climatic and environmental factors, with an emphasis on air quality, using the Shannon Entropy Model over a long-term temporal framework.

Methods: This descriptive–analytical study employed a quantitative approach and was conducted in 2026 within the urban area of Ahvaz. Data were collected through documentary sources and remote sensing analyses. Landsat satellite imagery from 2005 to 2025, the NDVI, and LST were utilized for analysis. Urban growth patterns were calculated using the Shannon Entropy Model, and their relationships with LST, AQI, and PM₁₀ concentrations were examined. Subsequently, the compact urban development pattern, spatial distribution of air pollutants, and health impacts associated with population exposure to particulate matter were assessed using the Exceedance Factor.

Results: The results indicated that the built-up area of Ahvaz expanded from approximately 174 km² in 2005 to more than 202 km² in 2025. The relative Shannon entropy index ($G = 0.197$) indicated that urban development was predominantly characterized by a compact, infill growth pattern. During the same period, the mean Land Surface Temperature in August increased from 47.10°C to 49.28°C, while air quality indicators exhibited a consistent deteriorating trend. In addition, the Exceedance Factor increased from 8.06 in 2005 to 10.93 in 2025, indicating an increasing environmental health risk associated with population exposure to PM₁₀.

Conclusion: The results demonstrate that the compact physical expansion of Ahvaz has significantly intensified surface warming and degraded air quality.

Keywords: Ahvaz, Air quality, Environmental health, Land surface temperature (LST), PM₁₀, Shannon entropy model

Please cite this article as:

Rahmani D, Orak N, Varshosaz K, Karimi Organi F., Attarroshan S. Association Between Urban Physical Expansion, Air Quality Changes, and Land Surface Temperature in Ahvaz: Implications for Environmental Health (2005–2025). *Irtiqa Imini Pishgiri Masdumiyat*. 2025;13(2):59-73. <https://doi.org/10.22037/iipm.v13i2.52304>

* Corresponding Author: nedaorak@iau.ac.ir

بررسی ارتباط توسعه فیزیکی شهر اهواز با تغییرات کیفیت هوا و دمای سطح زمین: پیامدهایی

برای سلامت محیط (۲۰۲۵-۲۰۰۵)

داوود رحمانی^۱، ندا اورک^{۱*}، کتایون ورشوساز^۲، فاطمه کریمی اورگانی^۱، سینا عطارروشن^۱

۱. گروه محیط زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲. گروه مدیریت محیط زیست-HSE، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۸

چکیده

سابقه و هدف: رشد سریع شهرنشینی در کلان‌شهرهای مناطق خشک و نیمه‌خشک، پیامدهای گسترده‌ای بر شرایط اقلیمی، سلامت عمومی و مؤلفه‌های زیست‌محیطی برجای گذاشته است. هدف این پژوهش، بررسی ارتباط الگوی رشد فیزیکی شهر اهواز با مؤلفه‌های اقلیمی و زیست‌محیطی با تأکید بر کیفیت هوا، بر اساس مدل آنتروپی شانون در یک بستر زمانی بلندمدت است.

روش کار: این پژوهش توصیفی-تحلیلی با رویکرد کمی بود و در سال ۲۰۲۶ در محدوده شهری اهواز انجام شد. داده‌ها به روش‌های اسنادی و میدانی گردآوری شدند. تصاویر ماهواره‌ای Landsat طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵، شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال‌شده و دمای سطح زمین برای تحلیل به کار رفت. ضریب رشد فیزیکی شهر با مدل آنتروپی شانون محاسبه و ارتباط آن با دمای سطح زمین، AQI و PM₁₀ بررسی شد. سپس الگوی توسعه فشرده، توزیع فضایی آلاینده‌ها و پیامدهای بهداشتی ناشی از مواجهه جمعیت متراکم با ذرات معلق بر اساس شاخص تجاوز از استاندارد ارزیابی گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مساحت توسعه فیزیکی شهر اهواز از حدود ۱۷۴ کیلومترمربع به بیش از ۲۰۲ کیلومترمربع افزایش یافته است. مقدار شاخص آنتروپی نسبی ($G=0.197$) بیانگر الگوی غالب رشد فشرده و درون‌افزا در شهر اهواز است. همزمان، میانگین دمای سطح زمین در ماه اوت از ۴۷.۱ به ۴۹.۲۸ درجه سلسیوس افزایش یافته و شاخص‌های آلودگی هوا روندی صعودی نشان داده‌اند. نتایج شاخص تجاوز از استاندارد نشان داد ریسک بهداشتی ناشی از مواجهه با ذرات معلق در شهر اهواز در این بازه زمانی رشد داشته و از ۸.۰۶ در سال ۲۰۰۵ به ۱۰.۹۳ در سال ۲۰۲۵ رسیده است.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان داد که رشد فیزیکی فشرده شهر اهواز نقش مؤثری در تشدید گرمایش سطحی و افت کیفیت هوا داشته است.

واژگان کلیدی: PM₁₀/اهواز، بهداشت محیط، دمای سطح زمین (LST)، کیفیت هوا، مدل آنتروپی شانون

به این مقاله، به صورت زیر استناد کنید:

رحمانی د، اورک ن، ورشوساز ک، کریمی اورگانی ف، عطارروشن س. بررسی ارتباط توسعه فیزیکی شهر اهواز با تغییرات کیفیت هوا و دمای سطح زمین: پیامدهایی برای سلامت محیط (۲۰۲۵-۲۰۰۵). ارتقای ایمنی و پیشگیری از مصدومیت‌ها. ۱۴۰۴؛ ۱۳(۲): ۷۳-۵۹. <https://doi.org/10.22037/iipm.v13i2.52304>

*نویسنده مسئول مکاتبات: nedaorak@iau.ac.ir

مقدمه

افزایش جمعیت شهری از حدود یک میلیارد نفر در سال ۱۹۵۰ به بیش از ۷ میلیارد نفر در سال ۲۰۲۲ و پیش‌بینی رسیدن این رقم به بیش از ۹ میلیارد نفر تا سال ۲۰۵۰ (بر اساس پیش‌بینی سازمان ملل متحد) (۱) بیانگر تحول عمده جمعیتی و فضایی شهرهاست. رشد فیزیکی شهرها طی دهه‌های اخیر یکی از مهم‌ترین محرک‌های تغییرات محیط زیستی در مقیاس محلی و منطقه‌ای به شمار می‌رود (۲). چنین رشدی در قالب گسترش افقی و عمودی ساختمان‌ها، افزایش نفوذناپذیری سطح زمین و تغییر کاربری‌ها از اراضی طبیعی به مصارف مسکونی و صنعتی به وقوع پیوسته است (۳). رشد فیزیکی شهرها بر ویژگی‌هایی انرژی سطح زمین، چرخه‌های تبادل جرم و حرارت، و پویایی ترکیب شیمیایی جو شهری اثرگذار است (۴ و ۵). در محیط شهری، رشد فیزیکی بیانگر افزایش پیچیدگی فضایی و انسان‌محور در ساختار زمین است. توسعه ناموزون شهری، نقش مهمی در مؤلفه‌های اقلیمی، محیط زیستی و بهداشتی دارد (۶ و ۷). نتایج مطالعات مختلف نشان داده که توزیع دما و تراکم آلاینده‌ها در محیط شهری، تابعی از خصوصیات مؤلفه‌های مربوط به توسعه فیزیکی شهرها است (۸ و ۹).

هنگامی که با رشد فیزیکی شهر، درصد سطوح نفوذناپذیر افزایش می‌یابد، نرخ تابش در سطح زمین تغییر کرده و نسبت انرژی افزایش می‌یابد (۱۰). جزایر حرارتی شهری و کاهش همرفت طبیعی در لایه میکروسفر جو از جمله پیامدهای آن هستند (۱۱). در نتیجه رشد فیزیکی شهری، افزایش آلاینده‌های اتمسفری اصلی شامل SO_2 ، NO_2 و $PM_{2.5}$ در نواحی پایین جو محبوس شده و پدیده وارونگی دما گزارش شده است (۱۲). توسعه فیزیکی بی‌رویه، با تشدید پدیده جزیره حرارتی شهری، پیامدهای اپیدمیولوژیک و فیزیولوژیک را به همراه دارد. جایگزینی اراضی طبیعی با سطوح دارای آلودگی پایین و ظرفیت گرمایی بالا، منجر به افزایش تنش‌های حرارتی و اختلال در مکانیسم‌های تنظیم حرارت بدن در ساکنین بافت‌های متراکم می‌گردد. این فرآیندی که به‌طور مستقیم با افزایش نرخ مرگ و میر ناشی از نارسایی‌های قلبی-عروقی و حملات ایسکمیک در طول دوره‌های موج گرما مرتبط است (۱۳).

تغییرات ساختاری در هندسه شهری و ایجاد دره‌های خیابانی عمیق، با محدود کردن تهویه دینامیک و محبوس نمودن پیش‌سازهای

شیمیایی، پتانسیل مواجهه تنفسی با ذرات معلق اولترافاین و آلاینده‌های ثانویه مانند ازن تروپوسفری را افزایش می‌دهد (۱۴). مواجهه مزمن با این آلاینده‌ها، منجر به پدیده‌هایی مانند التهاب سیستمیک، افزایش ریسک ابتلا به بیماری‌های انسدادی مزمن ریه (COPD- Chronic Obstructive Pulmonary Disease) و اختلالات نوروتوکسیک می‌شود (۱۵).

شواهد تجربی در شهرهای مختلف جهانی همچون نیویورک (۱۶)، شانگهای (۱۷) و تهران (۱۸) نشان داده است که توسعه فیزیکی گسترده منجر به تشدید اثرات اقلیمی محلی و تغییرات شاخص‌های مهم مانند میانگین دمای روزانه و شبانه شده است. این الگو در برخی موارد معکوس بوده و مدیریت بهینه منجر به کاهش انتشار آلاینده‌ها، با وجود رشد توسعه فیزیکی در شهرهایی مانند لندن و پاریس شده است (۱۹). به‌طور کلی، در مدل‌سازی کیفیت هوا، سه رویکرد عمده قابل تفکیک است: مدل‌های شیمی-انتقال نظیر WRF-Chem و CMAQ که جریان دقیق آلاینده را در بعد مکان و زمان شبیه‌سازی می‌کنند (۲۰ و ۲۱). مدل‌های آماری-تجربی شامل رگرسیون‌های چندگانه و شبکه‌های عصبی که به‌طور داده‌محور روند تغییرات را استخراج می‌نمایند و مدل‌های مبتنی بر آنتروپی اطلاعات که به جای تمرکز بر روابط مستقیم، ناطمینانی در ساختار فضایی داده‌ها را اندازه‌گیری می‌کنند (۲۲). فناوری‌های سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) ابزارهای مطلوبی جهت ارزیابی و پایش تغییرات فیزیکی محیط شهری و ارتباط آن با شاخص‌های اقلیمی محسوب می‌شوند (۲۳ و ۲۴).

مدل آنتروپی شانون به عنوان ابزاری برای سنجش عدم قطعیت فضایی و میزان پراکندگی توسعه نسبت به سایر شاخص‌های تراکم، مورد استفاده قرار گرفته است (۲۲). شاخص آنتروپی شانون با برآورد الگوی توزیع غیرهمگن ساخت شهری، امکان بیان کمی از ناهماهنگی فضایی را فراهم می‌کند و از منظر نظری می‌توان آن را به عنوان معیاری از بی‌نظمی کالبدی در توسعه فیزیکی تفسیر کرد (۲۵).

شهر اهواز طی دو دهه اخیر یکی از بحرانی‌ترین شرایط زیست‌محیطی در ایران را تجربه کرده است و میانگین غلظت $PM_{2.5}$ بین ۵۸ تا ۷۷ $\mu g/m^3$ و افزایش LST بیش از ۳۱ درصد در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۲ (۲۶)، ضرورت ارزیابی همبستگی بین الگوی توسعه کالبدی و کیفیت هوا در این منطقه را نشان می‌دهد.

OLI) به روش کالیبراسیون بازتاب سطحی و محاسبه اختلاف باندهای قرمز و فروسرخ نزدیک به دست آمد. داده‌های کاربری اراضی از طریق تصاویر ماهواره‌ای در بازه‌های با فواصل زمانی ۳ ساله (۲۰۰۵، ۲۰۰۸، ۲۰۱۱، ۲۰۱۴، ۲۰۱۷، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۳) تهیه شد تا روند تحول کالبدی شهر و توزیع فضایی ساخت‌وسازها مشخص گردد.

تهیه نقشه‌های کاربری اراضی

به‌منظور تهیه و تحلیل نقشه‌های کاربری اراضی شهر اهواز، از داده‌های ماهواره‌ای Landsat برای سال‌های منتخب استفاده شد. تصاویر مورد استفاده شامل داده‌های Landsat 7 ETM+ مربوط به سال ۲۰۰۵ و Landsat 8 (OLI/TIRS) برای دوره زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ بود. کلیه مراحل پردازش و استخراج شاخص‌ها در محیط نرم‌افزار ENVI 5.6 و سامانه تحلیلی ArcGIS Pro 3.2 انجام شد. پیش‌پردازش تصاویر شامل مجموعه‌ای از اصلاحات استاندارد بود:

- تصحیح هندسی به‌منظور هم‌مکانی دقیق داده‌ها با مختصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
- تصحیح رادیومتری جهت تعدیل اثرات ناشی از تفاوت زاویه تابش و شرایط سنجنده
- تصحیح اتمسفری با استفاده از روش FLAASH برای حذف پراکندگی‌ها و جذب طیفی
- تلفیق لایه‌ها به‌منظور ترکیب باندهای طیفی مختلف؛
- موزائیک‌بندی تصاویر به‌منظور پوشش کامل محدوده شهری (۲۹).
- همچنین جهت رفع خطای نواربندی و نقص داده در تصاویر ماهواره لندست ۷۷ (مربوط به سال ۲۰۱۰)، از تکنیک پر کردن خلاء مبتنی بر روش میانگین‌گیری همسایگی استفاده گردید. برای کاهش خطاهای ناشی از شرایط جوی و افزایش دقت بازتاب سطحی، مقادیر Digital Number به بازتاب سطحی تبدیل شدند. برای استخراج نقشه‌های کاربری اراضی و تحلیل تغییرات کالبدی شهر، طبقه‌بندی تصاویر با سه الگوریتم مجزا انجام شد:
- حداکثر احتمال (Maximum Likelihood) به‌عنوان مدل پارامتریک پایه؛
- شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) جهت طبقه‌بندی غیرخطی با قابلیت یادگیری تدریجی؛
- حداقل فاصله (Minimum Distance) برای ارزیابی صحت تفکیک میان کلاس‌های هم‌پوشان.

مرور ادبیات نشان می‌دهد که بیشتر پژوهش‌ها بر منشأیابی گردوغبار و عوامل هواشناسی تمرکز داشته‌اند و نقش فرم کالبدی و دینامیک رشد شهری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. خلاء پژوهشی بارز در این زمینه، عدم وجود تحلیل‌های یکپارچه‌ای است که تغییرات بلندمدت هندسه فضایی شهر را با استفاده از مدل‌های آنتروپی اطلاعات، به‌صورت کمی با پتانسیل مواجهه بهداشتی پیوند دهد. توسعه فیزیکی شهر اهواز در بازه زمانی ۱۹۷۳ تا ۲۰۱۵، به‌صورت گسترش شهر در اطراف محورهای شهری پیش رفته است. در این دوره، کارخانجات و صنایع در تعیین جهت رشد شهری نقش به‌سزایی داشته‌اند. مساحت محدوده شهری در طی این دوره (۱۹۷۳-۲۰۱۵)، به میزان ۲۹۱٫۱ کیلومتر مربع افزایش داشته است (۲۷). تحقیق حاضر به بررسی ارتباط میان توسعه فیزیکی شهری و تغییرات کیفیت هوا در اهواز از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵ پرداخته است.

روش کار

پژوهش حاضر از نوع توصیفی-تحلیلی با رویکرد کمی است و در سال ۲۰۲۶ در محدوده شهری اهواز (۲۰°۳۱' تا ۲۹°۳۱' N و ۴۸°۳۷' تا ۴۸°۴۴' E) انجام شد. هدف اصلی، تحلیل رابطه بین الگوی رشد فیزیکی و کیفیت هوا بر اساس مدل آنتروپی و بررسی همبستگی آن با شاخص‌های اقلیمی و بررسی اثرات بهداشتی آن است. گردآوری داده‌ها به دو روش اسنادی و پردازش داده‌های ثانویه (سنجش از دور و آمار ایستگاهی) صورت گرفت. در روش اسنادی، مبانی نظری، مفاهیم پایه و مرور پیشینه پژوهش با بررسی مطالعات علمی داخلی و بین‌المللی مرتبط با مدل‌های آنتروپی، تحلیل پراکندگی شهری و دینامیک کیفیت هوا انجام شد. در بخش میدانی، داده‌های اولیه شامل تغییرات کاربری اراضی، شاخص کیفیت هوا (AQI) اطلاعات جمعیتی شهر اهواز و مؤلفه‌های اقلیمی (دما، بارش، رطوبت و منحنی اقلیمی آمبروترومیک) گردآوری گردید.

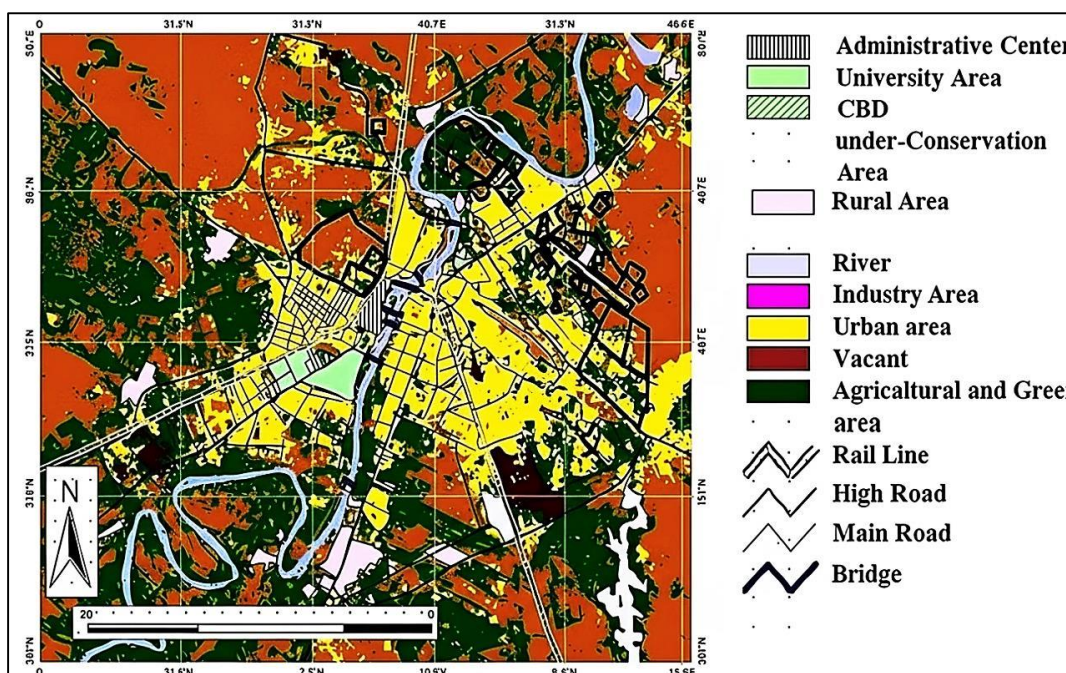
شاخص دمای سطح زمین (Land Surface Temperature - LST) نیز از طریق پردازش حرارتی تصاویر ماهواره‌ای Landsat (باند حرارتی TIRS) با استفاده از الگوریتم تبدیل تابش به دما و تصحیح اتمسفری امگا به‌دست آمد (۲۸).

تراکم پوشش گیاهی (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) از طریق پردازش تصاویر ماهواره‌ای Landsat (سری TM و

فیزیکی و همبستگی با شاخص‌های کیفیت هوا و دمای سطح زمین (LST) انجام شود.

نقشه کاربری اراضی محدوده شهر اهواز در سال ۲۰۲۴ در شکل ۱ ارائه شده است.

نتایج طبقه‌بندی پس از ارزیابی صحت (Overall Accuracy و Kappa Coefficient) به‌عنوان مبنای محاسبه تراکم کالبدی و شاخص‌های آنتروپی فضایی در مدل نهایی مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌های هر دوره زمانی به واحدهای جغرافیایی هم‌اندازه تفکیک شد تا تحلیل رشد



شکل ۱. نقشه کاربری اراضی محدوده شهر اهواز (منبع: تحقیق حاضر)

روش برآورد ضریب تراکم توسعه فیزیکی شهری

یکی از شاخص‌های کلیدی در تحلیل توسعه فیزیکی شهرها، ضریب تراکم و نحوه پراکندگی فضایی رشد شهری است. این ضریب ارتباط مستقیم با میزان تمرکز کالبدی و نحوه انبساط مرزهای شهری دارد و به‌منظور کمی‌سازی آن، از مدل اطلاعاتی آنتروپی استفاده می‌شود. بر اساس منطق آنتروپی شانون در تحلیل سیستم‌های فضایی، توسعه فیزیکی شهر حالتی بین دو قطب فشردگی کامل و پراکندگی کامل را دارد؛ در نتیجه، شاخص آنتروپی قادر است درجه نامنظمی یا پراکندگی توزیع توسعه کالبدی را اندازه‌گیری کند (۳۰).

در کاربرد فضایی مدل آنتروپی، ابتدا مناطق افزوده‌شده توسعه فیزیکی شهری در بازه زمانی مورد بررسی از طریق نقشه‌های کاربری اراضی استخراج می‌گردد. این نقشه‌ها با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای در محیط ArcGIS Pro و عملیات تفکیک لایه‌ای و تصحیح هندسی تهیه می‌شوند. سپس مساحت هر منطقه توسعه‌یافته محاسبه و نسبت هر مساحت منطقه به کل سطح توسعه‌یافته شهر به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود.

$$P_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن P_i نمایانگر احتمال یا نسبت وقوع توسعه در هر ناحیه و n تعداد کل مناطق توسعه است. پس از محاسبه این نسبت، مقدار آنتروپی مطلق به‌صورت رابطه ۲ به‌دست می‌آید.

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \times \ln(P_i) \quad \text{رابطه ۲}$$

این رابطه میزان عدم‌تمرکز را بر پایه توزیع مکانی توسعه فیزیکی بیان می‌کند. مقدار H همیشه بین صفر تا $\ln(n)$ قرار دارد؛ مقدار نزدیک به صفر نشان‌دهنده توسعه فشرده (Compact Urban Growth) و مقدار نزدیک به $\ln(n)$ نشانگر توسعه پراکنده (Dispersed Urban Growth) است. در مطالعات مقایسه‌ای، مقدار H به‌تنهایی برای تحلیل تطبیقی کافی نیست، زیرا تابعی از تعداد مناطق n است و بنابراین با تغییر تعداد مناطق مقایسه‌پذیری دچار خطا می‌شود. برای رفع این مشکل،

از استاندارد، غلظت میانگین سالانه PM_{10} بر حد رهنمودی جدید سازمان جهانی بهداشت ($\mu g/m^3$ ۱۵) تقسیم شد و ریسک مواجهه مشخص گردید.

برای بررسی ارتباط آماری بین ضریب تراکم توسعه (G) و شاخص‌های اقلیمی و زیست‌محیطی، از نرم‌افزار SPSS26 استفاده شد. ابتدا نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون شاپیرو-ویلک تأیید گردید ($p>0.05$) و سپس از آزمون همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی ساده برای مدل‌سازی روابط و تعیین ضریب تعیین در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد استفاده شد.

پس از محاسبه میزان گسترش مناطق شهری و ضریب تراکم توسعه بر پایه مدل آنتروپی، ارتباط میان این شاخص‌ها و تغییرات میانگین آلاینده‌های هوا در محدوده‌های شهری بررسی شد. برای سنجش این رابطه از تحلیل‌های آماری مبتنی بر همبستگی و رگرسیون استفاده گردید. همچنین تغییرات جمعیت با میزان گسترش فیزیکی و تراکم شهر مقایسه شد. سپس رابطه شاخص‌های توسعه شهری با دمای سطح زمین و شاخص کلی کیفیت هوا نیز به صورت آماری بررسی شد تا میزان تأثیر افزایش پراکندگی فضایی و تراکم ساختمانی بر گرمایش شهری و کاهش کیفیت هوا مشخص گردد.

ارزیابی مخاطرات بهداشتی و پتانسیل مواجهه (فاکتور تجاوز از استاندارد)

با توجه به اثرات و پیامدهای بهداشتی ناشی از تغییر کیفیت هوا، متاثر از توسعه فیزیکی شهری در شهر اهواز، از شاخص فاکتور تجاوز از استاندارد (Exceedance Factor - EF) استفاده شد. در این شاخص، غلظت آلاینده‌های پایش‌شده و افزایش آن‌ها نسبت به حدود مجاز تعیین‌شده از طریق رابطه ۶ محاسبه می‌گردد.

$$EF = \frac{C_{obs}}{C_{who}} \quad \text{رابطه ۶}$$

در این رابطه، C_{obs} میانگین غلظت سالانه مشاهده‌شده ذرات معلق (PM_{10}) و C_{who} حد مجاز سالانه توصیه شده توسط سازمان جهانی بهداشت (معادل ۱۵ میکروگرم بر مترمکعب) است. مقادیر EF بیشتر از ۱ نشان‌دهنده شرایط نایمن بهداشتی است. در این پژوهش، از ترکیب مقادیر EF با داده‌های رشد جمعیتی مناطق متراکم، به منظور تحلیل پتانسیل مواجهه جمعیتی در برابر تنش‌های حرارتی و تنفسی استفاده گردید.

از شاخص آنتروپی نسبی (Normalized Entropy, G) استفاده می‌شود که رابطه آن به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود.

$$G = \frac{H}{\ln k} \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه، k برابر با تعداد کل واحدهای فضایی یا کلاس‌های کاربری است. شاخص G در دامنه عددی صفر تا یک قرار دارد، که در آن:

- $G \rightarrow 0$: بیانگر توسعه فیزیکی بسیار متمرکز (High-Density/Compact)،
- $G \rightarrow 1$: بیانگر توسعه فیزیکی گسترده و پراکنده (Low-Density/Sprawled)

ارزش مقدار آنتروپی شانون (H) از صفر تا $\ln(n)$ است که در آن مقدار صفر بیانگر توسعه فیزیکی خیلی متراکم (فشرده) است؛ در حالی که مقدار ۱ بیانگر توسعه فیزیکی کم تراکم می‌باشد (۳۰).

محاسبه شاخص LST

برای محاسبه شاخص LST، ارزش‌های رقومی تصاویر حرارتی (TIRS) به رادیانس طیفی مطابق رابطه ۴ تبدیل شد.

$$L_\lambda = gain \times DN + offset \quad \text{رابطه ۴}$$

که در این رابطه gain و offset از فراداده در دسترس هستند و DN ارزش رقومی هر پیکسل است. سپس مقادیر محاسبه‌شده با بهره‌گیری از رابطه ۵، به دمای روشنایی تبدیل شد.

$$TB = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad \text{رابطه ۵}$$

که در این رابطه، TB دمای درخشندگی به کلوین، K_1 و K_2 ، مقادیر ثابت کالیبراسیون هستند که از فراداده در دسترس هستند (۳۱).

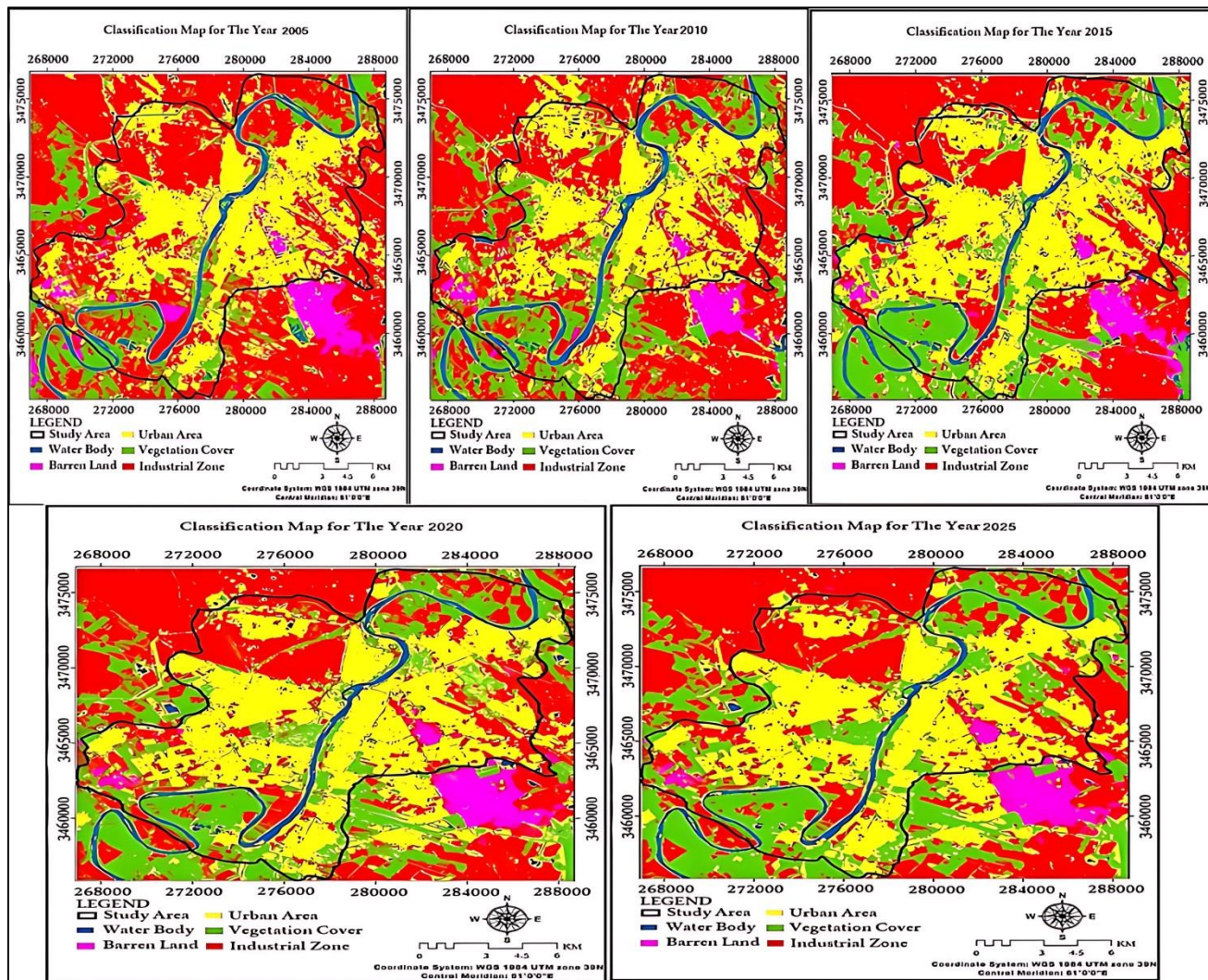
بررسی ارتباط ضریب رشد شهری با آلودگی هوا، مؤلفه جمعیت و مؤلفه‌های اقلیمی

برای تهیه نقشه‌های کاربری اراضی و استخراج LST، از ۵ صحنه تصویر ماهواره‌ای لندست مربوط به ماه اوت (گرم‌ترین ماه سال با حداقل پوشش ابر، کمتر از ۵ درصد) استفاده شد. پردازش‌ها در نرم‌افزارهای ENVI 5.6 و ArcGIS Pro 3.2 انجام گرفت. در محاسبه شاخص تجاوز

یافته‌ها

شاخص‌های دقت کلی و ضریب کاپای کلی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که روش حداکثر احتمال، بهترین نتایج را در تفکیک‌پذیری داده‌ها داشته است. نتایج حاصل از تعیین دقت کلی و ضریب کاپای نقشه کاربری اراضی حاصل از الگوریتم‌های مختلف در شهر اهواز در جدول ۱ ارائه شده است.

تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵ در شهر اهواز در شکل ۱ ارائه شده است. طبقه‌بندی داده‌ها با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، حداکثر احتمال و حداقل فاصله صورت گرفت.



شکل ۲. تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵ در شهر اهواز

جدول ۱. دقت کلی و ضریب کاپای نقشه کاربری اراضی حاصل از الگوریتم‌های مختلف در شهر اهواز

روش طبقه‌بندی	۲۰۰۵		۲۰۱۰		۲۰۱۵		۲۰۲۰		۲۰۲۵	
	دقت کلی	ضریب کاپای کلی	دقت کلی	ضریب کاپای کلی	دقت کلی	ضریب کاپای کلی	دقت کلی	ضریب کاپای کلی	دقت کلی	ضریب کاپای کلی
شبکه عصبی	۸۶/۴۱	۰/۸۳	۸۱/۴۵	۰/۸۳	۸۹/۳۲	۰/۸۲	۸۷/۷۵	۰/۸۷	۹۰/۱۴	۰/۸۸
حداکثر احتمال	۹۱/۹۰	۰/۸۲	۹۱/۱۹	۰/۸۶	۸۹/۴۷	۰/۸۲	۹۴/۱۱	۰/۹۱	۹۲/۵۶	۰/۹۰
حداقل فاصله	۷۹/۳۲	۰/۷۱	۶۷/۲۱	۰/۵۲	۵۹/۱۵	۰/۵۱	۸۴/۱۸	۰/۸۳	۸۰/۳۵	۰/۷۶

جدول ۲. مقایسه مساحت کاربری اراضی در محدوده شهر اهواز در بازه ۲۰۲۵-۲۰۰۵

بازه زمانی	(km ²)	(km ²)	(km ²)	(km ²)	پهنه آبی اراضی بایر مناطق صنعتی پوشش گیاهی اراضی شهری
۲۰۰۵	۰/۶۷	۳۹/۸۸	۴۴/۶۲	۵/۷	۱۲۹/۱۳
۲۰۱۰	۰/۶۷	۲۱/۱۳	۵۰/۴۸	۱۱/۶	۱۳۶/۱۲
۲۰۱۵	۰/۶۷	۱۳/۲۰	۵۲/۷۵	۱۱/۵	۱۴۱/۸۸
۲۰۲۰	۰/۶۷	۱۳/۱۰	۵۲/۱۸	۱۱/۴	۱۴۲/۶۵
۲۰۲۵	۰/۶۷	۵/۵۲	۵۳/۱۰	۱۱/۶	۱۴۹/۱۱

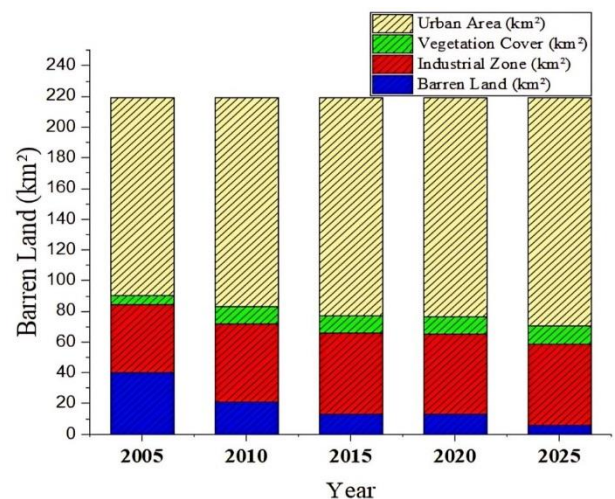
نتایج حاصل از تحلیل تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵ در جدول ۲ نشان می‌دهد که روند توسعه فیزیکی شهر اهواز (مجموع مناطق شهری و صنعتی) دارای افزایشی مداوم بوده است. مساحت توسعه از حدود ۱۷۴ کیلومتر مربع در سال ۲۰۰۵ به بیش از ۲۰۲ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۵ رسیده است (۱۶ درصد رشد در دو دهه). گسترش محدوده‌های شهری عامل غالب در این افزایش بود. سهم منطقه شهری از حدود ۱۲۹ کیلومتر مربع در سال ۲۰۰۵ به حدود ۱۴۹ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۵ رسیده، در حالی که سطح مناطق صنعتی نیز با نوسانات محدود از ۴۵ کیلومتر مربع به بیش از ۵۳ کیلومتر مربع افزایش یافته است. این روند بیانگر رشد فزاینده کالبد شهر در پاسخ به افزایش جمعیت و گسترش فعالیت‌های اقتصادی است و از سوی دیگر، مهاجرت کاربری‌ها از اراضی بایر به اراضی توسعه‌یافته را تأیید می‌کند.

تغییرات کلاس‌های غیر توسعه‌ای حاکی از کاهش تدریجی اراضی بایر و تثبیت پوشش گیاهی و سطح آب‌ها است. مساحت اراضی بایر از حدود ۴۰ کیلومتر مربع در سال ۲۰۰۵ به ۵/۵ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۵ کاهش یافته است. این داده‌ها نشان‌دهنده تبدیل بخشی از این اراضی به نواحی شهری یا صنعتی در طی مراحل گسترش پیرامون بخش مرکزی شهر در این بازه زمانی بوده است. مساحت پوشش گیاهی در محدوده شهری ثابت، نوسان داشته (حدود ۵-۱۲ کیلومتر مربع)، که احتمالاً از تثبیت مناطق سبز در بخش‌های غربی و جنوبی شهر نشأت گرفته است. الگوهای فضایی مورد بررسی در پژوهش حاضر نشان داد که روند تغییرات مساحت کاربری اراضی طی دو دهه اخیر، عمدتاً با افزایش تمرکز کالبدی و گسترش شهر اهواز بوده است، به گونه‌ای که توسعه کالبدی عمدتاً با مصرف مستقیم اراضی بایر همراه بوده و سهم قابل توجهی از کاربری‌های غیرشهری به تدریج جذب مناطق توسعه‌یافته شده‌اند.

نتایج نشان داد که روش حداکثر احتمال با دقت کلی ۹۴،۱۱ درصد و ضریب کاپای ۰،۹۱ در سال ۲۰۲۰، بهترین عملکرد را داشت. ضریب کاپا برابر با ۰،۸۷ بود که نشان‌دهنده همبستگی قوی بین نتایج طبقه‌بندی و داده‌های مرجع زمینی است. بنابراین تفکیک مناطق شهری، پوشش گیاهی و مناطق صنعتی در این سال با دقت بسیار بالا صورت گرفته است. روش شبکه عصبی مصنوعی نیز در اغلب دوره‌ها سال‌ها عملکرد مطلوب و نسبتاً پایدار با دقت کلی بین ۸۱ تا ۹۰ درصد و ضریب کاپای حدود ۰،۸۳ تا ۰،۸۸ ارائه داد.

روش حداقل فاصله ضعیف‌ترین عملکرد را داشته و دقت کلی آن از ۷۹،۳۲ درصد در سال ۲۰۰۵ تا ۵۹،۱۵ درصد در سال ۲۰۱۵ کاهش یافته است. در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۵ مقدار شاخص ۸۴،۱۸ و ۸۰،۳۵ درصد بوده است. بر اساس این نتایج، با فرض ساده‌سازی فضای طبقه‌ها بر اساس فاصله هندسی میان پیکسل‌ها در این روش، قادر به مدل‌سازی تنوع بین‌کلاسی پیچیده داده‌های سنجش‌ازدور منطقه مطالعه نبوده است.

روش حداکثر احتمال با میانگین دقت کلی حدود ۹۱ درصد و میانگین ضریب کاپای ۰،۸۶، بهترین نتایج را در تفکیک کلاس‌های کاربری/پوشش اراضی ارائه کرده است. با توجه به پایداری عملکرد، همبستگی بالای کاپا، و قابلیت سازگاری با توزیع آماری باندهای طیفی، روش حداکثر احتمال به عنوان الگوریتم پایه جهت تولید نقشه‌های نهایی توسعه فیزیکی شهر اهواز مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه مساحت کاربری اراضی در محدوده شهر اهواز در بازه ۲۰۲۵-۲۰۰۵ در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. مقایسه مساحت کاربری اراضی در محدوده شهر اهواز در بازه ۲۰۲۵-۲۰۰۵

نتایج محاسبه شاخص آنتروپی

به منظور ارزیابی میزان فشردگی و پراکندگی توسعه کالبدی شهر اهواز در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵، از مدل اطلاعاتی آنتروپی شانون استفاده شد. برای محاسبه شاخص، مناطق توسعه یافته در مقاطع زمانی تعیین شده از نقشه‌های کاربری اراضی استخراج و مجموع مساحت اراضی شهری و صنعتی (به عنوان نواحی توسعه یافته) محاسبه گردید. سپس نسبت هر سال از این مساحت‌ها به کل سطح توسعه شده، لگاریتم طبیعی آن و حاصل ضرب آن‌ها تعیین شد تا شاخص آنتروپی مطلق بر اساس رابطه ۲ محاسبه گردد. با توجه به اینکه تعداد دوره‌های زمانی مورد بررسی پنج دوره بود، شاخص آنتروپی مطلق به شاخص آنتروپی نسبی (G) نرمال‌سازی شد. در جدول ۳، نتایج محاسبه مؤلفه‌های اصلی برای محاسبه شاخص آنتروپی شامل مساحت توسعه و درصد افزایش مساحت توسعه، برای هر بازه زمانی نشان را ارائه شده است.

جدول ۳. مؤلفه‌های محاسبه تراکم توسعه شهری در شهر اهواز

بازه زمانی	مساحت توسعه	مساحت افزوده شده (%)	Pi	Ln Pi	Pi * Ln(Pi)
۲۰۰۵	۱۷۳/۷۵	۰	۰/۱۷۴	-۱/۷۴	-۰/۲۱
۲۰۱۰	۱۸۶/۶۰	۱۲/۸۵	۰/۱۸۷	-۱/۶۷	-۰/۱۹
۲۰۱۵	۱۹۴/۶۳	۸/۰۳	۰/۱۹۵	-۱/۰۴	-۰/۰۵
۲۰۲۰	۱۹۴/۸۳	۰/۲۰	۰/۱۹۶	-۰/۱۵	-۰/۱۵
۲۰۲۵	۲۰۲/۲۱	۷/۳۸	۰/۲۰۳	-۰/۷۴	-۰/۱۱

$$H = -\sum(Pi \times \ln Pi) = 0.317; G = H / \ln(k) = 0.317 / \ln(5) = 0.197$$

روند تغییرات مساحت توسعه شهر اهواز در شاخص آنتروپی نشان می‌دهد که مساحت توسعه فیزیکی اهواز طی دو دهه اخیر، از حدود ۱۷۳،۷۵ کیلومتر مربع در سال ۲۰۰۵ به ۲۰۲،۲۱ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۵ افزایش یافته است. بیشترین رشد توسعه بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ به میزان ۱۲،۸۵ درصد بوده است. بررسی مقادیر Pi و $\ln Pi$ در جدول ۳ نشان می‌دهد که سهم هر بازه زمانی از توزیع کلی توسعه نسبتاً متوازن بوده و تفاوت معنی‌داری بین دوره‌ها مشاهده نمی‌شود. نزدیک بودن مقادیر Pi (بین ۰،۱۷ تا ۰،۲) نشانه‌ای از رشد تدریجی و پیوسته در طول زمان در شهر اهواز در این بازه زمانی است. مقادیر حاصل ضرب $Pi \times \ln(Pi)$ نیز نشان می‌دهد که بیشترین عدم نظم فضایی مربوط به سال‌های میانی (۲۰۱۵) بوده که در آن الگوی

توسعه با تغییرات پراکنده‌تری رخ داده، اما در دوره‌های پایانی (۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵) مجدداً روندی متراکم‌تر در توسعه رخ داده است. مقدار آنتروپی مطلق ۰،۳۱۷، بیانگر ساختار فضایی توسعه در حد میانی تراکم و نسبتاً پراکنده در شهر اهواز بود. لذا الگوی کلی رشد شهری در اهواز در گروه رشد فشرده طبقه‌بندی می‌گردد. مقدار آنتروپی نسبی ۰،۱۹۷، $G=0$ بوده است. مقادیر کمتر از ۰،۳ به توسعه فشرده، بین ۰،۳ تا ۰،۵ به توسعه نیمه‌پراکنده و بالای ۰،۵ به توسعه پراکنده اشاره دارند. در مجموع، شاخص‌های محاسبه شده بیانگر آن می‌باشند که در بازه مورد مطالعه، توسعه فیزیکی شهر اهواز عمدتاً در محدوده‌های موجود شهری و پیرامونی متصل به آن متمرکز بوده است. در دهه نخست (۲۰۰۵-۲۰۱۵) شهر بر پایه گسترش درونی و پر کردن فضاهای خالی رشد کرده و در دهه بعد (۲۰۱۵-۲۰۲۵) به سمت تثبیت ساختار کالبدی با افزایش تراکم در محورهای موجود حرکت کرده است. این الگو با ویژگی‌های رشد درون‌افزای شهری مطابقت دارد و نشان می‌دهد که توسعه اهواز بیش از آنکه به پراکنش افقی منجر شود، بر بهبود و افزایش بهره‌وری فضایی در محدوده‌های تثبیت شده شهری متمرکز بوده است.

نتایج محاسبه شاخص LST

در این پژوهش، با هدف بررسی اثرات تغییرات کالبدی و توسعه فیزیکی شهر اهواز بر رفتار حرارتی سطح زمین، شاخص دمای سطح زمین در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵ محاسبه گردید. از داده‌های حرارتی ماهواره‌های Landsat 5 TM (برای سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۱۰)، Landsat 8 TIRS (برای سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰) و Landsat 9 TIRS-2 (برای سال ۲۰۲۵) استفاده شد. پس از اعمال تصحیحات رادیومتریک، مقادیر عددی (DN) به رادیانس طیفی ($L\lambda$) و سپس به دمای روشنایی (TB) و نهایتاً به LST تصحیح شده بر حسب درجه سلسیوس تبدیل گردید.

برای اطمینان از اعتبار مقایسه دمایی میان دوره‌های مختلف داده‌ها به لحاظ رادیومتریک، از ضرایب کالیبراسیون حرارتی اختصاصی هر سنجنده (K_1 و K_2) استفاده شد. محاسبه شاخص LST برای آنالیز ارتباط آن با توسعه فیزیکی شهر اهواز در تحقیق صورت گرفته است. مقادیر دمای سطح زمین (LST) استخراج شده اهواز در ماه اوت (۲۰۰۵-۲۰۲۵) بر اساس باندهای حرارتی Landsat TM-TIRS در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. دمای سطح زمین (LST) استخراج شده شهر اهواز در ماه اوت (۲۰۲۵-۲۰۲۵) بر اساس باند های حرارتی سنجنده های TM و TIRS ماهواره لندست

بازه زمانی	سنسور ماهواره	باند حرارتی (TIR)	K_1 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)	K_2 (K)	میانگین DN	رادینانس طیفی (L_n) ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)	دمای روشنایی (TB, K)	LST تصحیح شده (°C)
۲۰۰۵	Landsat 5 TM	Band 6 (10.4–12.5 μm)	۶۰۷/۷۶	۱۲۶۰/۵۶	۱۳۸	۸/۷۰	۳۲۰/۳	۴۷/۱
۲۰۱۰	Landsat 5 TM	Band 6	۶۰۷/۷۶	۱۲۶۰/۵۶	۱۴۲	۹/۰۲	۳۲۱/۱	۴۸/۸۶
۲۰۱۵	Landsat 8 TIRS	Band 10 (10.9 μm)	۷۷۴/۸۹	۱۳۲۱/۰۸	۱۴۸	۹/۷۱	۳۲۲/۰	۴۸/۳۵
۲۰۲۰	Landsat 8 TIRS	Band 10	۷۷۴/۸۹	۱۳۲۱/۰۸	۱۵۴	۱۰/۲۲	۳۲۲/۸	۴۸/۸۵
۲۰۲۵	Landsat 9 TIRS	Band 10	۷۷۴/۸۹	۱۳۲۱/۰۸	۱۵۹	۱۰/۶۵	۳۲۳/۵	۴۹/۲۰

جدول ۴ نتایج نهایی محاسبه دمای سطح زمین را نشان می دهد. این نتایج روند افزایشی در مقدار LST را نشان داد، به طوری که مقدار شاخص از ۴۷،۱ درجه سلسیوس در سال ۲۰۰۵ به ۴۹،۲ درجه سلسیوس در سال ۲۰۲۵ رسیده است. تغییرات تدریجی در رادینانس طیفی از ۸،۷ تا ۱۰،۶۵ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ همراه با افزایش دمای روشنایی از ۳۲۰ تا ۳۲۳ کلوین نشان می دهد که تابش حرارتی سطح زمین در گذر زمان افزایش یافته است. این پدیده نشان دهنده تبدیل انرژی خورشیدی ذخیره شده در سطوح مصنوعی به تابش حرارتی در محدوده مادون قرمز حرارتی است. با در نظر گرفتن الگوی توسعه فشرده شهر که توسط شاخص آنتروپی رشد ($G=0,197$) محاسبه شد، می توان نتیجه گرفت که دمای سطح زمین به دلیل تراکم بالای توسعه در مناطق مرکزی افزایش یافته است. دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ بیشترین نرخ افزایش شاخص LST را نشان می دهد.

نتایج بررسی ارتباط توسعه فیزیکی و مؤلفه های اقلیمی

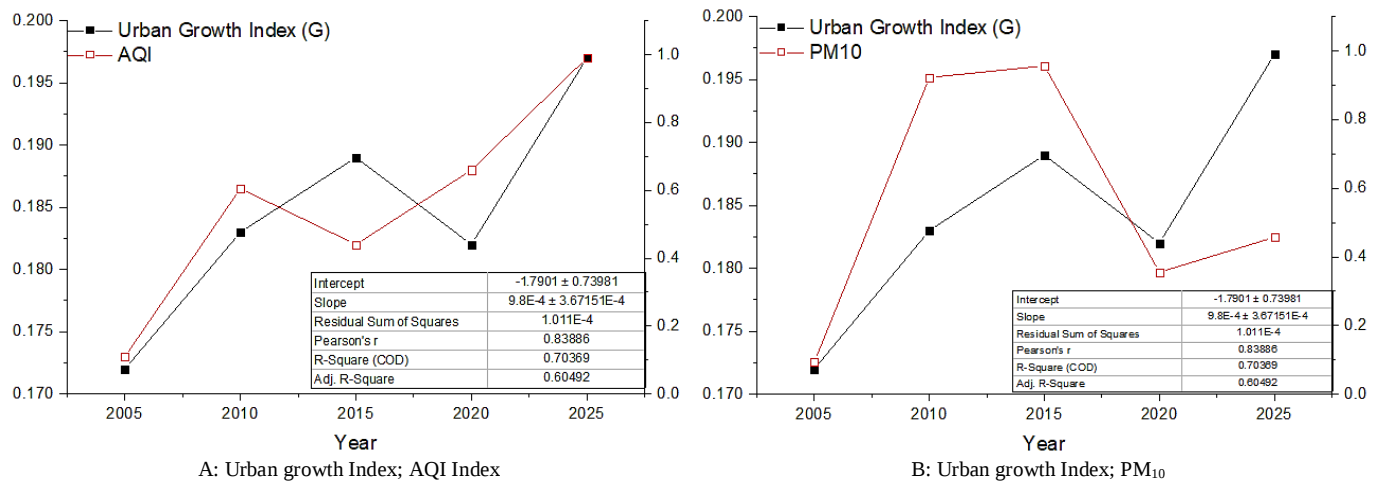
به منظور تبیین پیامدهای اقلیمی و زیست محیطی توسعه فیزیکی شهر اهواز، ارتباط میان شاخص رشد فیزیکی شهری (Urban Growth Index, G) با متغیرهای جمعیتی، دمای سطح زمین (LST) و شاخص های کیفیت هوا (PM_{10} و AQI) در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج محاسبه شاخص های اقلیمی، محیط زیستی و ضریب توسعه شهری در شهر اهواز در بازه زمانی ۲۰۰۵-

۲۰۲۵ در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج جدول ۵ نشان می دهد با افزایش جمعیت شهر از حدود ۹۷۳ هزار نفر در سال ۲۰۰۵ به بیش از ۱،۴ میلیون نفر در سال ۲۰۲۵، مقدار شاخص G نیز از ۰،۱۷۲ به ۰،۱۹۷ افزایش یافته است. افزایش تدریجی مقدار میانگین دمای سطح زمین در ماه اوت (از ۴۷،۱ درجه سلسیوس به ۴۹،۲۸ درجه سلسیوس) و نوسانات صعودی شاخص های آلودگی هوا (PM_{10} و AQI) همزمان با رشد فیزیکی شهر، بیانگر وجود نوعی همبستگی میان توسعه کالبدی، گرمایش سطحی و افت کیفیت هوا است. بررسی فاکتور تجاوز از استاندارد (EF) برای ذرات معلق نشان داد که کیفیت هوا در تمامی دوره ها در وضعیت بحرانی و ناایمن بهداشتی (مقدار شاخص بیشتر از ۱) قرار داشته است. این شاخص از ۸،۰۶ در سال ۲۰۰۵ به ۱۴،۸۶ در سال ۲۰۱۵ رسیده و در سال ۲۰۲۵ نیز ۱۰،۹۳ بود.

قرارگیری مداوم این شاخص در سطوح بسیار بالا در محدوده های متراکم شهری، بیانگر افزایش پتانسیل مواجهه جمعیتی و تشدید پیامدهای اپیدمیولوژیک و تنفسی ناشی از آلودگی است. هر چند این پدیده در شهر اهواز عمدتاً مربوط به شرایط اقلیمی و خشکسالی بوده است، اما تراکم توسعه و تغییر کاربری، بر شدت آن افزوده است. از آنالیز رگرسیون خطی چندگانه برای بررسی سطح این همبستگی استفاده شد که نتایج آن در شکل ۴ ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج محاسبه شاخص های اقلیمی، محیط زیستی و ضریب توسعه شهری در شهر اهواز در بازه زمانی ۲۰۲۵-۲۰۰۵

بازه زمانی	جمعیت (نفر)	شاخص رشد فیزیکی شهری (G)	میانگین LST (°C, Aug)	PM_{10} ($\mu g/m^3$, annual avg)	شاخص AQI (میانگین سالانه)	ضریب توسعه شهری (درصد در دوره)	EF (PM_{10})
۲۰۰۵	۹۷۳۴۵۶	۰/۱۷۲	۴۷/۱	۱۲۱	۹۲	-	۸/۰۶
۲۰۱۰	۱۱۹۴۵۱۱	۰/۱۸۳	۴۸/۸۶	۲۱۹	۱۰۱	۲۱/۳	۱۴/۶۰
۲۰۱۵	۱۳۰۲۵۹۱	۰/۱۸۹	۴۸/۳۵	۲۲۳	۹۸	۹	۱۴/۸۶
۲۰۲۰	۱۳۵۴۷۹۷	۰/۱۸۲	۴۸/۸۶	۱۵۲	۱۰۲	۱/۴	۱۰/۱۳
۲۰۲۵	۱۴۱۹۷۶۹	۰/۱۹۷	۴۹/۲۸	۱۶۴	۱۰۸	۴/۸	۱۰/۹۳



شکل ۴. نتایج آنالیز رگرسیونی ارتباط بین شاخص‌های توسعه فیزیکی شهری با شاخص AQI و PM₁₀

بحث

یافته‌های این پژوهش نشان داد که توسعه فیزیکی شهر اهواز در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵، پرتراکم بوده است. هرچند سرعت توسعه فیزیکی شهر اهواز در این بازه زمانی، نسبت به بسیاری از کلان شهرهای ایران کمتر بوده است، اما توسعه صنعتی و نفتی، نقش مؤثری در تغییر اقلیم و کیفیت هوا داشته است. در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵، مساحت توسعه فیزیکی شهر اهواز (مجموع مناطق شهری و صنعتی) از ۱۷۳،۷۵ کیلومتر مربع به ۲۰۲،۲۱ کیلومتر مربع افزایش یافته است که نشان‌دهنده خالص حدود ۱۶،۴ درصد طی دو دهه است. این افزایش کالبدی همزمان با تشدید شاخص‌های زیست‌محیطی رخ داده است؛ به‌طوری‌که میانگین دمای سطح زمین (LST) در ماه اوت از ۴۷،۱ درجه سلسیوس به ۴۹،۲۸ درجه سلسیوس رسیده که معادل افزایش حدود (۲،۱۸) درجه سلسیوس و افزایش نسبی ۴،۶ درصد است. در همین بازه، شاخص کیفیت هوا (AQI) از ۹۲ به ۱۰۸ افزایش یافته و نشان‌دهنده افت کیفیت هوا به میزان حدود ۱۷،۴ درصد است. همچنین، میانگین سالانه غلظت PM₁₀ از ۱۲۱ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ به ۱۶۴ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ رسیده که معادل افزایش حدود ۳۵،۵ درصد می‌باشد. همزمانی رشد فیزیکی نسبتاً محدود (۱۶ درصد) با افزایش شدیدتر آلاینده‌ها و LST نشان می‌دهد که در اهواز، حتی رشد فشرده شهری (G=۰،۱۹۷) نیز به دلیل شرایط اقلیمی گرم و خشک، اثرات تقویتی بر گرمایش سطحی و تجمع آلاینده‌ها داشته است.

مقایسه این نتایج با مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهد که شدت پاسخ اقلیمی و کیفیت هوا در اهواز بالاتر از بسیاری از شهرهای دیگر است.

شکل ۴-A که نتایج تحلیل رگرسیونی بین شاخص رشد فیزیکی شهری (G) و شاخص کلی کیفیت هوا (AQI) را نشان می‌دهد، رابطه‌ای مثبت و معنی‌دار را بین این مؤلفه‌ها نشان می‌دهد. با افزایش مقدار G از ۰،۱۷۲ در سال ۲۰۰۵ به ۰،۱۹۷ در سال ۲۰۲۵، مقدار AQI نیز از ۹۲ به ۱۰۸ افزایش یافته است. ضریب همبستگی پیرسون ($r=0.838$) و مقدار ضریب تعیین ($R^2=0.704$) بیانگر آن است که بیش از ۷۰ درصد تغییرات AQI قابل تبیین توسط تغییرات شاخص رشد فیزیکی شهری است. این نتیجه نشان می‌دهد که افزایش تراکم و تمرکز کالبدی شهر، هم‌زمان با کاهش نفوذپذیری سطوح و تشدید فعالیت‌های شهری، با افت کیفیت هوا همراه بوده است.

در شکل ۴-B، رابطه بین شاخص رشد فیزیکی شهری (G) و غلظت ذرات معلق PM₁₀ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه نوسانات PM₁₀ در دوره‌های مختلف تحت تأثیر عوامل اقلیمی و منطقه‌ای (مانند طوفان‌های گردوغبار) قرار داشته، اما روند کلی افزایش PM₁₀ با افزایش مقدار G هم‌راستا بوده است. بیشترین مقدار PM₁₀ در سال ۲۰۱۵ (حدود ۲۲۳ $\mu\text{g}/\text{m}^3$) هم‌زمان با افزایش شاخص G به ۰،۱۸۹ مشاهده شده است. ضریب همبستگی مثبت به دست آمده ($r \approx 0.83$) و مقدار R^2 نزدیک به ۰،۷۰ نشان می‌دهد که ارتباط آماری معنی‌داری میان توسعه فیزیکی شهر و افزایش بار ذرات معلق وجود دارد. این امر حاکی از آن است که توسعه متراکم شهری، شرایط مساعدتری برای تجمع آلاینده‌های معلق در لایه‌های نزدیک به سطح زمین فراهم کرده است.

در بسیاری از مطالعات، توسعه فشرده به عنوان الگویی نسبتاً پایدار از منظر مصرف زمین معرفی می‌شود (۴ و ۳۳)، اما یافته‌های حاضر نشان می‌دهد که در اهواز، فشردگی کالبدی بدون مداخلات اقلیم‌محور، به تشدید گرمایش سطحی منجر شده است.

افزایش LST در تحقیق حاضر در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵ را می‌توان به افزایش پیوسته سطوح نفوذناپذیر، ذخیره حرارتی بالا در مصالح ساختمانی و کاهش تبخیر-تعرق نسبت داد. در مطالعات ایمهوف و همکاران (۱۶) و گو و همکاران (۱۱) به عنوان مکانیسم اصلی تقویت جزیره حرارتی شهری معرفی شده است. چن و همکاران (۱۰) نیز نشان داده‌اند که حتی سطوح نفوذناپذیر می‌توانند تبخیر محدودی داشته باشند، اما این مقدار در مقایسه با پوشش گیاهی، در کاهش شار حرارتی ناچیز است. یافته‌های سان و همکاران (۳۴) نشان می‌دهند تفاوت LST بین کلاس‌های کاربری، در شهرهای متراکم، به‌طور معنی‌داری بیشتر از شهرهای با توسعه پراکنده است.

بررسی روند تغییرات مساحت کاربری‌ها نشان داد که سطح پوشش گیاهی شهری (با مساحت متغیر بین ۵ تا ۱۱ کیلومترمربع) متناسب با رشد کالبدی و جمعیتی توسعه نیافته است. شاخص NDVI نقش مهمی در تعدیل دمای سطح زمین از طریق فرآیند تبخیر-تعرق و ایجاد سایه‌اندازی دارد. در شهر اهواز، کمبود و پراکندگی نامناسب فضاهای سبز باعث شده تا ظرفیت طبیعی محیط برای مقابله با جزایر حرارتی به حداقل برسد. در نتیجه، سطوح ساخته‌شده با جذب بالای تشعشعات خورشیدی، مستقیماً به افزایش LST منجر شده است.

ارتباط قوی و معنادار بین شاخص رشد فیزیکی شهری و شاخص‌های کیفیت هوا نشان داد که بخش عمده‌ای از تغییرات آلودگی هوا در اهواز قابل تبیین توسط ساختار فضایی توسعه شهری است. در مقایسه با شهرهای اروپایی مانند پاریس و لندن که فونت و همکاران (۱۹) کاهش تدریجی آلودگی هوا را گزارش کرده‌اند، روند صعودی AQI در اهواز نشان می‌دهد که رشد فیزیکی فشرده، در غیاب سیاست‌های کنترلی و زیرساخت سبز، می‌تواند اثر معکوس بر کیفیت هوا داشته باشد. نتایج مطالعه ذاکر حقیقی و همکاران (۳۵) در تهران نشان می‌دهد که فقدان پیوست اقلیمی، توزیع نابرابر فضای سبز و عدم انسجام نهادی-مکانی، تاب‌آوری شهری را کاهش داده است؛ الگویی که در روند توسعه فشرده اهواز و عدم تناسب رشد کالبدی با توسعه شاخص NDVI نیز مشهود است. همچنین، قاسمی و همکاران (۳۶)

مطالعه ابوطالب و همکاران (۳۲) در قاهره نشان داد که با افزایش سهم اراضی ساخته‌شده از ۱۳٫۲ درصد به ۴۱٫۷ درصد طی بیش از سه دهه، میانگین LST حدود ۳٫۷۶ درجه سلسیوس افزایش یافته است؛ به عبارت دیگر، نرخ افزایش دمای سطحی به ازای هر ۱۰ درصد رشد کالبدی، کمتر از آن چیزی است که در اهواز مشاهده می‌شود (۳۲). در مطالعات انجام‌شده در شهرهای لاکنو در هند، در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ مساحت توسعه ۲۶ درصد گزارش شده است نشان‌دهنده توسعه نیمه‌پراکنده تا پراکنده است (۵). اما شدت تغییرات شاخص کیفیت هوا، حدود ۸ درصد بوده است. همچنین در شهر Multan پاکستان، طبق گزارش Nature Scientific Reports 2024، رشد حدود ۳٫۵ درصد در اراضی ساخته‌شده طی دوره ۱۹۹۰-۲۰۲۰ تنها منجر به افزایش حدود ۰٫۹ درجه سلسیوس در LST شده است. در اهواز، رشد کالبدی حدود ۱۶ درصد با افزایش بیش از ۲ درجه سلسیوس در LST همراه بوده که نشان‌دهنده حساسیت بالاتر سیستم حرارتی شهر به تغییرات کالبدی در اقلیم‌های بسیار گرم است.

داده‌های پایگاه کیفیت هوای WHO و تحلیل‌های بلندمدت اروپا و آمریکای شمالی نشان می‌دهد که در بسیاری از شهرها، علی‌رغم رشد فیزیکی ۲۰ تا ۳۰ درصد طی بازه‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵، میانگین شاخص‌های کیفیت هوا یا ثابت مانده یا حتی بهبود ۵ تا ۱۰ درصد داشته‌اند که عمدتاً ناشی از سیاست‌های کنترلی، بهبود فناوری و مدیریت حمل‌ونقل بوده است (۱۹). در اهواز افزایش ۱۶ درصد در توسعه فیزیکی با ۱۷ درصد افت AQI و بیش از ۳۵ درصد افزایش PM₁₀ همراه شده است. این اختلاف نشان می‌دهد که توسعه شهری در اهواز، برخلاف بسیاری از شهرهای مورد مطالعه جهانی، بدون سازوکارهای مؤثر کاهش آلودگی و سازگاری اقلیمی انجام شده است. مورفولوژی شهر اهواز نظیر توسعه خطی بخش‌هایی از کالبد شهر در امتداد رودخانه کارون و فقدان کریدورهای پیوسته سبز، موجب ایجاد موانع کالبدی در مسیر جریان‌های هوایی شده است. این ساختار فضایی در مجاورت با کانون‌های فعال گردوغبار، به تشدید احتباس حرارتی و به دام افتادن آلاینده‌ها در محیط شهری منجر شده است. نتایج مطالعه هه و ژو (۲) در تحلیل ۲۸۷ شهر چین نشان دادند که شهرهایی با توسعه افقی و مورفولوژی باز، معمولاً دارای مقادیر آنتروپی بالاتر از ۰٫۳ هستند، در حالی که شهرهایی با محدودیت‌های اقلیمی یا زمین‌ساختی، به سمت فشردگی فضایی سوق می‌یابند (۲).

سطوح نفوذپذیر و تمرکز فعالیت‌های انسانی، با پیامدهای نامطلوب اقلیمی و زیست‌محیطی همراه بوده است. افزایش دمای سطح زمین و افت تدریجی کیفیت هوا، نشان می‌دهد که رشد کالبدی شهر بدون در نظر گرفتن ملاحظات محیط زیستی و بهداشتی در توسعه کالبدی، منجر به تشدید پدیده‌هایی نظیر جزیره حرارتی شهری و آلودگی هوا شود. به‌عنوان راهکارهای اجرایی مستقیم، پیشنهاد می‌شود مدیریت شهری اهواز سیاست‌هایی مانند استفاده از مصالح با آلودگی بالا (سطوح خنک) در معابر، توسعه بام‌ها و نماهای سبز در بافت‌های متراکم، و اصلاح ضوابط طراحی شهری به‌منظور ایجاد کریدورهای باد و بهبود تهویه طبیعی را در دستور کار قرار دهد. از این‌رو، نتایج مطالعه بر ضرورت ادغام شاخص‌های اقلیمی و زیست‌محیطی در برنامه‌ریزی و مدیریت توسعه شهری اهواز تأکید دارد. پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی از جمله وابستگی به داده‌های ماهواره‌ای با تفکیک مکانی متوسط و عدم دسترسی به داده‌های خرد بالینی مواجه بوده است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، از مدل‌های پیشرفته‌تر مکانی-زمانی و سناریوهای آینده‌نگر توسعه شهری استفاده شود. همچنین توصیه می‌گردد جهت ارزیابی بار بیماری‌های ناشی از توسعه ناموزون شهری، از داده‌های اپیدمیولوژیک مستند و شاخص‌های مستقیم سلامت نظیر نرخ مراجعه به مراکز درمانی به دلیل عوارض قلبی-ریوی بهره‌گیری شود.

ملاحظات اخلاقی

احتراماً مقاله حاضر دارای کد اخلاق ۱۸۴۲۱۴۵۶۲۰ از دانشگاه پیام نور تهران می‌باشد.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند هیچگونه تضاد یا تعارض منافی ندارند.

منابع مالی

بدین وسیله اعلام می‌شود مقاله تحت حمایت مالی قرار نگرفته است.

نقش نویسندگان

ایده و طراحی مطالعه: داوود رحمانی؛ جمع‌آوری داده‌ها: داوود رحمانی، ندا اورک، کتایون ورشوساز؛ تحلیل و تفسیر داده‌ها: داوود رحمانی، فاطمه کریمی اورگانی؛ نگارش پیش‌نویس مقاله: داوود رحمانی؛ بازبینی انتقادی مقاله از نظر محتوای علمی: سینا عطار روشن؛ تجزیه و تحلیل آماری: سینا عطار روشن، ندا اورک؛ نظارت بر مطالعه: ندا اورک.

در ارزیابی بافت نقش جهان اصفهان تأکید کردند که تراکم و ساختار شهری بدون در نظر گرفتن سازگاری محیطی، تاب‌آوری کالبدی را در برابر تغییرات اقلیمی تقلیل می‌دهد. مطالعه جعفری دهکردی و همکاران (۳۷) در شهرکرد نشان داد که شاخص‌های فرم شهر، نسبت ارتفاع به عرض خیابان و نظام ارتفاعی توده‌ها تأثیر معنی‌داری بر رفتار حرارتی محیط دارند. این مکانیزم در شهر اهواز به‌واسطه توسعه متراکم و نبود کریدورهای تهویه، به شکل احتباس حرارتی و افزایش LST نمود یافته است.

نتایج ارزیابی فاکتور تجاوز از استاندارد برای ذرات معلق نشان‌دهنده چالش جدی در حوزه سلامت عمومی و بهداشت محیط بوده است. مقادیر EF در محدوده‌ای بین ۸ تا ۱۴ برابر حد رهنمودی سازمان جهانی بهداشت، نشان می‌دهد که کیفیت هوای اهواز طی دو دهه گذشته در وضعیت ناایمن قرار داشته است. در الگوی توسعه فشرده شهری، تمرکز بالای جمعیت در بلوک‌های متراکم با تهویه طبیعی ضعیف، منجر به افزایش تصاعدی پتانسیل مواجهه جمعیتی با آلاینده‌ها می‌شود. همان‌طور که مطالعات اپیدمیولوژیک نشان داده‌اند، هم‌افزایی تنش حرارتی ناشی از جزیره حرارتی شهری و غلظت بالای ذرات معلق، تاب‌آوری بهداشتی شهروندان را کاهش می‌دهد (۱۴).

نتایج این پژوهش از منظر برنامه‌ریزی شهری، چالشی جدی برای رویکردهای نسخه‌محور توسعه فشرده ایجاد می‌کند. در حالی که بوکر و همکاران (۸) بر ضرورت استفاده از مدل‌های رشد شهری در شرایط عدم قطعیت اقلیمی تأکید دارند، یافته‌های حاضر نشان می‌دهد که اثرگذاری الگوی رشد، به‌شدت وابسته به زمینه اقلیمی و مورفولوژی شهری است. در شهرهایی مانند اهواز، توسعه فشرده بدون ارتقای شبکه‌های سبز، بهبود تهویه شهری و مدیریت منابع آلاینده، می‌تواند هم‌زمان جزیره حرارتی و جزیره آلودگی را تقویت کند (۸). نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شهر اهواز از منظر شاخص آنتروپی، الگوی رشد فشرده و کنترل‌شده‌ای را تجربه کرده است، اما این الگو با افزایش معنی‌دار دمای سطح زمین و افت کیفیت هوا همراه بوده است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که توسعه فیزیکی شهر اهواز طی دو دهه اخیر به‌صورت فشرده و درون‌افزا رخ داده است؛ الگویی از گسترش افقی بی‌رویه جلوگیری کرده، اما به‌دلیل افزایش تراکم کالبدی، کاهش

استفاده از هوش مصنوعی

بدین وسیله اعلام می‌شود در تدوین مقاله از هوش مصنوعی استفاده نشده است.

References

1. Navaneetham K, Arunachalam D. Global population aging, 1950–2050. In: *Handbook of aging, health and public policy: perspectives from Asia* 2023 Sep 14 (pp. 1-18). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7842-7_154
2. He X, Zhou Y. Urban spatial growth and driving mechanisms under different urban morphologies: An empirical analysis of 287 Chinese cities. *Landscape and Urban Planning*. 2024;248:105096. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105096>
3. Couture V, Gaubert C, Handbury J, Hurst E. Income growth and the distributional effects of urban spatial sorting. *Review of Economic Studies*. 2024;91(2):858-898. <https://doi.org/10.1093/restud/rdad048>
4. Xu Y, Jia R, Liu J, Han D, He T, Xu X, Liu L, Sun Z, Qiao Z. The population exposure risk of urban heat island effect: From the perspective of urban spatial expansion in China. *Building and Environment*. 2024;258:111565. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111565>
5. Khan D, Khan N, Choudhury U, Singh SK, Kanga S, Kumar P, Meraj G. Urban expansion and spatial growth patterns in Lucknow: implications for Sustainable Development (1991–2021). *Sustainability*. 2024;17(1):227. <https://doi.org/10.3390/su17010227>
6. Xu T, Umair M, Cheng W, Hakimova Y, Mang G. Evaluating Eco-Efficiency as a metric for sustainable urban Growth: a comparative study of provincial capital cities in China. *Ecological Indicators*. 2024;169:112959. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112959>
7. Badapalli PK, Nakkala AB, Gugulothu S, Kottala RB, Mannala P. Geospatial insights into urban growth and land cover transformation in Anantapur city, India. *Environment, Development and Sustainability*. 2026;28:6343-6366. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05180-6>
8. Booker K, White I, Fu X, Wilson M. Modelling urban growth for long-term planning under future climate uncertainty: A systematic review and decision pathway. *Cities*. 2025;167:106310. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.106310>
9. Idowu MA, Ajibade LT. Urban growth and land use change impacts on climate change in sub-saharan Africa. In: Ogwu MC, Izah SC, Dessureault-Rompré J, Gasparatos D (eds) *Sustainable Soil Systems in Global South*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5276-8_6
10. Chen H, Huang JJ, Liang H, Wang W, Li H, Wei Y, Jiang AZ, Zhang P. Can evaporation from urban impervious surfaces be ignored? *Journal of Hydrology*. 2023;616:128582. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128582>
11. Guo F, Hertel D, Schlink U, Hu D, Qian J, Wu W. Remote sensing-based attribution of urban heat islands to the drivers of heat. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2024;62:5002312. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3378287>
12. Martilli A, Sanchez B, Rasilla D, Pappaccogli G, Allende F, Martin F, Román-Cascón C, Yagüe C, Fernandez F. Simulating the meteorology during persistent Wintertime Thermal Inversions over urban areas. The case of Madrid. *Atmospheric Research*. 2021;263:105789. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105789>
13. Heaviside C, Macintyre H, Vardoulakis S. The urban heat island: implications for health in a changing environment. *Current Environmental Health Reports*. 2017;4(3):296-305. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>
14. Lelieveld J, Pozzer A, Pöschl U, Fnais M, Haines A, Münzel T. Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: a worldwide perspective. *Cardiovascular Research*. 2020;116(11):1910-1917. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa025>
15. Piracha A, Chaudhary MT. Urban air pollution, urban heat island and human health: a review of the literature. *Sustainability*. 2022;14(15):9234. <https://doi.org/10.3390/su14159234>
16. Imhoff ML, Zhang P, Wolfe RE, Bounoua L. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*. 2010;114(3):504-513. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.008>
17. Zhou L, Dang X, Sun Q, Wang S. Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov model. *Sustainable Cities and Society*. 2020;55:102045. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102045>
18. Arsanjani JJ, Helbich M, de Noronha Vaz E. Spatiotemporal simulation of urban growth patterns using agent-based modeling: The case of Tehran. *Cities*. 2013;32:33-42. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.01.005>
19. Font A, Guiseppin L, Blangiardo M, Gherzi V, Fuller GW. A tale of two cities: is air pollution improving in Paris and London? *Environmental Pollution*. 2019;249:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.040>
20. Liao J, Wang T, Jiang Z, Zhuang B, Xie M, Yin C, Wang X, Zhu J, Fu Y, Zhang Y. WRF/Chem modeling of the impacts of urban expansion on regional climate and air pollutants in Yangtze River Delta, China. *Atmospheric Environment*. 2015;106:204-214. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.059>

21. Lee C, Lee S. Analyzing spatiotemporal land use change using an urban growth model based on multilevel logistic regression and future land demand scenarios. *Applied Geography*. 2023;160:103099. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.103099>
22. Hosein Zade Dalir K, Pourmohammadi M, Hadili B, Choubasaz S. Analysis of urban sprawl pattern of Tabriz city, using Shannon's entropy and indicating urban growth directions. *Naqshejahan-Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*. 2012;2(1):55-66. (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224991.1391.2.1.7.7>
23. Das S, Angadi DP. Land use land cover change detection and monitoring of urban growth using remote sensing and GIS techniques: A micro-level study. *GeoJournal*. 2022; 87(3):2101-2123. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10359-1>
24. Roy B, Kasemi N. Monitoring urban growth dynamics using remote sensing and GIS techniques of Raiganj Urban Agglomeration, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2021;24(2):221-230. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.02.001>
25. Safaralizadeh E, Hoseinzadeh R, Mokhtari R. An analyze of smart growth patterns in fourteen areas of Isfahan metropolitan, based on regional planning models. *Journal of Urban - Regional Studies and Research*. 2013;5(19):65-82. (In Persian). https://urs.ui.ac.ir/article_20073_en.html?lang=fa
26. Zahedi A, Jaafarzadeh N, Mirr I, Tahmasebi Y. Forecasting air quality index (AQI) and air quality health index (AQHI) by time series models in Ahvaz, Iran. *Environmental Health Engineering and Management Journal*. 2024;11(4):469-476. <https://doi.org/10.34172/EHEM.2024.46>
27. Shamaei A, Jafarpour Ghalehtemouri K. Land use evaluation and capacity assessment for sustainable urban physical development: case of study Ahvaz city. *City, Territory and Architecture*. 2024;11(1):18. <https://doi.org/10.1186/s40410-024-00239-3>
28. Xu X, Pei H, Wang C, Xu Q, Xie H, Jin Y, Feng Y, Tong X, Xiao C. Long-term analysis of the urban heat island effect using multisource Landsat images considering inter-class differences in land surface temperature products. *Science of The Total Environment*. 2023;858:159777. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159777>
29. Cilek MU, Cilek A. Analyses of land surface temperature (LST) variability among local climate zones (LCZs) comparing Landsat-8 and ENVI-met model data. *Sustainable Cities and Society*. 2021;69:102877. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102877>
30. Punia M, Singh L. Entropy approach for assessment of urban growth: a case study of Jaipur, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2012;40:231-244. <https://doi.org/10.1007/s12524-011-0141-z>
31. Thammaboribal P. Investigating land surface temperature variation and land use land cover changes in Pathumthani, Thailand (1997-2023) using Landsat satellite imagery: a comprehensive analysis of LST and urban hot spots (UHS). *International Journal of Geoinformatics*. 2024; 20(2):27-41. <https://doi.org/10.52939/ijg.v20i2.3063>
32. Abutaleb K, Ngie A, Darwish A, Ahmed M, Arafat S, Ahmed F. Assessment of urban heat island using remotely sensed imagery over Greater Cairo, Egypt. *Advances in Remote Sensing*. 2015;4(01):35-47. <https://doi.org/10.4236/ars.2015.41004>
33. Saxena A, Jat MK. Land suitability and urban growth modeling: development of SLEUTH-suitability. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2020;81:101475. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101475>
34. Sun L, Xie C, Qin Y, Zhou R, Wu H, Che S. Study on temperature regulation function of green spaces at community scale in high-density urban areas and planning design strategies. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2024;101:128511. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128511>
35. Zakerhaghighi K, Amin Nayeri B, Zeinali Azim A. Investigating the impact of climate changes on future urban planning and development: a case study of Tehran city. *Future City, Indigenous Thought*. 2025;1(2):1-25. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/future.2025.23515.1019>
36. Ghasemi E, Soleimani M, Jazini M, Sarlaki Z, Hajian A. Evaluation of climatic resilience in physical aspect (Case study: Naqshe Jahan Neighborhood, Isfahan, Iran). *Journal of Urban Sustainable Development*. 2021;2(5):53-63. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/usd.2021.696818>
37. Jafari Dehkordi M, Roosta M, Vakilinejad R. Analysis of the impacts of urban form indices on outdoor climatic comfort in cold climates (case study: Shahrekord). *Spatial Planning*. 2026;16(1):107-138. (In Persian). <https://doi.org/10.22108/sppl.2025.145513.1851>