



Multi-sensor evaluation of quantitative and qualitative dynamics of urban green infrastructure in a semi-arid climate (Case study: Mohajeran)

Iman Saeedi 

Corresponding Author, Department of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Natural resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: isaeeedi@malayeru.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	These days, semi-arid and arid cities in Iran are struggling with a conflict between physical development and ecological capacity. In these areas, high rates of evapotranspiration and reduced rainfall pose a serious threat to the survival of green infrastructure. This study evaluates the quantitative and qualitative dynamics of green infrastructure in the new city of Mohajeran between 2018 and 2024 using a multi-sensor approach within the Google Earth Engine (GEE) platform. Sentinel-2 satellite imagery was utilized for quantitative assessment, while Landsat 8/9 data were employed for qualitative and thermal analysis. The Vegetation Health Index (VHI) was extracted by integrating the Vegetation Condition Index (VCI) and Temperature Condition Index (TCI) to model the physiological stress of plants. The results revealed that the area of urban green infrastructure significantly decreased from 75.53 hectares in 2018 to 57.28 hectares in 2024. Despite this substantial reduction in area, the mean VHI showed negligible change (from 0.40 to 0.41), indicating relative qualitative stability within the remaining green patches. However, the decline of the minimum VHI value to 0.21 in 2024 signals the emergence of critical stress hotspots in certain areas. The findings demonstrate that Mohajeran's green infrastructure has transitioned from a stage of physical development to a phase of "qualitative crisis" and spatial contraction. Consequently, urban management must shift its focus toward prioritizing thermal resilience management and optimizing the health of existing infrastructure.
Article history: Received 15 April 2026 Received in revised form 05 July 2026 Accepted 24 July 2026	
Keywords: <i>Google earth engine,</i> <i>Land Surface Temperature (LST),</i> <i>Vegetation Health Index (VHI),</i> <i>Urban green space.</i>	

Cite this article: Saeedi, I. (2026). Multi-sensor evaluation of quantitative and qualitative dynamics of urban green infrastructure in a semi-arid climate (Case study: Mohajeran). *Journal of Natural Environment*, 79 (3), 569-583.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.412800.2909>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

Urban green infrastructure is a key component of ecological resilience in rapidly expanding cities, particularly in semi-arid environments where water scarcity, high evapotranspiration, rising land-surface temperatures, and recurrent drought constrain vegetation performance. In such settings, evaluating green infrastructure solely on the basis of its physical extent may be misleading, because vegetation can remain spectrally detectable while experiencing physiological and thermal stress. Mohajeran, a planned new city in Markazi Province, Iran, was developed with a garden-city approach, making the persistence and ecological functioning of its green infrastructure central to its environmental identity. However, a monitoring framework integrating both the quantity and health of urban green spaces has been lacking. Therefore, this study aimed to evaluate the quantitative and qualitative dynamics of Mohajeran's urban green infrastructure between 2018 and 2024 and determine whether changes in green-space extent were accompanied by comparable changes in ecological health. The main methodological innovation was integrating high-resolution Sentinel-2 imagery for mapping green-space extent with Landsat 8/9 thermal information for assessing vegetation stress within Google Earth Engine. A quality mask was also applied specifically to mapped green-infrastructure patches to minimize interference from surrounding barren or built-up surfaces.

Material and Methods

The study was conducted in Mohajeran, a semi-arid new city located approximately 25 km west of Arak in Markazi Province. Satellite observations representing the growing season, from May to September, were analyzed for 2018 and 2024. Sentinel-2 MSI surface-reflectance data with 10-m spatial resolution were used to delineate active urban vegetation and quantify changes in green-infrastructure area. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was calculated, and a threshold of 0.33 was applied to distinguish active vegetation from built-up areas and barren land, producing a binary green-space mask. Landsat 8/9 OLI and TIRS data were used for qualitative and thermal assessment. Land Surface Temperature (LST) was incorporated into the Temperature Condition Index (TCI), while NDVI-based variability was represented through the Vegetation Condition Index (VCI). Vegetation health was then evaluated using the Vegetation Health Index (VHI), which combines VCI and TCI with equal weights ($\alpha = 0.5$). Higher VHI values indicate healthier vegetation and lower thermal stress. Finally, the VHI layer was spatially constrained by the Sentinel-2-derived green-space mask, allowing simultaneous assessment of green-space extent, gain/loss patterns, and the condition of remaining vegetation.

Results

The analysis revealed a marked contraction of urban green infrastructure during the six-year period. Total mapped green-space area declined from 53.75 ha in 2018 to 28.57 ha in 2024, corresponding to an approximately 47% reduction. Spatial change detection showed that newly created green patches were generally associated with planned development areas, road corridors, and service zones, whereas losses occurred where vegetation removal, urban expansion, and declining maintenance capacity interacted with limitations in sustainable water supply. The pattern suggests a mismatch between the pace of physical urban development and the capacity to maintain vegetation in a water-limited environment. The qualitative assessment provided a more complex picture. Mean VHI remained nearly stable, changing from 0.40 in 2018 to 0.41 in 2024, while the maximum VHI remained unchanged at 0.55. This stability indicates that some core managed green patches retained their general level of vegetation health despite the substantial reduction in total area. However, the minimum VHI declined from 0.22 to 0.21, indicating localized physiological-stress hotspots. Spatial VHI patterns also showed that some patches remaining green in terms of vegetation cover were exposed to greater thermal stress because of increased land-surface temperature and lower TCI values. This divergence between quantitative persistence and qualitative deterioration represents a "green paradox": a site may retain its mapped vegetation extent while losing part of its cooling capacity and ecological functionality.

Discussion and Conclusion

The findings demonstrate that monitoring urban green infrastructure in semi-arid cities should not rely on NDVI or mapped area alone. Spectrally green vegetation may still experience heat stress, particularly

where irrigation is inadequate, vegetation is poorly adapted to local climatic conditions, or surrounding urban surfaces intensify thermal pressure. The combined use of Sentinel-2 and Landsat 8/9 provides a more informative assessment by linking the physical presence of vegetation to its thermal and physiological condition. In Mohajeran, the strong decline in green-space area, together with localized deterioration in minimum VHI, indicates a transition from a phase dominated by physical green-space development toward one characterized by spatial contraction and increasing concern over ecological quality. These results have direct implications for urban management. Rather than prioritizing further expansion of planted area, municipal policy should focus on preserving and improving the health of existing high-value green patches. Loss/Gain and VHI maps can be incorporated into urban GIS for identifying priority zones, targeting irrigation, and directing restoration resources toward vegetation with realistic recovery potential. Thermal zoning based on TCI can support replacement of vulnerable vegetation in heat-stressed road margins and dense residential sectors with native, drought-tolerant, and heat-resistant species. An irrigation network informed by remotely sensed stress thresholds could further improve water allocation toward patches approaching critical decline. The study is constrained by the lack of finer-resolution thermal satellite data, the absence of detailed field data on irrigation volume and distribution, and possible effects of interannual phenological and hydrological variability on vegetation signals. Overall, the study confirms the value of cloud-based multi-sensor remote sensing for cost-effective monitoring and emphasizes that long-term resilience in semi-arid cities depends increasingly on qualitative protection, thermal-stress management, and efficient water use rather than on green-space expansion alone.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

CRedit authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The author would like to thank the anonymous reviewers for their valuable suggestions during manuscript revision. We also extend our thanks to Malayer University for the financial support of this research.

ارزیابی چندسنگنده‌ای پویایی کمی و کیفی زیرساخت‌های سبز در اقلیم نیمه‌خشک (مطالعه شهر مهاجران)

ایمان سعیدی ✉

نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: isaeedi@malayeru.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۲ کلیدواژه‌ها: دمای سطح زمین، سامانه گوگل ارث انجین، شاخص سلامت گیاهی، فضای سبز شهری.	امروزه شهرهای نیمه‌خشک و خشک در ایران در تضاد میان توسعه کالبدی و توان اکولوژیک هستند. در این مناطق، نرخ بالای تبخیر و تعرق و کاهش بارندگی، بقای زیرساخت‌های سبز را با تهدید جدی مواجه کرده است. این پژوهش با بهره‌گیری از رویکرد چندسنگنده‌ای در بستر سامانه Google Earth Engine، به ارزیابی تطبیقی پویایی کمی و کیفی زیرساخت‌های سبز شهر جدید مهاجران در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ پرداخت. جهت ارزیابی کمی از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و برای تحلیل‌های کیفی و حرارتی از داده‌های Landsat 8/9 استفاده شد؛ شاخص سلامت گیاهی (VHI) نیز از طریق تلفیق شاخص‌های وضعیت پوشش گیاهی و وضعیت دمایی برای مدل‌سازی استرس فیزیولوژیک گیاهان استخراج گردید. نتایج نشان داد که مساحت زیرساخت سبز شهری از ۷۵/۵۳ هکتار در سال ۲۰۱۸ به ۵۷/۲۸ هکتار در سال ۲۰۲۴ کاهش یافته است. علی‌رغم این کاهش چشمگیر مساحتی، میانگین شاخص سلامت گیاهی تغییر ناچیزی داشته (از ۰/۴۰ به ۰/۴۱) که نشان‌دهنده پایداری نسبی کیفیت در لکه‌های سبز باقیمانده است. با این حال، کاهش حداقل مقدار VHI به ۰/۲۱ در سال ۲۰۲۴ بیانگر شروع کانون‌های بحرانی استرس در برخی مناطق است. یافته‌ها اثبات می‌کند که زیرساخت سبز مهاجران از مرحله توسعه کالبدی به مرحله بحران کیفی و کاهش وسعت گذار کرده است؛ بنابراین مدیریت شهری باید اولویت را بر مدیریت تاب‌آوری حرارتی و بهینه‌سازی سلامت زیرساخت‌های موجود قرار دهد.

استناد: سعیدی، ایمان (۱۴۰۵). ارزیابی چندسنگنده‌ای پویایی کمی و کیفی زیرساخت‌های سبز در اقلیم نیمه‌خشک (مطالعه شهر مهاجران). محیط زیست طبیعی، ۷۹ (۳)، ۵۶۹-۵۸۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.412800.2909>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

در سده بیست و یکم، گسترش سریع شهرنشینی و پدیده تغییر اقلیم، تاب‌آوری سکونتگاه‌های انسانی را با چالش‌های بی‌سابقه‌ای مواجه کرده است (Albert, 2020). زیرساخت‌های سبز شهری به‌عنوان حیاتی‌ترین شریان‌های اکولوژیک، نقشی بنیادین در تعدیل جزایر حرارتی، بهبود کیفیت هوا و ارتقای سلامت روان شهروندان ایفا می‌کنند (Camacho-Cervantes et al., 2014; Pfeiffer and Cloutier, 2016; Saeedi et al., 2022). با این حال، در اقلیم‌های نیمه‌خشک، این زیرساخت‌ها خود تحت استرس‌های محیطی شدیدی قرار دارند (Grabowski et al., 2022; Jamali et al., 2021). به‌طوری که صرف وجود فیزیکی فضای سبز (کمیت) دیگر تضمین‌کننده خدمات اکوسیستمی نیست. پژوهش‌های اخیر، تأکید دارند که پایداری شهرها در گرو حفظ "کیفیت و سلامت" این پهنه‌ها در برابر نوسانات دمایی و محدودیت‌های فزاینده منابع آبی است (Kadić et al., 2025; Sethi et al., 2025).

مناطق نیمه‌خشک فلات مرکزی ایران، به‌ویژه قطب‌های صنعتی مانند منطقه اراک و شهر جدید مهاجران، در تضاد میان توسعه کالبدی و توان اکولوژیک هستند. در این مناطق، نرخ بالای تبخیر و تعرق و کاهش بارندگی، بقای زیرساخت‌های سبز را با تهدید جدی مواجه کرده است (Saeedi and Darabi, 2019). ضرورت تحقیق در شهر مهاجران از آنجا ناشی می‌شود که این شهر به‌عنوان یک الگوی باغ‌شهر طراحی شده و حفظ هویت محیط‌زیستی آن پیوند ناگسستنی با سلامت پوشش گیاهی دارد. با این حال، فقدان یک سیستم پایش مستمر که بتواند فراتر از مساحت ظاهری، "استرس‌های فیزیولوژیک" گیاهان را رصد کند، یک خلأ جدی در مدیریت شهری این منطقه محسوب می‌شود.

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که ارزیابی کمی و کیفی فضاهای سبز شهری با استفاده از رویکردهای سنجش‌ازدوری، توجه بسیاری از محققان را در سال‌های اخیر به‌خود جلب کرده است. در مقیاس بین‌المللی، Biswas و همکاران (۲۰۲۵) در پایش فضاهای سبز کلکته نشان دادند که در فازهای تکمیلی توسعه شهری، لکه‌های سبز به شدت تحت تأثیر ساخت‌وسازهای متراکم منقبض می‌شوند و خدمات اکوسیستمی آنها افت می‌کند. Kadić و همکاران (۲۰۲۵) نیز با بررسی نقش زیرساخت‌های سبز در سازگاری با تغییرات اقلیمی اثبات کردند که پایش کیفی پوشش گیاهی، کلید اصلی تدوین سیاست‌های تاب‌آوری شهری است. از سوی دیگر، کاربرد شاخص‌های ترکیبی نظیر شاخص سلامت گیاهی (VHI) که مؤلفه‌های حرارتی و سبزیگی را تلفیق می‌کند، کارایی بالایی در مناطق با محدودیت منابع آبی نشان داده است؛ چنان‌که Karnieli و همکاران (۲۰۱۰) با به‌کارگیری داده‌های دمای سطح زمین و NDVI، کارایی این ترکیب را در تفکیک استرس‌های فیزیولوژیک از تغییرات زی‌توده در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک تأیید کردند.

در ایران نیز، Alamdarloo و همکاران (۲۰۱۸) با ارزیابی آسیب‌پذیری پوشش گیاهی در برابر خشکسالی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، نشان دادند که مناطق خشک و نیمه‌خشک بالاترین نرخ حساسیت و استرس فیزیولوژیک را در لکه‌های سبز حومه‌ای تجربه می‌کنند. Fathi-Taperasht و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای به پایش شدت و دوره بازبازی خشکسالی در کاربری‌های مختلف پرداختند و دریافتند که بوته‌زارها و فضاهای سبز دست‌کاشت شهری به‌دلیل وابستگی شدید به منابع آب زیرزمینی، دوره‌های بازبازی طولانی‌تری را پس از تنش‌های حرارتی تجربه می‌کنند. Jamali و همکاران (۲۰۲۱) نیز با تمرکز بر زیرساخت‌های سبز شهر تهران، اولویت‌بندی پهنه‌های نیازمند توسعه را بر مبنای فشار جزایر حرارتی شهری تبیین کردند. با این حال، مرور منابع نشان می‌دهد که اکثر پژوهش‌های داخلی در مناطق نیمه‌خشک ایران صرفاً بر «تغییر کاربری» و «سنجش مساحت (کمی)» تمرکز داشته‌اند و پایش همزمان و مکان‌مند استرس فیزیولوژیک زیرساخت‌های سبز دست‌کاشت در بستر سامانه‌های ابری کمتر مورد واکاوی قرار گرفته است.

علی‌رغم انجام مطالعات پراکنده در حوزه فضای سبز شهری، اکثر پژوهش‌های داخلی در مناطق نیمه‌خشک صرفاً بر "تغییر کاربری" و "سنجش مساحت" تمرکز داشته‌اند و ابعاد کیفی زیرساخت‌ها کمتر مورد واکاوی قرار گرفته است (Alaei et al., 2018; Teimouri and Yigitcanlar, 2025). نوآوری این پژوهش در بهره‌گیری از رویکرد چندسجدهای در بستر Google Earth Engine است که دقت ۱۰ متری سنتینل-۲ را با قابلیت‌های حرارتی لندست ۹/۸ تلفیق می‌کند. این مطالعه برای اولین بار در شهر مهاجران، "مؤلفه کیفیت" را بر روی "نقشه کمیت" اعمال کرده است تا با حذف نویزهای ناشی از اراضی بایر،

تصویری خالص از وضعیت سلامت زیر ساخت سبز ارائه دهد که این رویکرد دقت تصمیم‌گیری‌های مدیریتی را به مراتب ارتقا می‌دهد.

هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی تطبیقی پویایی کمی و کیفی زیرساخت‌های سبز شهر مهاجران در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ است. این پژوهش به دنبال پاسخ به این پرسش کلیدی است که آیا توسعه مساحتی فضای سبز در این شهر همگام با حفظ سلامت و کارایی اکولوژیک آن بوده است یا خیر؟ برای دستیابی به این هدف، ابتدا نقشه‌های تغییرات مساحت استخراج شده و سپس با تحلیل شاخص شرایط گیاهی^۱ و شاخص شرایط دمایی^۲، سطح استرس فیزیولوژیک زیر ساخت سبز در این اقلیم نیمه خشک مدل‌سازی می‌گردد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به عنوان یک نقشه راه برای مدیران شهری جهت تخصیص بهینه منابع آبی و بازپیرایی هوشمند فضاهای سبز شهری مورد استفاده قرار گیرد.

محدوده مطالعاتی این پژوهش، شهر جدید مهاجران واقع در استان مرکزی است که در فاصله تقریبی ۲۵ کیلومتری غرب کلانشهر اراک قرار دارد. شهر جدید مهاجران در عرض جغرافیایی ۳۴ درجه، ۵ دقیقه و ۳۲ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۴۹ درجه، ۲۴ دقیقه و ۱۴ ثانیه شرقی، در دشت سازند و در مجاورت اراک واقع شده است (شکل ۱). این شهر با هدف اسکان کارکنان صنایع بزرگ منطقه و با رویکردی خاص به عنوان یک «الگوی باغ‌شهر» طراحی و احداث شده است، به طوری که حفظ و توسعه زیرساخت‌های سبز شهری پیوند ناگسستنی با هویت محیط‌زیستی و کالبدی آن دارد.

روش‌شناسی پژوهش

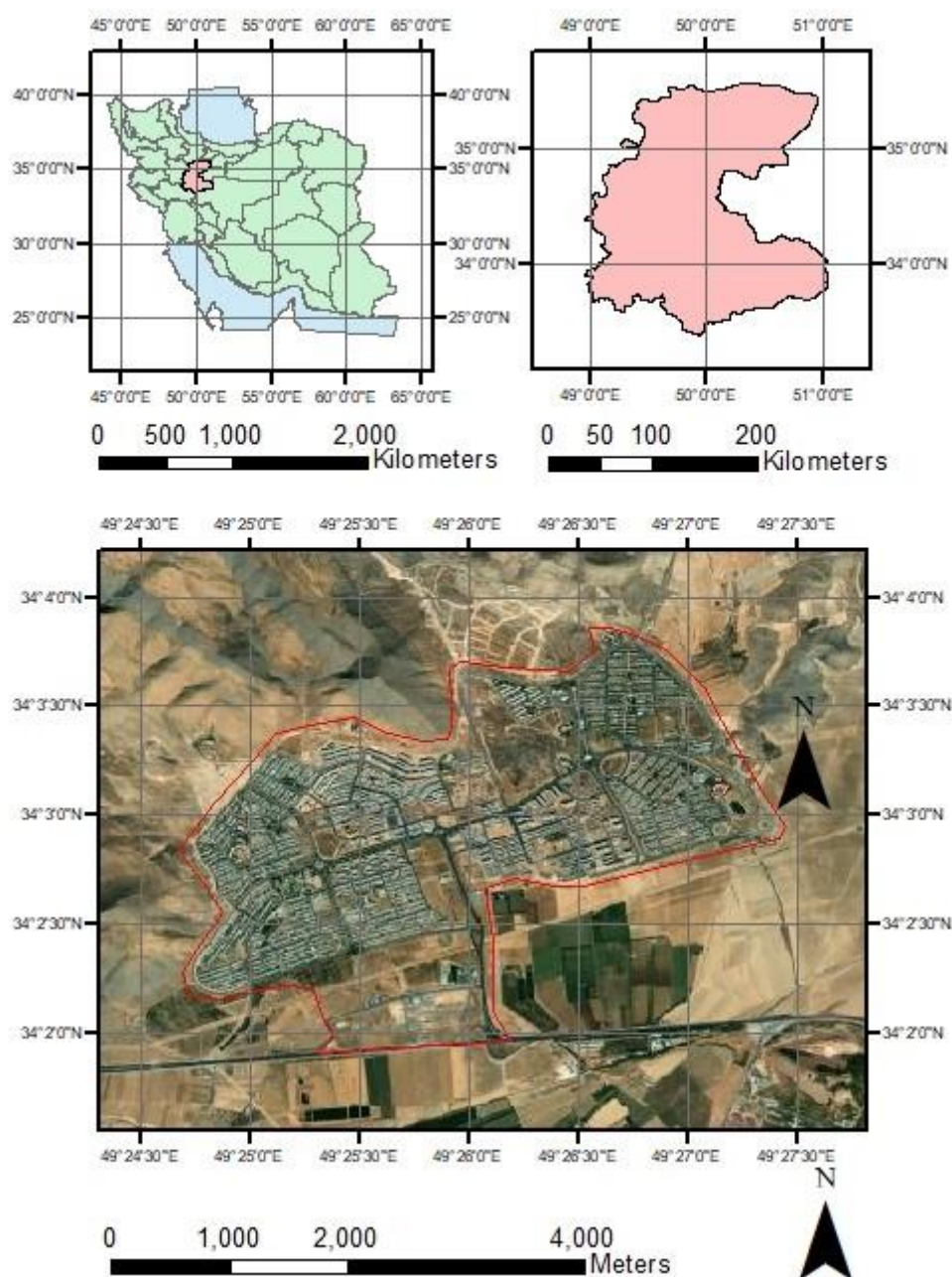
این پژوهش با رویکردی توصیفی-تحلیلی و بر پایه پردازش داده‌های سنجش‌ازدوری در سامانه Google Earth Engine انجام شده است. از آنجا که شاخص‌های سنتی نظیر NDVI به تنهایی قادر به تفکیک استرس‌های حرارتی از تغییرات زی‌توده نیستند (Glenn and Tabb, 2019; Kullberg et al., 2017)، در این پژوهش از شاخص ترکیبی سلامت گیاهی (VHI) معرفی شده توسط Kogan (۱۹۹۵) استفاده گردید که مؤلفه‌های سبزی‌نگی (VCI) و دمایی (TCI) را به طور همزمان تلفیق می‌کند. گام نخست در این مسیر، شامل فراخوانی تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 برای تحلیل‌های کمی و Landsat 8/9 برای تحلیل‌های حرارتی و کیفی در بازه‌های زمانی می ۲۰۱۸ تا سپتامبر ۲۰۲۴ است. انتخاب این بازه زمانی (فصل رشد) به منظور بیشینه سازی بازتاب‌های گیاهی و به حداقل رساندن خطای ناشی از خزان یا پوشش برف صورت گرفته است. جدول ۱ داده‌های مورد استفاده در این تحقیق را معرفی کرده است.

در این پژوهش، از داده‌های سنجنده MSI ماهواره Sentinel-2 برای ارزیابی‌های کمی (استخراج دقیق لکه‌های سبز) و از داده‌های سنجنده‌های OLI/TIRS ماهواره‌های Landsat 8/9 برای ارزیابی‌های کیفی و حرارتی (استخراج دمای سطح زمین و شاخص‌های تنش) استفاده شده است. مبنای نظری این انتخاب، ضرورت تلفیق قدرت تفکیک مکانی بالای Sentinel-2 با قابلیت‌های پیشرفته حرارتی Landsat است. تصاویر Sentinel-2 با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر در باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک، دقیق‌ترین ابزار برای آشکارسازی تغییرات کالبدی و مرزهای فضاهای سبز شهری (بدون تداخل با پیکسل‌های ترکیبی آسفالت و ابنیه) به شمار می‌رود (Drusch et al., 2012). از سوی دیگر، تصاویر Landsat با دارا بودن باندهای حرارتی دقیق در پنجره‌های اتمسفری (با قدرت تفکیک ۱۰۰ متر که به ۳۰ متر باز نمونه‌سازی می‌شود)، استانداردترین مرجع برای استخراج دمای سطح زمین (LST) و ارزیابی استرس‌های کیفی و فیزیولوژیک گیاهان هستند (Gorelick et al., 2017). تلفیق این دو سنجنده به عنوان یک رویکرد چندسنجنده‌ای هم‌افزا، محدودیت‌های تک‌سنجنده‌ای را برطرف کرده و ارزیابی همزمان وسعت لکه و سلامت اکولوژیک را با بالاترین دقت ممکن میسر می‌سازد (Guzinski and Nieto, 2019). انتخاب سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۲۴ به عنوان نقاط عطف این مطالعه براساس ساختار موجود در این شهر صورت گرفته است. سال ۲۰۱۸ بازه زمانی است که شهر جدید مهاجران فازهای کلیدی توسعه کالبدی و کاشت توده‌های فضای سبز دست‌کاشت را به اتمام رسانده و به یک پایداری نسبی در منظر شهری

^۱Vegetation Condition Index (VHI)

^۲Temperature Condition Index (TCI)

دست یافته بود؛ از این رو این سال به عنوان خط مبنا انتخاب شد تا اثرات بلندمدت اقلیمی بر فضاهای ایجاد شده سنجیده شود. سال ۲۰۲۴ نیز به عنوان آخرین سال بازه آماری در دسترس، پویایی‌های معاصر و وضعیت کنونی تاب‌آوری شهر را منعکس می‌کند. این بازه ۶ ساله، برای آشکارسازی تغییرات کیفی ساختاری پوشش گیاهی تحت تأثیر تنش‌های هیدرولوژیک و حرارتی در اقلیم‌های نیمه‌خشک کاملاً کفایت می‌کند.



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی در کشور ایران و استان مرکزی
Figure 1. Location of the study area in Iran and Markazi Province

جدول ۱- مشخصات داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده

Table 1. Characteristics of the satellite datasets used in this study

منبع داده	سنجنده	قدرت تفکیک مکانی (متر)	بازه زمانی	کاربرد در تحقیق
Sentinel-2 (S2_SR)	MSI	10	2018-2024	محاسبه NDVI و استخراج مساحت زیرساخت سبز
Landsat 8/9 (C2_L2)	TIRS	30	2018-2024	استخراج دمای سطح زمین (LST) و شاخص TCI
Landsat 8/9 (C2_L2)	OLI	30	2018-2024	محاسبه VCI و تلفیق در شاخص سلامت (VHI)

در مرحله دوم، جهت تفکیک زیرساخت‌های سبز از بافت شهری و اراضی بایر، شاخص NDVI محاسبه گردید. با توجه به ویژگی‌های بیوفیزیکی مناطق نیمه‌خشک، آستانه فنی ۰/۳ به‌عنوان مرز جداسازی تعریف شد (Gandhi et al., 2015). این فرآیند منجر به تولید "ماسک باینری فضای سبز" گردید که در آن پیکسل‌های دارای پوشش گیاهی فعال با مقدار ۱ و سایر عوارض با مقدار ۰ مشخص شدند. این مرحله زیربنای محاسبات آماری برای تعیین مساحت دقیق (به هکتار) و پایش تغییرات کالبدی زیرساخت سبز در طول دوره ۶ ساله پژوهش را تشکیل می‌دهد.

با توجه به تأثیر مستقیم تنش‌های حرارتی بر زیرساخت‌های سبز در اقلیم‌های نیمه‌خشک، استخراج دمای سطح زمین با استفاده از باندهای حرارتی ماهواره لندست (باند ۱۰) انجام شد. فرآیند تبدیل عدد دیجیتال به دمای درخشندگی و سپس اعمال ضریب گسیل‌مندی (Emissivity) برای محاسبه دمای واقعی به درجه سلسیوس صورت گرفت. این لایه اطلاعاتی به‌عنوان متغیر اصلی در محاسبه شاخص شرایط دمایی به کار گرفته شد تا نقش خنک‌کنندگی زیرساخت‌های سبز و میزان فشار حرارتی وارده بر آنها به‌صورت فضایی مدل‌سازی شود. در این مرحله، ارزیابی کیفی از طریق تلفیق شاخص‌های VCI (برآمده از NDVI) و TCI (برآمده از LST) انجام پذیرفت (Kogan, 1995). شاخص VHI با نرمال‌سازی داده‌ها بین بازه ۰ تا ۱، تصویری جامع از سلامت اکوسیستم ارائه می‌دهد. این شاخص نه تنها تراکم گیاه، بلکه میزان شادابی و مقاومت آن در برابر تنش‌های محیطی را نیز نشان می‌دهد (Bento et al., 2018). مقادیر نزدیک به ۱ نشان‌دهنده سلامت کامل و عملکرد بهینه زیرساخت سبز، و مقادیر نزدیک به ۰ نشان‌دهنده استرس شدید و زوال کیفی پوشش گیاهی است (Bento et al., 2018). در گام نهایی، با استفاده از توابع تحلیل‌های مکانی، نقشه‌های تغییرات مساحت و نقشه‌های کیفیت با هم تلفیق شدند. در این مرحله، لایه VHI صرفاً بر روی محدوده ماسک شده فضای سبز اعمال گردید تا تحلیل‌های کیفی تحت تأثیر پیکسل‌های غیرگیاهی قرار نگیرد. این رویکرد متقاطع، امکان شناسایی نقاطی را فراهم آورد که علی‌رغم حفظ مساحت (کمیت)، دچار افت کیفیت (سلامت) شده‌اند؛ موضوعی که در مدیریت زیرساخت‌های سبز مناطق نیمه‌خشک برای تخصیص منابع آبی و احیای پوشش گیاهی اهمیت راهبردی دارد. در ادامه روش محاسبه شاخص‌های مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده است.

۱. شاخص وضعیت پوشش گیاهی (Vegetation Condition Index – VCI)

شاخص VCI برای نرمال‌سازی مقادیر NDVI در بازه زمانی مورد نظر استفاده می‌شود. این شاخص وضعیت فعلی پوشش گیاهی را نسبت به حداقل و حداکثر پتانسیل تاریخی آن در منطقه می‌سنجد و اثرات توپوگرافی و اکوسیستمی را خنثی می‌کند. فرمول محاسبه آن به شرح رابطه ۱ است.

رابطه ۱:

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$

در این معادله، NDVI مقدار پیکسل در زمان مورد مطالعه، و $NDVI_{max}$ و $NDVI_{min}$ به ترتیب بیشینه و کمینه مقدار شاخص در منطقه مورد مطالعه هستند. مقادیر نزدیک به ۱ در این شاخص نشان‌دهنده رشد بهینه و شرایط ایده‌آل پوشش گیاهی است، در حالی که مقادیر نزدیک به ۰ نشان‌دهنده تأثیر منفی عوامل محیطی بر تراکم و شادابی گیاه است.

۲. شاخص وضعیت دمایی (Temperature Condition Index – TCI)

شاخص TCI جهت ارزیابی میزان استرس حرارتی وارده بر زیرساخت‌های سبز استفاده می‌شود. برخلاف NDVI، دمای بالا معمولاً نشان‌دهنده شرایط نامطلوب برای سلامت گیاه است؛ بنابراین در این فرمول، جهت مقادیر معکوس می‌شود تا با منطق

VCI (عدد بزرگتر = سلامت بیشتر) همخوانی داشته باشد (Seiler et al., 1998). روش محاسبه این شاخص در رابطه ۲ نشان داده شده است.

رابطه ۲:

$$TCI = \frac{LST_{max} - LST}{LST_{max} - LST_{min}}$$

که LST دمای سطح زمین استخراج شده از باندهای حرارتی لندست، و LSTmax و LSTmin حدود دمایی منطقه هستند. زمانی که دمای واقعی به دمای بیشینه نزدیک شود، مقدار TCI به صفر میل می‌کند که نشان‌دهنده استرس حرارتی شدید است. این شاخص در مناطق نیمه‌خشک مانند مهاجران، حیاتی‌ترین متغیر برای شناسایی جزایر حرارتی شهری است.

۳. شاخص نهایی سلامت گیاهی (Vegetation Health Index – VHI)

شاخص VHI یک مدل ادغامی است که از ترکیب خطی دو شاخص فوق حاصل می‌شود. این شاخص بیانگر برآیند اثرات متقابل "تراکم گیاهی" و "فشار حرارتی" است و به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین معیار سنجش کیفیت زیرساخت سبز شناخته می‌شود و از رابطه ۳ به‌دست می‌آید (Bento et al., 2018).

رابطه ۳:

$$VHI = 0.5 \times VCI + 0.5 \times TCI$$

در این تحقیق، وزن دو شاخص برابر در نظر گرفته شده است ($\alpha=0.5$). این رابطه تبیین می‌کند که سلامت یک زیرساخت سبز تنها به "سبز بودن" (VCI) وابسته نیست، بلکه به "توان خنک‌کنندگی" و "عدم استرس دمایی" (TCI) نیز بستگی دارد. مقادیر VHI معمولاً به پنج طبقه از "تنش شدید" (>0.2) تا "سلامت عالی" (<0.8) طبقه‌بندی می‌شوند که مبنای تحلیل کیفیت زیرساخت سبز در این تحقیق شناخته می‌شود.

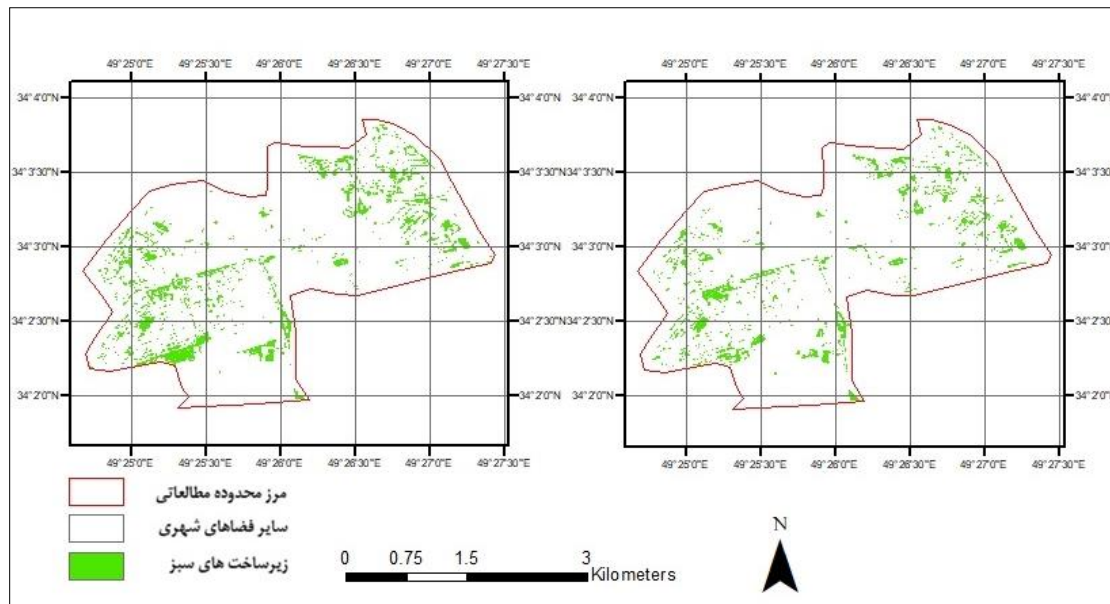
یافته‌های پژوهش

بر پایه تحلیل‌های محاسباتی صورت گرفته بر روی تصاویر ماهواره‌ای ستینل-۲ با قدرت تفکیک ۱۰ متر، پویایی مساحتی زیرساخت‌های سبز شهر مهاجران در یک دوره شش‌ساله مورد ارزیابی دقیق قرار گرفت. با اعمال آستانه سخت‌گیرانه ۰/۳ بر شاخص نرمال شده پوشش گیاهی، جداسازی پیکسل‌های گیاهی از عوارض مصنوعی و اراضی بایر پیرامونی با دقت بالایی انجام شد که نتایج آن نشان‌دهنده نوسانات معنی‌دار در وسعت لکه‌های سبز است (شکل ۲). این تغییرات کمی که برحسب هکتار استخراج شده‌اند، بازتابی از برآیند سیاست‌های توسعه فضای سبز و در مقابل، نرخ تخریب یا تغییر کاربری اراضی ناشی از گسترش کالبدی شهر هستند. در واقع، تغییر در مساحت کل زیرساخت سبز در این اقلیم نیمه‌خشک، تابعی از پایداری منابع آبی و توان اکولوژیک منطقه برای حفظ پوشش گیاهی در مواجهه با پیشروی بافت‌های نفوذناپذیر شهری است که در نقشه‌های خروجی به‌وضوح قابل رهگیری می‌باشد.

۲. تحلیل فضایی الگوهای توسعه (Gain) و زوال (Loss):

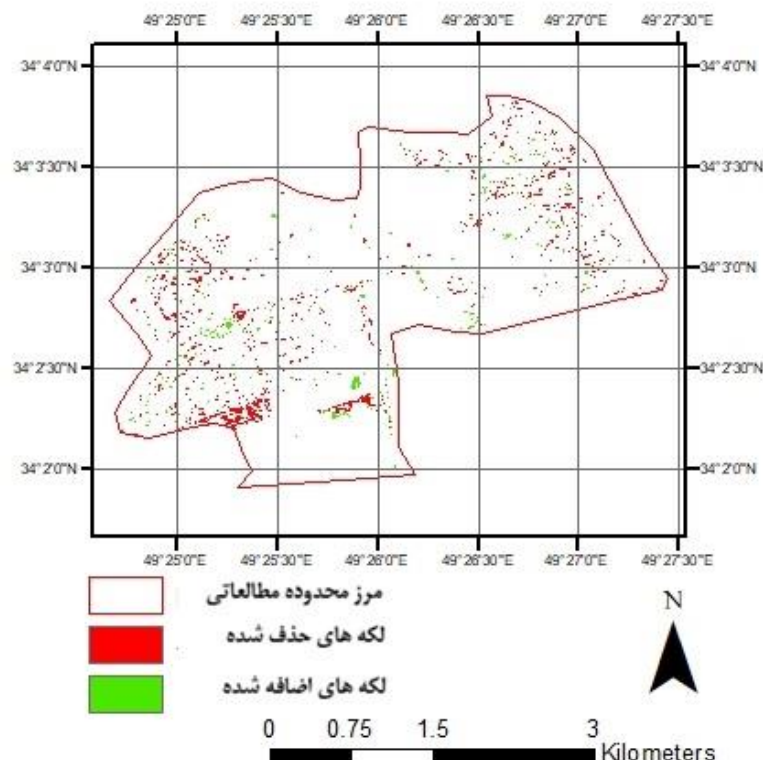
نقشه آشکارسازی تغییرات مکان‌مند (شکل ۳)، منعکس‌کننده نحوه پیاده‌سازی سیاست‌های توسعه کالبدی و چالش‌های اجرایی مدیریت شهری در شهر جدید مهاجران است. واکاوی هندسه پدید آمده نشان می‌دهد که لکه‌های جدید فضای سبز (Gain) عمدتاً ماهیتی هدایت‌شده و دست‌کاشت دارند که در قالب طرح‌های تفصیلی جدید، کمربندهای محصورکننده شاهراه‌های ارتباطی و پهنه‌های خدماتی فازهای تازه مسکونی ایجاد شده‌اند؛ این امر نشان‌دهنده تعهد اولیه ساختار برنامه‌ریزی به حفظ سرانه‌های پیش‌بینی شده است. در مقابل، بررسی علل شکل‌گیری لکه‌های تخریب (Loss) نشان می‌دهد که حذف پوشش گیاهی فراتر از تغییر کاربری‌های فیزیکی ناشی از ساخت و ساز، ریشه در ناهمگامی سرعت توسعه کالبدی با ظرفیت منابع آب پایدار در اقلیم نیمه‌خشک دارد. تبدیل باغچه‌های شهری و توده‌های سبز به اراضی بایر، گویای این واقعیت است که شبکه توزیع و نگهداری فضای سبز نتوانسته است همپای توسعه افقی شهر، پایداری جریان آب را در فازهای قدیمی‌تر تضمین کند. این تحلیل فضایی ثابت می‌کند که مشکل اصلی منظر شهری مهاجران، کمبود فضا برای کاشت نیست، بلکه فقدان یک نظام یکپارچه "مدیریت

زون‌بندی و نگهداری پویای منابع" است. در نتیجه، این نقشه ابزاری حیاتی برای تغییر استراتژی شهرداری از توسعه شتاب‌زده پهنه‌های جدید به سمت باززنده‌سازی و ثبات‌بخشی به لکه‌های موجود و آسیب‌پذیر به‌شمار می‌رود.



شکل ۲- توزیع فضایی زیرساخت‌های سبز در شهر مهاجران در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۲۴

Figure 2. Spatial distribution of urban green infrastructure in Mohajeran in 2018 and 2024

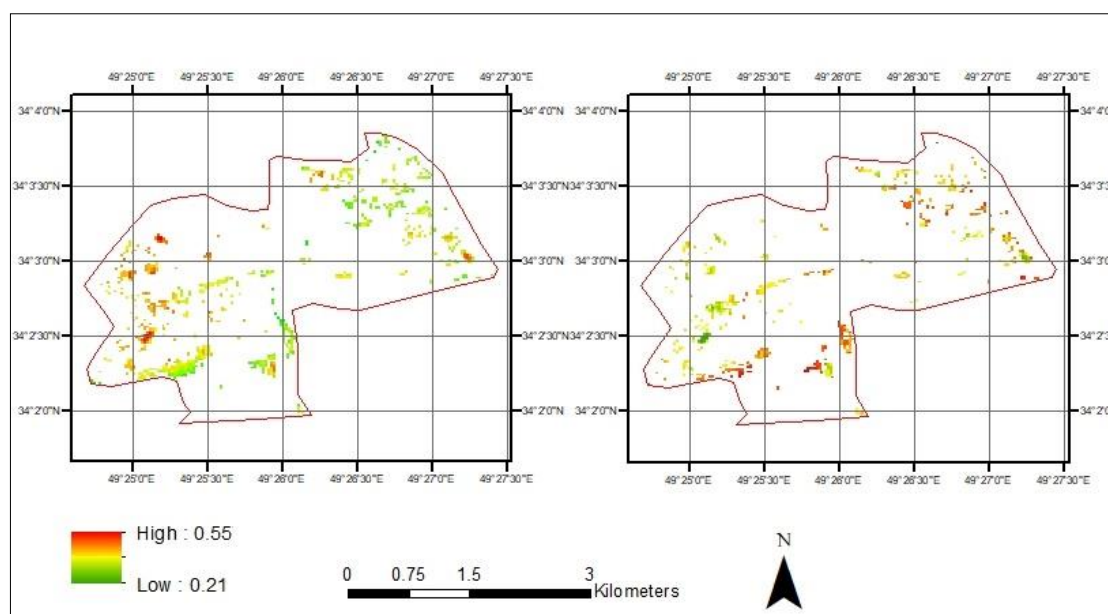


شکل ۳- نقشه تغییرات زیرساخت‌های سبز و الگوهای توسعه و زوال آن

Figure 3. Spatial patterns of urban green infrastructure gain and loss in Mohajeran

شکل ۴ شاخص سلامت گیاهی را در دو سال ۲۰۱۸ و ۲۰۲۴ نشان داده است. همان‌طور که مشخص است، تحلیل وضعیت کیفی زیرساخت سبز در سال ۲۰۱۸ براساس شاخص سلامت گیاهی، نشان‌دهنده دوره‌ای از پایداری نسبی در عملکردهای اکوسیستمی

شهر مهاجران است. در این سال، تلفیق شاخص‌های VCI و TCI نشان داد که بخش اعظمی از فضاها سبز شهری نه تنها از نظر تراکم گیاهی در وضعیت مطلوبی بوده‌اند، بلکه از نظر توانمندی در تعدیل دمای خرداقلیم نیز کارایی بالایی داشته‌اند. مقادیر میانگین VHI در این بازه زمانی حکایت از آن دارد که زیرساخت‌های سبز به دلیل برخورداری از رطوبت کافی و تنش حرارتی کمتر، قادر به ایفای نقش‌های حیاتی خود از جمله ترسیب کربن و ایجاد جزایر سرمایشی بوده‌اند. این وضعیت به عنوان "نقطه مرجع سلامت" در این پژوهش قلمداد شده که هرگونه انحراف از آن در سال‌های آتی، نشان‌دهنده تأثیر منفی عوامل محیطی یا انسانی بر کیفیت محیط‌زیستی شهر است. در سال ۲۰۲۴، نتایج حاصل از شاخص VHI پیچیدگی‌های جدیدی را در وضعیت سلامت زیرساخت سبز شهری آشکار ساخت که نشان‌دهنده افزایش فشارهای محیطی در اقلیم نیمه‌خشک است. نقشه کیفی این سال نشان می‌دهد که علی‌رغم وجود پوشش گیاهی در بسیاری از نقاط، شاخص سلامت به سمت مقادیر پایین گرایش پیدا کرده است که این امر ریشه در افزایش دمای سطح زمین و کاهش شاخص TCI دارد. به عبارت دیگر، گیاهان شهری در سال ۲۰۲۴ با استرس گرمایی شدیدتری نسبت به دوره گذشته مواجه بوده‌اند که منجر به کاهش شادابی و افت عملکردهای بیوفیزیکی آنها شده است. این زوال کیفی که لزوماً با تغییر مساحت همراه نیست، زنگ خطری برای پایداری زیرساخت‌های سبز محسوب می‌شود؛ چرا که گیاهان تحت استرس، مقاومت کمتری در برابر آفات و بیماری‌ها داشته و هزینه‌های نگهداری آن‌ها برای مدیریت شهری به‌طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابد.



شکل ۴- توزیع فضایی شاخص سلامت گیاهی را در دو سال ۲۰۲۴ و ۲۰۱۸
Figure 4. Spatial distribution of the Vegetation Health Index in 2018 and 2024

یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق، شناسایی مناطقی است که دچار "پارادوکس سبز" شده‌اند؛ یعنی مناطقی که از نظر کمی (مساحت) ثابت مانده یا حتی رشد داشته‌اند، اما از نظر کیفی (سلامت) با افت شدید مواجه گشته‌اند. در مناطق نیمه‌خشک، مشاهده صرف لکه‌های سبز در نقشه‌های NDVI کافی نیست، زیرا ممکن است یک فضای سبز وسیع به دلیل آبیاری نامناسب یا گونه‌بندی غیربومی، عملاً کارکرد خنک‌کنندگی خود را از دست داده و خود به منبعی برای جذب حرارت تبدیل شود. نتایج ماسک‌گذاری VHI بر روی لایه‌های فضای سبز به‌خوبی نشان داد که کیفیت زیرساخت سبز در شهر مهاجران به‌شدت تحت تأثیر جزایر حرارتی شهری قرار گرفته است. این یافته بر این اصل تأکید دارد که مدیریت شهری باید پارادایم خود را از "توسعه کالبدی فضای سبز" به سمت "ارتقای تاب‌آوری و سلامت اکولوژیک" تغییر دهد تا پایداری خدمات اکوسیستمی تضمین شود.

تحلیل و تبیین داده‌های آماری مندرج در جدول ۲، تصویری دقیق از دگرگونی‌های ساختاری زیرساخت سبز شهر مهاجران در یک بازه شش‌ساله ارائه می‌دهد. براساس این ارقام، مساحت کل فضای سبز شهری با کاهشی چشمگیر از ۷۵/۵۳ هکتار در سال

۲۰۱۸ به ۵۷/۲۸ هکتار در سال ۲۰۲۴ رسیده است که افت حدود ۴۷ درصدی در وسعت کالبدی این زیرساخت‌ها را تأیید می‌کند. این تغییرات کمی نشان‌دهنده آن است که فرآیندهای توسعه فیزیکی و تراکم ساختمانی، بخش قابل توجهی از پهنه‌های سبز را در بافت شهری حذف کرده و یا به دلیل خشکسالی‌های پیاپی، تراکم گیاهی در نیمی از اراضی به زیر آستانه بحرانی ($NDVI > 0.3$) تنزل یافته است. این روند کاهشی در مساحت، زنگ خطری جدی برای پایداری اکولوژیک شهر مهاجران محسوب می‌شود و ضرورت بازنگری در برنامه‌های حفظ زیرساخت‌های سبز موجود را بیش از پیش نمایان می‌سازد.

در تحلیل ابعاد کیفی، میانگین شاخص سلامت گیاهی (VHI) نوسان بسیار ناچیزی را تجربه کرده و از مقدار ۰/۴۰ به ۰/۴۱ رسیده است که نشان‌دهنده ثبات نسبی در شادابی پیکسل‌های باقیمانده است. با این حال، کاهش مقدار کمینه سلامت از ۰/۲۲ به ۰/۲۱، تا حدودی حکایت از تشدید استرس فیزیولوژیک در کانون‌های بحرانی و آسیب‌پذیر شهر دارد که مستقیماً تحت تأثیر افزایش دمای سطح زمین و تنش‌های حرارتی قرار گرفته‌اند. ثبات در مقدار بیشینه سلامت (۰/۵۵) نیز گویای این واقعیت است که ظرفیت اکولوژیک منطقه برای ارتقای کیفیت فضای سبز در شرایط اقلیمی فعلی به سقف پتانسیل خود رسیده است. این واگرایی میان افت شدید مساحت و ثبات نسبی میانگین سلامت، اثبات می‌کند که مدیریت شهری باید به جای تمرکز بر آمارهای میانگین، بر کنترل نقاط بحرانی و جلوگیری از گسترش پهنه‌های تحت تنش متمرکز شود.

جدول ۲- مقایسه‌ای شاخص‌های کمی و کیفی (۲۰۱۸-۲۰۲۴)

Table 1. Comparison of quantitative and qualitative indicators (2018-2024)

متغیر ارزیابی	سال ۲۰۱۸ (مبنا)	سال ۲۰۲۴ (ثانویه)	تحلیل تغییرات
مساحت کل فضای سبز (هکتار)	75.53	57.28	پایش تغییر کالبدی زیرساخت
میانگین سلامت گیاهی (VHI)	0.40	0.41	ارزیابی شادابی و تاب‌آوری
حداقل سلامت (Min VHI)	0.22	0.21	شناسایی کانون‌های بحرانی تنش
حداکثر سلامت (Max VHI)	0.55	0.55	

این پژوهش نشان داد که استفاده از تکنولوژی سنجش از دور ابری در سامانه ارث انجین امکان پایش همزمان کمیت و کیفیت را با کمترین هزینه و بالاترین سرعت فراهم می‌کند. نتایج نهایی به روشنی نشان می‌دهند که برای حفظ زیست‌پذیری در اقلیم نیمه‌خشک، لزوماً نیاز به افزایش مساحت نیست، بلکه بهینه‌سازی سلامت زیرساخت‌های موجود از طریق مدیریت هوشمند حرارتی و آبیاری هدفمند، اولویت اول را دارد. نتایج این تحقیق، به‌عنوان لایه‌های پایه در GIS شهری، می‌تواند برای شناسایی دقیق اولویت‌های عملیاتی مورد استفاده قرار گیرند تا از هدررفت منابع در مناطقی که پتانسیل احیا ندارند جلوگیری شده و منابع مالی به‌سمت لکه‌های سبز با ارزش اکولوژیک بالاتر سوق داده شوند.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان‌دهنده یک دگرگونی کالبدی عمیق در زیرساخت سبز شهر مهاجران است؛ جایی که مساحت فضاهای سبز از ۷۵/۵۳ هکتار در سال ۲۰۱۸ با افتی ۴۷ درصدی به ۵۷/۲۸ هکتار در سال ۲۰۲۴ رسیده است. این کاهش شدید مساحتی با نتایج Biswa و همکاران (۲۰۲۵) همخوانی دارد که معتقدند در فازهای تکمیلی توسعه شهری، فضاهای سبز باقیمانده اغلب قربانی ساخت‌وسازهای متراکم می‌شوند. با این حال، ثبات نسبی میانگین شاخص VHI علی‌رغم افت مساحت، نشان‌دهنده این واقعیت است که لکه‌های سبز حذف شده عمدتاً از نوع اراضی بایر یا پوشش‌های تنک با کیفیت پایین بوده‌اند و هسته‌های اصلی فضای سبز تحت مدیریت، توانسته‌اند سطح سلامت خود را حفظ کنند.

در اقلیم‌های نیمه‌خشک، مشاهده صرف لکه‌های سبز در نقشه‌های NDVI کافی نیست، زیرا ممکن است گیاهان از نظر طیفی سبز به نظر برسند اما کارکرد اکولوژیک خود را از دست داده باشند. یافته‌های ما نشان داد که علی‌رغم ثبات میانگین سلامت، مقدار کمینه VHI کاهش یافته است که این نتیجه با تئوری "سبزینگی کاذب" Karnieli و همکاران (۲۰۱۰) مطابقت دارد. آنها استدلال می‌کنند که گیاهان در مناطق نیمه‌خشک ممکن است به دلیل تنش‌های حرارتی شدید (TCI پایین)، دچار استرس

فیزیولوژیک شوند (Karnieli et al., 2010). در مهاجران نیز افزایش دمای سطح زمین باعث شده تا حتی در پهنه‌های باقیمانده، آستانه‌های بحرانی استرس لمس شود که این امر لزوم بازنگری در گونه‌های گیاهی مقاوم به گرما را تبیین می‌کند. تلفیق شاخص‌های VCI و TCI در این پژوهش ثابت کرد که سلامت زیرساخت سبز در شهر مهاجران به‌شدت تحت تأثیر جزایر حرارتی شهری قرار دارد. افت شاخص TCI که ریشه در افزایش دمای سطح زمین دارد، مستقیماً شاخص VHI را تحت فشار قرار داده است.

استفاده همزمان از سنتینل-۲ برای کمیت و لندست برای کیفیت (VHI)، دقت این پژوهش را نسبت به مطالعات تک سنجنده‌ای که صرفاً بر NDVI تکیه می‌کنند، به مراتب افزایش داده است. یافته‌های این تحقیق تأیید می‌کند که در مناطق نیمه‌خشک، به دلیل تداخل طیفی خاک و پوشش گیاهی تنک، شاخص‌های ترکیبی مانند VHI قدرت تفکیک بسیار بالاتری برای پایش سلامت اکوسیستم ارائه می‌دهند و خطای ناشی از "سبزی‌نگی پس‌زمینه" را به حداقل می‌رسانند.

در نهایت، نتایج تأیید می‌کند که زیرساخت سبز مهاجران از یک مرحله "توسعه کالبدی" به یک مرحله "بحران کیفی و کاهش وسعت" گذار کرده است. برخلاف دهه‌های گذشته که تمرکز بر کاشت درختان بیشتر بود، نتایج این پژوهش ثابت می‌کند که اکنون اولویت با "حفاظت کیفی" و مدیریت لبه‌های حرارتی است. پیشنهاد می‌شود شهرداری مهاجران با استفاده از نقشه‌های Gain/Loss و VHI مستخرج از این تحقیق، تخصیص منابع آبی را براساس شدت استرس حرارتی انجام دهد. این استراتژی، هم‌سو با سیاست‌های "شهر سبز پایدار"، از هدررفت منابع در مناطقی که پتانسیل احیا ندارند جلوگیری کرده و منابع مالی را به سمت لکه‌های سبز با ارزش اکولوژیک بالاتر سوق می‌دهد.

پژوهش حاضر با بهره‌گیری از توان محاسباتی سامانه Google Earth Engine و تلفیق داده‌های چندسنجندهای Sentinel-2 و Landsat 8/9، به ارزیابی جامع زیرساخت‌های سبز شهر مهاجران پرداخت. نتایج نشان داد که از نظر کمی، توسعه کالبدی شهر با تعداد کاهش مساحت لکه‌های سبز همراه بوده است، از نظر کیفی نیز، شاخص سلامت گیاهی روند نگران‌کننده‌ای را نشان می‌دهد. افت شاخص VHI در سال ۲۰۲۴ نسبت به ۲۰۱۸، اثبات کرد که تنش‌های حرارتی در اقلیم نیمه‌خشک شهر مهاجران به مرحله‌ای رسیده است که کارایی اکولوژیک فضای سبز را تهدید می‌کند. این تحقیق نشان داد که زیرساخت سبز شهری در مناطق نیمه‌خشک بیش از آنکه نیازمند توسعه مساحتی باشد، نیازمند مدیریت تاب‌آوری حرارتی است.

این پژوهش علی‌رغم دستاوردهای متدولوژیک در بستر گوگل ارث انجین، با محدودیت‌هایی مواجه بوده است. نخست، عدم دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای حرارتی با قدرت تفکیک مکانی بالا (زیر ۳۰ متر) مانع از تحلیل دقیق‌تر اثرات ریزاقلیم‌ها و باغچه‌های خانگی بسیار کوچک بر پویایی‌های حرارتی شهر شد. دوم، محدودیت در داده‌های زمینی دبی و دوز آبیاری لکه‌های مختلف فضای سبز شهری توسط مدیریت شهری، امکان مدل‌سازی مستقیم رابطه استرس گیاهی با الگوهای هیدرولوژیک توزیع آب را با چالش مواجه ساخت. از طرفی، اگرچه تحلیل پویایی‌های کمی براساس میانگین‌گیری از تصاویر اوج فصل رشد (می تا سپتامبر) صورت گرفته است، اما تغییرات اقلیمی سالانه، جابجایی زمان طلوع فنوژیک گیاهان و نوسانات هیدرولوژیک دوره گرم سال در اقلیم نیمه‌خشک می‌تواند بر پاسخ‌های طیفی پوشش گیاهی اثرگذار باشد. از این‌رو، عبور لکه‌های حاشیه‌ای از حد آستانه ($NDVI=0/3$) و کاهش نزدیک به ۲۵ هکتاری فضای سبز کالبدی در این ساختار باغ شهری، ممکن است تا حدودی تحت تأثیر رفتارهای نوسانی فصلی پوشش گیاهی و پاسخ‌های بیوفیزیکی آن به بازه‌های کوتاه‌مدت تنش آبی قرار گرفته باشد که این امر تعمیم‌دهی مطلق آمار کاهش مساحتی را نیازمند احتیاط اکولوژیک بیشتری می‌سازد.

بر مبنای یافته‌های کمی و کیفی حاصل، اقدامات زیر جهت باززنده‌سازی و ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز شهر مهاجران پیشنهاد می‌گردد: ۱. تغییر پارادایم از توسعه مساحتی به حفظ ساختاری: مدیریت شهری مهاجران باید از تعریف فازهای جدید کاشت خودداری کرده و بودجه‌های موجود را بر ثبات‌بخشی و بهبود سلامت لکه‌های آسیب‌دیده کنونی (پهنه‌های با $VHI=0/3$) متمرکز کند. ۲. پیاده‌سازی زون‌بندی حرارتی منظر: با توجه به خروجی‌های شاخص TCI، لکه‌های فضای سبز حاشیه جاده‌ها و فازهای متراکم مسکونی به‌عنوان کانون‌های بحرانی استرس شناسایی شده‌اند؛ بنابراین تغییر گونه‌های گیاهی موجود به گونه‌های بومی، خشکی‌پسند و مقاوم به تنش‌های حرارتی در این زون‌ها الزامی است. ۳. مدیریت هوشمند توزیع منابع آب: طراحی یک شبکه یکپارچه آبیاری براساس پایش آنالین استرس گیاهی (با بهره‌گیری از آستانه‌های سنجش‌ازدوری استخراج شده در این

مقاله) به منظور بازتوزیع بهینه آب به سمت لکه‌های در آستانه زوال، به عنوان یک ضرورت اجرایی به شهرداری مهاجران پیشنهاد می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه ملایر انجام شد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنهاد مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان (نویسنده مسئول) قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظراتی و علمی سپاسگزاری می‌شود.

References

- Alaei, N., Mostafazadeh, R., Moezzi pour, B., Hussain, S., Hosseinzadehniri, M., 2025. The impact of urbanization on green spaces spatial pattern from 2003 to 2017: a landscape metrics analysis in Ardabil city, Iran. *Environmental Science and Pollution Research* 32(38), 22331-22345.
- Albert, J., 2020. A Nature Walk a Day, Keeps Unhappiness Away : Restorative Campus Environments and Student Well-Being.
- Bento, V.A., Gouveia, C.M., DaCamara, C.C., Trigo, I.F., 2018. A climatological assessment of drought impact on vegetation health index. *Agricultural and Forest Meteorology* 259, 286-295.
- Biswas, P., Kumar, A., Upreti, M., Kumar, G., Saikia, P., 2025. Kolkata's green oasis: a comprehensive analysis of urban green spaces for ecosystem sustainability. *Environmental Science and Pollution Research* 32(9), 5040-5061.
- Camacho-Cervantes, M., Schondube, J.E., Castillo, A., MacGregor-Fors, I., 2014. How do people perceive urban trees? Assessing likes and dislikes in relation to the trees of a city. *Urban Ecosystems* 17(3), 761-773.
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36.
- Gandhi, G.M., Parthiban, B.S., Thummalu, N., Christy, A., 2015. Ndvi: Vegetation change detection using remote sensing and gis—A case study of Vellore District. *Procedia Computer Science* 57, 1199-1210.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202, 18-27.
- Grabowski, Z.J., McPhearson, T., Matsler, A.M., Groffman, P., Pickett, S.T., 2022. What is green infrastructure? A study of definitions in US city planning. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1-9.
- Guzinski, R., Nieto, H., 2019. Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 and Sentinel-3 satellites for high-resolution evapotranspiration estimations. *Remote Sensing of Environment* 221, 157-172.
- Jamali, F. S., Khaledi, S., Razavian, M.T., 2021. Priority Areas for Developing Green Infrastructure in Semi-arid Cities: A Case Study of Tehran. *Environment and Urbanization ASIA* 12(1), 118-135.
- Kadić, A., Maljković, B., Rogulj, K., Pamuković, J.K., 2025. Green Infrastructure's Role in Climate

- Change Adaptation: Summarizing the Existing Research in the Most Benefited Policy Sectors. Sustainability (Switzerland) 17(9).
- Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R.T., Anderson, M., Imhoff, M.L., Gutman, G.G., Panov, N., Goldberg, A., 2010. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. Journal of Climate 23(3), 618-633.
- Kogan, F.N., 1995. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. Advances in Space Research 15(11), 91-100.
- Pfeiffer, D., Cloutier, S., 2016. Planning for Happy Neighborhoods. Journal of the American Planning Association 82(3), 267-279.
- Saeedi, I., Darabi, H., 2019. Ecological landscape design in semi-arid areas on basis of water sensitive urban design approach (case study: Mohajeran city). Journal of Environmental Studies 44(4), 689-701.
- Saeedi, I., Mikaeili Tabrizi, A.R., Bahreman, A., Salmanmahiny, A., 2022. A soft systems methodology and interpretive structural modeling framework for Green infrastructure development to control runoff in Tehran metropolis. Natural Resource Modeling e12339.
- Seiler, R.A., Kogan, F., Sullivan, J., 1998. AVHRR-based vegetation and temperature condition indices for drought detection in Argentina. Advances in Space Research 21(3), 481-484.
- Sethi, D., Mamatha, N., Upadhyay, M., Islam, A., Ravinder, B., Band, G., 2025. Integration of Green Infrastructure in Urban Design: Enhancing Ecological and Social Resilience. Journal of Applied Bioanalysis 11(2), 307-316.
- Teimouri, R., Yigitcanlar, T., 2018. An approach towards effective ecological planning: Quantitative analysis of urban green space characteristics. Global Journal of Environmental Science and Management 4(2), 195-206.