



Analyzing the Relationship Between Spatial Configuration of Green Infrastructure and Land Surface Temperature in Hot, Dry Cities

Hassan Darabi^{*1}, Iman Saeedi²

¹ Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

² Natural Resources and Enviroments Faculty, Malayer Univesity, Malayer, Iran

Abstract

The Urban Heat Island (UHI) phenomenon poses a fundamental challenge to quality of life and environmental sustainability, particularly in arid regions. Despite the recognized role of green spaces in temperature modulation, understanding the impact of their spatial configuration on thermal performance in arid climates requires deeper investigation. Accordingly, this study aims to quantitatively analyze the relationship between the spatial structure of green infrastructure and Land Surface Temperature (LST) intensity in the historical city of Yazd, as an example of a desert metropolis. Conducted within the framework of landscape ecology using Sentinel-2 and Landsat 9 satellite imagery during the summer of 2024, this research extracted green patches and calculated the Green Space Heat Mitigation Index (GS-HMI). Spatial configuration was analyzed at landscape, class, and patch levels using metrics from FRAGSTATS software. Relationships between structural and functional indices were tested using multivariate linear regression.

The results revealed a predominantly fragmented spatial structure in Yazd's green infrastructure, with a noticeable absence of large patches. Patches with optimal thermal performance (coolest) exhibited significantly higher Clumpiness Index (CLUMPY) and lower edge density (adjacency). Regression analysis explained approximately 68% of the variation in cooling performance through three key configuration metrics: clumpiness, largest patch index (LPI), and edge density. The findings clearly demonstrate that in the arid climate of Yazd, *how green areas are spatially organized* is more determinant than their *total area*. Designing *large, compact green spaces with simplified boundaries* emerges as a key strategy for maximizing cooling efficiency and mitigating the urban heat island effect. This study provides a methodological framework integrating remote sensing, functional performance indices, and landscape metrics, offering practical insights for urban planners and designers in arid cities.

Keywords: Landscape Ecology; Urban Heat Island (UHI); Thermal Performance; Ecological Design; Environmental Resilience

^{*}Corresponding Author: Hassan Darabi

Email: darabih@ut.ac.ir

Phone: 09121484692

Doi: 10.48306/juem.2026.564751.1129



مقاله پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۱۶

تحلیل رابطه پیکره‌بندی فضایی زیرساخت‌های سبز و دمای سطحی شهرهای گرم و خشک

حسن دارابی^{*}، ایمان سعیدی^۲

^۱ دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران

^۲ گروه محیط زیست دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه ملایر، ملایر

چکیده

پدیده جزیره حرارتی شهری (UHI) به‌ویژه در مناطق خشک، چالشی اساسی برای کیفیت زندگی و پایداری محیطی محسوب می‌شود. باوجود نقش شناخته‌شده فضاهای سبز در تعدیل دما، درک تأثیر پیکره‌بندی فضایی این فضاها بر عملکرد حرارتی آنها در اقلیم‌های خشک نیاز به تامل و تدبیر دارد. براین اساس هدف این پژوهش، تحلیل رابطه کمی بین ساختار فضایی زیرساخت سبز و شدت دمای سطح زمین (LST) در شهر تاریخی یزد به‌عنوان نمونه‌ای از یک کلان‌شهر کویری است. این پژوهش در چارچوب رویکرد اکولوژی سیمای سرزمین و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و Landsat 9 در تابستان ۱۴۰۳ انجام شد. پس از استخراج لکه‌های سبز و محاسبه شاخص کاهش حرارت فضای سبز (GS-HMI) پیکره‌بندی فضایی با متریک‌های نرم‌افزار FRAGSTATS در سطوح سیمای سرزمین، کلاس و لکه تحلیل شد. روابط بین شاخص‌های ساختاری و عملکردی با استفاده از رگرسیون خطی چندمتغیره آزمون گردید. نتایج این بررسی نشان داد که در زیرساخت سبز شهر یزد ساختاری پراکنده حکم‌فرماست و فقدان لکه‌های بزرگ مشهود است. لکه‌های با عملکرد حرارتی بهینه (خنک‌ترین)، به طور معناداری از شاخص خوشه‌بندی (CLUMPY) بالاتر و تراکم مرز (مجاورت) پایین‌تری برخوردار بودند. تحلیل رگرسیون تبیین حدود ۶۸٪ از تغییرات عملکرد خنک‌کنندگی را توسط سه شاخص خوشه‌بندی، بزرگ‌ترین لکه و تراکم مرز نشان داد. یافته‌های این پژوهش به‌وضوح اثبات می‌کنند که در اقلیم خشک یزد، چگونگی سازمان‌دهی فضایی عرصه‌های سبز، از مساحت کل آنها تعیین‌کننده‌تر است. طراحی فضاهای سبز بزرگ، فشرده و با مرزهای ساده به‌عنوان راهبردی کلیدی برای حداکثرسازی کارایی خنک‌کنندگی و کاهش اثر جزیره حرارتی شهری می‌توان نقش تعیین‌کننده در تعدیل جزایر حرارتی دمای سطحی زمین داشته باشد.

کلمات کلیدی: فضای سبز، رگرسیون، جزایر حرارتی، متریک‌های سیمای سرزمین

۱- مقدمه

افزایش گرمای شهری تحت تاثیر تغییرات اقلیمی بر کیفیت زندگی، سلامت عمومی و مصرف انرژی در شهرهای مناطق خشک و نیمه خشک تأثیر قابل توجهی دارد [۱، ۲]. دمای سطحی زمین (LST) که منجر به پدیده جزیره حرارتی شهری (UHI) می گردد، یکی از چالش های اساسی طراحی و برنامه ریزی شهری در مناطق گرم و خشک محسوب می شود [۳، ۴]. این پدیده در مناطق خشک و نیمه خشک ایران نقش مهمی در کیفیت محیط زیست شهری ایفا می کند. [۵، ۶] مناطق خشک و نیمه خشک (۴۱٪ از سطح خشکی های جهان) با چالش هایی مانند کمبود رطوبت، شدت تابش خورشید، نوسانات بالای دمای شبانه روز و پوشش گیاهی محدود مواجه هستند که محیط آنها را منحصر به فرد می سازد [۳، ۴]. این ویژگی ها باعث شکل گیری و دینامیک UHI متفاوت تر از مناطق مرطوب می شود [۵].

باعنایت به تشدید تغییرات اقلیمی و شدت یافتن دماهای حدی، توجه به راهکارهای کاهش تأثیرات جزایر حرارتی شهری ضرورتی اجتناب ناپذیر است [۶، ۷]. زیرساخت های سبز (GIS) با وجود ویژگی های فیزیکی و ساختاری خاص، توانایی تعدیل دمای محیط شهری را دارا هستند [۸، ۹]. با این حال، شواهد متعددی وجود دارد که کارایی خنک کنندگی فضاهای سبز، الزاما تابع رابطه خطی با مساحت نیست [۱۰، ۱۱]، بلکه کارایی آنها رابطه ای مستقیم با پیکره بندی فضایی، توزیع، مساحت و همچنین نوع ارتباط آنها با ماتریس شهری دارد [۱۲]. بنابراین بهینه سازی طراحی شهری مستلزم درک عمیق رابطه بین ساختار فضایی زیرساخت های سبز و عملکرد حرارتی آنها است که در اقلیم های خشک که با چالش های مانند محدودیت های منابع آبی و پوشش گیاهی مواجه هستند [۱۳، ۱۴].

مطالعات گسترده ای در سطح ملی به بررسی موضوع جزیره حرارتی شهری و دمای سطحی (رابطه کلاسیک بین شاخص های پوشش گیاهی مانند NDVI و LST) پرداخته اند، به عنوان نمونه، عابدینی و همکاران (۱۴۰۳) رابطه کاهش اثرات جزایر حرارتی را با استفاده از مصالح خنک در شهر تبریز مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که رنگ و ماهیت مصالح ساختمانی مانند مصالح روسازی با بازتابش بیشتر نقش تعیین کننده ای در افزایش جزایر حرارتی شهر دارد [۱۵]. احمدی و داداشی پور (۱۳۹۵) با بررسی ترکیبات زیست و نازیستا در شکل گیری جزایر حرارتی شهری شهر مشهد، نشان داده اند که وسعت جزایر حرارتی در حال افزایش است، ضمن این که رابطه معناداری میان شاخص های زیست و نازیستا مانند NDBI، NDVI و NDBAI وجود دارد [۱۶]. حاج فتحعلی و همکاران (۱۳۹۹) ضمن شناسایی عوامل موثر در شکل گیری جزایر حرارتی، اقدام به ارائه راهکارهایی برای کاهش اثرات این جزایر نموده اند [۱۷]. منصوریان و عسکرزاده (۱۴۰۴) اقدام به بررسی راهکارهای مختلفی برای کاهش اثرات جزایر حرارتی مانند استفاده از پوشش گیاهی و بهبود زیرساخت های شهری کرده اند و در نهایت استفاده از فناوریهای نوین در این راستا را مورد تحلیل قرار داده اند [۱۸]. مرادی و رضایی مقدم (۱۳۹۹) در مطالعه جزایر حرارتی شهر ارومیه بیانگر آن بود که جزایر این شهر رو به افزایش است این افزایش هم دال بر گسترش فضایی و شدت و حدت آنها است [۱۹]. عظیمی و همکاران (۱۴۰۱) عقیده دارند که نوع کاربری نقش تعیین کننده ای در شکل گیری جزایر حرارتی به طور اخص در شهر اهواز دارد [۲۰]. فیروزی و همکاران (۱۴۰۲) نشان داده اند که کاهش فضاهای دارای پوشش گیاهی منجر به افزایش جزایر حرارتی شده است [۲۱]. محمودزاده و همکاران (۱۳۹۷) نشان داده اند که میان شاخص NDVI و دمای سطحی زمین ارتباط متقابل وجود دارد [۲۲]. اگرچه این پژوهش ها ضمن توجه به وجود و شدت پدیده UHI در شهرهای ایران عمدتا بر مساحت کل زیرساخت های سبز یا همبستگی ساده آن با دما تمرکز داشته اند. بر همین اساس تحلیل کمی پیکربندی فضایی و الگوهای اتصال این فضاها در سطح سیمای سرزمین کمتر مورد توجه بوده است [۱۷].

در همین زمینه یک گروه از پژوهش های بین المللی به رابطه معکوس قوی بین پوشش گیاهی (NDVI) و UHI پرداخته اند [۱۸]. درحالی که گروه دیگر نقش تعیین کننده شاخص های پیکره بندی فضایی (مانند اندازه، شکل، تراکم و پیوستگی لکه های سبز) را در کارایی خنک کنندگی را روشن کرده اند. به عنوان مثال احمد و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه ای بر روی شهر دهلی، نشان دادند که پوشش سبز (۴۷/۳۴٪) و مناطق ساخته شده (۴۴/۵۷٪) در ترکیب کاربری اراضی این شهر حاکم هستند و شدت جزیره حرارتی شهری در این شهر از ۸،۱۳ درجه سانتی گراد در فوریه تا ۱۰،۲۹ درجه سانتی گراد در ژوئن متغیر است. [۲۳].

¹ Land Surface Temperature

² Urban Heat Island

³ Green Infrastructures

در مطالعه دیگری، لیو و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که جزیره حرارتی در شهرهای خشک می‌تواند کوچک یا حتی منفی (جزیره سرد شهری) باشد [۲۴]. سینگ و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای در شهر جاییور در هند با اقلیم نیمه‌خشک، با استفاده از تحلیل هم‌پوشانی درصد سطح ساختمان‌ها، کاربری اراضی و دمای سطح زمین در مقیاس محله‌ها، نشان دادند که تحقیقات قبلی درباره اثرات سطحی جزیره حرارتی در این شهر وجود داشته است [۲۵]. مرور سابقه تحقیق بیانگر آن است که علی‌رغم پیشرفت‌های روش‌شناختی دال بر درک رابطه بین پیکره‌بندی فضایی زیرساخت‌های سبز و جزایر حرارتی، و دمای سطحی در اقلیم‌های خشک، اما هنوز این روش‌ها در حد کافی توسعه نیافته‌اند. با توجه به این که رفتار حرارتی زیرساخت‌ها در این قبیل از مناطق از الگوهای ویژه خود تبعیت می‌کنند امکان استفاده از الگوهای شناخته شده در سایر اقلیم‌های در مناطق خشک چندان عقلانی به نظر نمی‌رسد.

در سال (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای بر روی چهار پارک شهری در شهر ریاض عربستان سعودی، کارایی خنک‌کنندگی پارک‌ها را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 و ۹ نشان داد که شدت خنک‌کنندگی فصلی در تابستان بیشترین میزان (تا ۱۷۲٫۵ متر) و در زمستان کمترین میزان را (۱۲۷٫۵ متر) داشته است [۲۶]. آبادرابو و همکاران (۲۰۲۵) استراتژی‌های مختلف کاهش اثرات جزایر حرارتی را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که انتخاب مناسب مواد بازتابندگی بالا و ایجاد زیرساخت‌های سبز با ساختار مناسب می‌تواند به‌طور مؤثری به کاهش دمای محیط‌های شهری کمک کند [۲۷]. محمد (۲۰۲۵) با مطالعه خود در مصر به معرفی شاخص جدیدی برای مقابله با جزایر حرارتی تحت عنوان HAPI اقدام کرده است [۲۸]. در مطالعه دیگری رابطه بین فضاهای سبز و آبی در مصر بررسی شده است و نشان می‌دهد که دما بین ۳٫۳ تا ۱۲٫۲ درجه سانتیگراد با حضور زیرساخت‌های سبز و آبی تعدیل می‌شود [۲۹]. لی، وانگ و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که ساختمان‌ها و سطوح ناتراوا منجر به افزایش دما سطحی شده و عرصه فضاهای سبز با شاخص NDVI بالاتر اثر معکوس بر دما سطحی دارند [۳۰]. به همین نحو شی و همکاران در سال ۲۰۲۳ نتیجه‌ای مشابه را گرفته و رابطه همبستگی معادل ۰٫۸ در این زمینه را ارائه کرده‌اند [۳۱]. از طرف دیگر وانگ و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که درختان موجود در فضاهای شهری نقش تعیین‌کننده‌ای بر کاهش و تعدیل دما سطحی شهری ایفا می‌کنند. بر همین اساس بر الگوی مناسب کاشت درختان شهری تاکید کرده‌اند [۳۲]. در همین رابطه بالیست و همکاران به خوبی نشان داده‌اند که وجود زیرساخت‌های سبز می‌تواند نقش تعیین‌کننده در تعدیل جزایر حرارتی شهری داشته باشد [۷].

با تحلیل عمیق و تعمق در مرور پیشینه، به‌وضوح سه شکاف کلیدی پژوهشی به شرح زیر آشکار شد:

الف) محدودیت مطالعاتی که به‌طور خاص و با استفاده از روش‌شناسی استوار، رابطه پیکره‌بندی فضایی (و نه صرفاً مساحت) زیرساخت سبز را با دمای سطحی و جزایر حرارتی در شهرهای واقع در اقلیم خشک تحلیل کنند. همانطور که لیو و همکاران (۲۰۲۴) اشاره کردند، بیشتر مطالعات تجربی در زمینه زیرساخت‌های سبز و UHI در مناطق معتدل یا مرطوب انجام شده‌اند و کمتر به ویژگی‌های خاص مناطق خشک پرداخته شده است [۲۴]. در حالی که عبدل حسانی و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که شهرهای خشک ممکن است رفتار حرارتی متفاوتی نسبت به شهرهای مرطوب داشته باشند [۳۳].

ب) در بخش قابل توجه‌ای از مطالعات داخلی پیکره‌بندی فضایی نادیده گرفته شده است. ضمن اینکه به شکل نسبی تحلیل‌های چندمقیاسی و نقش مقیاس در این مطالعات داخلی توجه جدی مبذول نشده است. این درحالی است که موضوع مذکور در مطالعات بین‌المللی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۳۴، ۳۵]. به عنوان مصداق سینگ و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که بررسی در مقیاس محله برای توسعه استراتژی‌های هدفمند بسیار مؤثرتر است [۲۵]. ضمن این که نباید از خاطر برد که تعریف نامناسب مناطق شهری و روستایی می‌تواند نتایج را تحت تأثیر قرار دهد.

ج) با بذل عنایت به دو محور قبلی، محور سوم به شرح زیر هویدا می‌گردد که عبارت است از نیاز به توسعه و آزمون شاخص‌های ارزیابی عملکردی (مانند شاخص کاهش حرارت) که کارایی خنک‌کنندگی خالص فضای سبز را در برابر ماتریس شهری پیرامون بر مبنای مباحث مطرح شده، ارائه می‌دهد. پژوهش حاضر با انتخاب شهر تاریخی یزد به‌عنوان نمونه‌ای شاخص از یک کلان‌شهر کویری ایران، به دنبال پاسخ و پرداختن به این شکاف‌ها است. این پژوهش با به‌کارگیری هم‌زمان شاخص کاهش حرارت فضای سبز (GS-HMI) و تحلیل‌های چندمقیاسی پیکره‌بندی فضایی در چارچوب اکولوژی سیمای سرزمین، رویکردی نوین را برای ارزیابی عملکرد

شاخصی است که توسط محمد (۲۰۲۵) برای اولویت‌بندی مداخلات سازگاری با گرما در مناطق شهری (Heat Adaptation Priority Index (HAPI معرفی شده است.

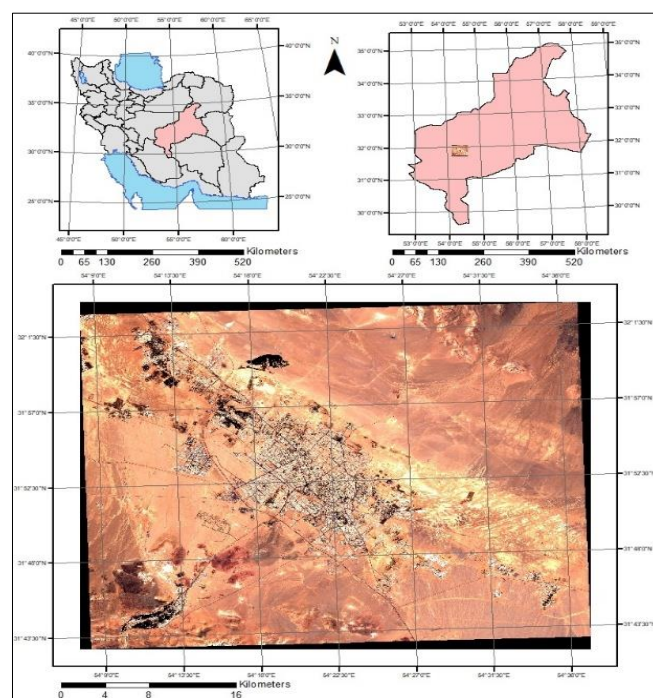
حرارتی زیرساخت‌های سبز در شهرهای خشک ارائه می‌دهد. براین اساس، سؤالات اصلی تحقیق به شرح زیر تعریف می‌شوند که این تحقیق در پی پاسخ به آن است:

۱. وضعیت کلی پیکربندی فضایی زیرساخت سبز در خوشه شهری یزد بر اساس شاخص‌های سیمای سرزمین چگونه است؟
۲. چه رابطه‌ای بین شاخص‌های پیکربندی فضایی (در سطح کلاس و لکه) با عملکرد حرارتی خالص (GS-HMI) زیرساخت سبز در این شهر وجود دارد؟
۳. چگونه می‌توان از یافته‌های این تحلیل چندمقیاسی برای ارائه رهنمودهای برنامه‌ریزی و طراحی فضای سبز به منظور کاهش مؤثر پدیده جزیره حرارتی شهری در اقلیم خشک یزد بهره برد؟

۲- روش تحقیق

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و محدوده‌های جغرافیایی

مطالعه حاضر به بررسی پیکربندی فضایی و عملکرد حرارتی زیرساخت سبز (GI) در شهر یزد و محدوده‌های اقماری پیرامون آن می‌پردازد؛ این مجموعه شهری شامل شهرهای رضوان شهر، فیروزآباد، فهرج، جم، و تفت در استان یزد است (شکل ۱). این خوشه شهری در قلب کویر مرکزی ایران واقع شده و از اقلیم خشک و نیمه‌خشک براساس طبقه‌بندی کوپن (BWh) پیروی می‌کند. با توجه به شدت بالای پدیده جزیره حرارتی شهری (Urban Heat Island, UHI) در مناطق خشک به‌ویژه در ساعات اوج تابستان، تعیین محدوده مطالعاتی به‌صورت یک سامانه شهری یکپارچه، تحلیل را پویاتر و کاربردی‌تر می‌سازد [۳۶]. برای تعریف محدوده جغرافیایی، از مختصات جغرافیایی مرکز شهر یزد (31.8973°N , 54.3675°E) به‌عنوان نقطه مبدأ استفاده و یک بافر دایره‌ای با شعاع ۲۵ کیلومتر حول آن اعمال گردید. این شعاع، بر اساس شعاع UHI ثبت‌شده در شهرهای مشابه در ایران مثلاً در کرمان: ۲۲ km، و با توجه به پوشش کامل شهرهای اقماری مذکور، انتخاب شد [۳۷]. همچنین، به‌منظور اطمینان از تمرکز تحلیل بر قلب گرم شهری، یک ماسک شهری (Urban Mask) بر اساس طبقه “Urban and Built-up Lands” در محصول MODIS MCD12Q1 (نسخه ۶،۱) برای سال ۲۰۲۴ استخراج و بر تمام لایه‌ها اعمال شد [۳۸]. این اقدام، از ورود پیکسل‌های کشاورزی، بایر یا طبیعی که می‌توانند میانگین LST ماتریس شهری را دستکاری کنند جلوگیری می‌کند.



شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعاتی در ایران و استان یزد

۲-۲- جمع‌آوری و پیش‌پردازش داده‌های ماهواره‌ای

برای انجام تحلیل‌های کمی، مجموعه داده‌های ماهواره‌ای با وضوح مکانی و زمانی بالا برای دوره اوج تنش حرارتی یعنی تابستان (از ۱۵ ژوئن تا ۱۵ سپتامبر) جمع‌آوری و پردازش شدند. برای استخراج دمای سطح زمین (LST) با وضوح حرارتی بالا، از داده‌های باند حرارتی ماهواره Landsat 9 (Collection 2, Tier 1, Level 2) استفاده شد که این تصاویر ابتدا مورد فیلترگذاری ابری ($< 1\%$) قرار گرفتند تا کیفیت داده‌ها تضمین شود. مقادیر دیجیتال دمای سطح زمین خام، با اعمال ضرایب مقیاس‌دهی و تبدیل حرارتی استاندارد، از کلوین به واحد اندازه‌گیری درجه سلسیوس تبدیل شدند. در مرحله بعد، به منظور محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی با جزئیات بالا، از داده‌های چند طیفی Sentinel-2 (Level 2A) با وضوح مکانی ۱۰ متر استفاده شد تا مرزهای فضاهای سبز بادقت پیکسل بالا تعریف شوند.

۲-۳- استخراج زیرساخت سبز و طبقه‌بندی عملکرد حرارتی

فرایند استخراج زیرساخت سبز (GI) از طریق محاسبه شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی (NDVI) بر اساس باندهای نزدیک مادون قرمز (B8) و قرمز (B4) تصاویر Sentinel-2 انجام پذیرفت. سپس، پیکسل‌های دارای NDVI بزرگ‌تر یا مساوی آستانه ۰٫۲۵ به عنوان GI در نظر گرفته شدند؛ این آستانه با توجه به ماهیت پوشش گیاهی کم‌پشت و غالباً خشک در مناطق کویری یزد، به شکلی تنظیم شده است که بیشترین همخوانی با پوشش گیاهی موجود را داشته باشد. لازم به ذکر است با عنایت به آستانه ۰٫۲۵ برای NDVI، این حد آستانه به بهترین شکل نماینده لکه‌های گیاهی در اقلیم خشک یزد می‌شود. بر همین اساس نیز قادر است تا پوشش گیاهی کم‌پشت و پراکنده را نیز به عنوان لکه سبز شناسایی می‌کند. از این رو موضوع مذکور صرفاً یک واقعیت زمینی را منعکس می‌کند. به منظور اعتبارسنجی این آستانه اقدام به نمونه‌گیری میدانی از پوشش گیاهی در ۵۰ نقطه تصادفی شده حاصل آن با تصاویر با وضوح بالا (Google Earth) مقایسه شد.

شاخص کاهش حرارت فضای سبز^۱ (GS-HMI)، برای محاسبه اثربخشی فضاهای سبز شهری بر دمای سطحی زمین محاسبه شد. این شاخص یک معیار کمی و پیکسلی است که به منظور اندازه‌گیری و ارزیابی مستقیم میزان پتانسیل خنک‌کنندگی یک قطعه فضای سبز در مقایسه با بافت گرم شهری اطراف خود، توسعه یافته است. هدف اصلی این شاخص، فراتر از صرفاً اندازه‌گیری دمای مطلق فضای سبز (LST) و تعیین عملکرد خالص آن در کاهش پدیده جزیره حرارتی شهری (UHI) است. این شاخص به‌ویژه در مطالعاتی که به دنبال بهینه‌سازی طراحی اکولوژیکی فضاهای سبز هستند، کاربرد دارد، زیرا نشان می‌دهد که یک قطعه GI تا چه میزان می‌تواند دمای محیط خود را از دمای پایه ماتریس شهری داغ‌تر پایین‌تر آورد.

شاخص کاهش حرارت فضای سبز به صورت اختلاف بین دمای سطح زمین (LST) ماتریس ساخته‌شده شهری و دمای سطح زمین پیکسل‌های فضای سبز محاسبه می‌شود (فرمول ۱) و در واقع میزان کاهش دمایی ایجاد شده توسط فضای سبز را نسبت به پس‌زمینه شهری نمایش می‌دهد. نکته حایز اهمیت در این راستا عبارت است از این که GS-HMI به جای دمای مطلق، عملکرد خالص خنک‌کنندگی را نسبت به ماتریس شهری می‌سنجد و در اقلیم خشک که اختلاف دمای پس‌زمینه زیاد است، معیار دقیق‌تری ارائه می‌دهد.

فرمول ۱:

$$GS-HMI = LST_{BU} - LST_{GS}$$

در این فرمول:

LST_{BU} برابر با دمای سطح زمین بافت ساخته‌شده است. این متغیر، میانگین دمای سطح زمین در پیکسل‌هایی است که

به عنوان بافت ساخته‌شده شهری (Built-Up) یا مناطق غیر گیاهی در منطقه مورد مطالعه تعریف شده‌اند.

LST_{GS} برابر با دمای سطح زمین فضای سبز است. این مقدار، دمای سطح زمین (LST) پیکسل مجزا در محدوده فضای

سبز است.

^۱ Green Space Heat Mitigation Index

در ادامه، با طبقه‌بندی شاخص کاهش حرارت فضای سبز به‌جای یک متغیر پیوسته، بر اساس میزان دمای سطح زمین (LST) خود به سه کلاس گسسته عملکرد حرارتی تقسیم شدند تا آماده تحلیل در نرم‌افزار FRAGSTATS گردند. برای تعریف این کلاس‌ها، ابتدا میانگین و انحراف معیار در شاخص کاهش حرارت فضای سبز محاسبه شد و آستانه‌های آماری برای تعیین لکه‌های «گرم‌ترین»، «متوسط» و «خنک‌ترین» تنظیم شدند. این طبقه‌بندی عملکردی، تحلیل قوی‌تری از تأثیر مستقیم شکل و اندازه لکه‌های GI بر کاهش دمای محلی را ممکن می‌سازد و بینش‌های برنامه‌ریزی دقیقی را فراهم می‌کند.

جدول ۱. شیوه طبقه‌بندی نقشه شاخص کاهش حرارت فضای سبز

شناسه کلاس	عملکرد دمایی	آستانه‌های (LST(°C)
۱	گرم‌ترین (Warmest)	$LST \geq \text{Mean LSTGS} + \sigma$
۲	متوسط (Average)	$LSTGS + \sigma \text{ Mean LSTGS} - \sigma < LST < \text{Mean}$
۳	خنک‌ترین (Coolest)	$LST \leq \text{Mean LSTGS} - \sigma$

۲-۴- تحلیل پیکربندی فضایی با شاخص‌های سیمای سرزمین

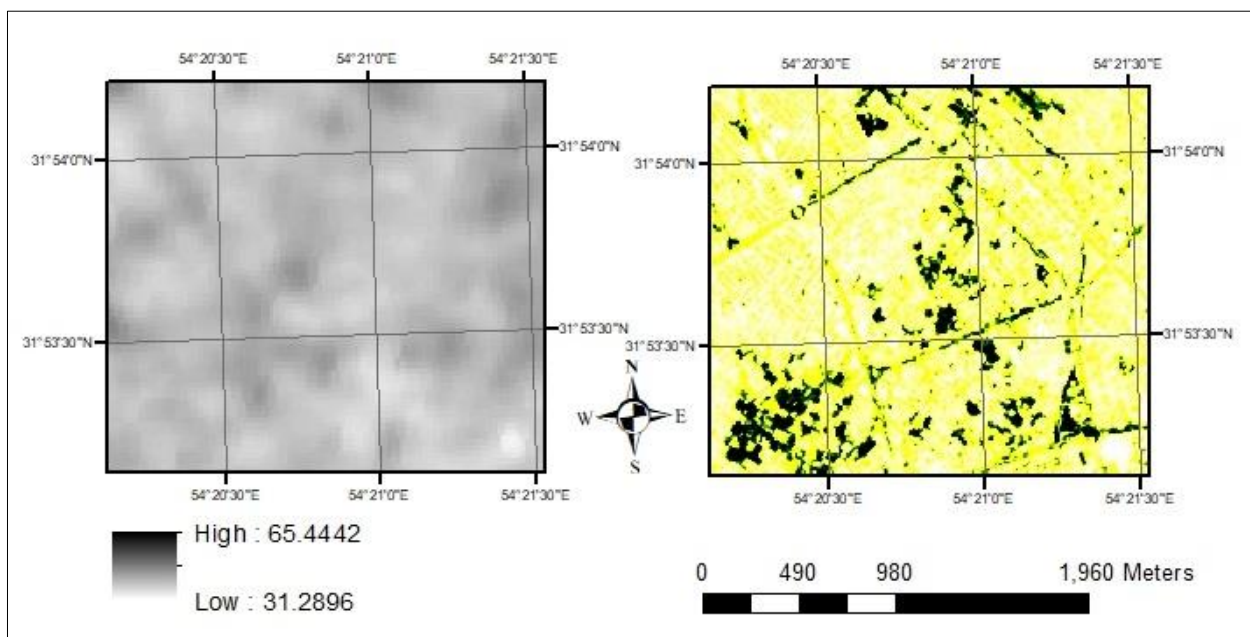
برای کمی‌سازی ارتباط بین عملکرد حرارتی و ساختار فضایی GI، از نرم‌افزار FRAGSTATS نسخه v4.2 برای محاسبه شاخص‌های سیمای سرزمین در سطوح مختلف استفاده شد. لازم به ذکر است اندازه نهایی سلول در نقشه زیرساخت سبز (مستخرج از سنسینل-۲) معادل ۱۰ متر و برای تحلیل حرارتی مستقل در وضوح ۳۰ متر انجام شد. نتایج گزارش شده پس از بازتحلیل، R^2 از ۰٫۶۸ به ۰٫۶۳ کاهش یافت. افزون بر این، قاعده همسایگی معادل ۸ پیکسل، کد پس‌زمینه معادل صفر، سطح محاسبه متریک‌ها نیز شامل patch و class، landscape محاسبه شده است. در سطح سیمای سرزمین شاخص‌هایی مانند تراکم لبه (ED) برای ارزیابی میزان کلی گسستگی (Fragmentation) و شاخص بزرگ‌ترین لکه (LPI) برای سنجش تسلط بزرگ‌ترین بخش GI محاسبه می‌شوند تا وضعیت اکولوژیکی کل منطقه مورد مطالعه مشخص گردد. در سطح کلاس (Class)، شاخص‌هایی نظیر تراکم لکه (PD) براساس واحد لکه در هکتار و شاخص خوشه‌بندی (CLUMPY) برای مقایسه میزان پراکندگی و تجمع لکه‌ها بین سه کلاس حرارتی «گرم‌ترین»، «متوسط» و «خنک‌ترین» به کار گرفته می‌شوند. شاخص‌های سطح لکه (Patch) نیز شامل میانگین شاخص‌های شکل (SHAPE) و نسبت محیط به مساحت (PARA) برای تعیین پیچیدگی هندسی، و شاخص پیوستگی (CONTIG) برای ارزیابی اتصال داخلی GI هستند؛ انتظار می‌رود لکه‌های خنک‌تر، دارای شکل‌های فشرده‌تر و پیوستگی داخلی بالاتری باشند. علاوه بر این، تحلیل مجاورت (Adjacency Analysis) با ایجاد ماتریس مجاورت، تعداد و نوع مرزهای مشترک بین هر کلاس GI و ماتریس شهری غیر گیاهی را مشخص می‌کند؛ این بخش برای درک میزان انتقال حرارت از مناطق داغ شهری به لکه‌های GI، به‌ویژه برای لکه‌های با عملکرد ضعیف، حیاتی است و بینش‌های ضروری را برای طراحی اکولوژیک فراهم می‌سازد.

۲-۵- تحلیل‌های آماری

برای کمی‌سازی و آزمون روابط بین شاخص‌های پیکربندی فضایی (مستقل) و شاخص عملکرد حرارتی GS-HMI (وابسته)، از تحلیل رگرسیون خطی چندمتغیره در نرم‌افزار SPSS استفاده شد. علاوه بر این، برای مقایسه تفاوت‌های معنادار بین میانگین شاخص‌های سیمای سرزمین در سه کلاس عملکردی حرارتی، آزمون تحلیل واریانس (ANOVA) یک‌طرفه به کار گرفته شد. سطح معناداری $P < 0.05$ در نظر گرفته شد. قابل ذکر است که حجم نمونه در تحلیل رگرسیون شامل ۴۴۷۵ لکه سبز بوده است. آزمون همگنی واریانس (Levene) انجام شد. ضمن این که شرط همگنی واریانس برای متغیرهای مستقل ($p > 0.05$) تأیید شد.

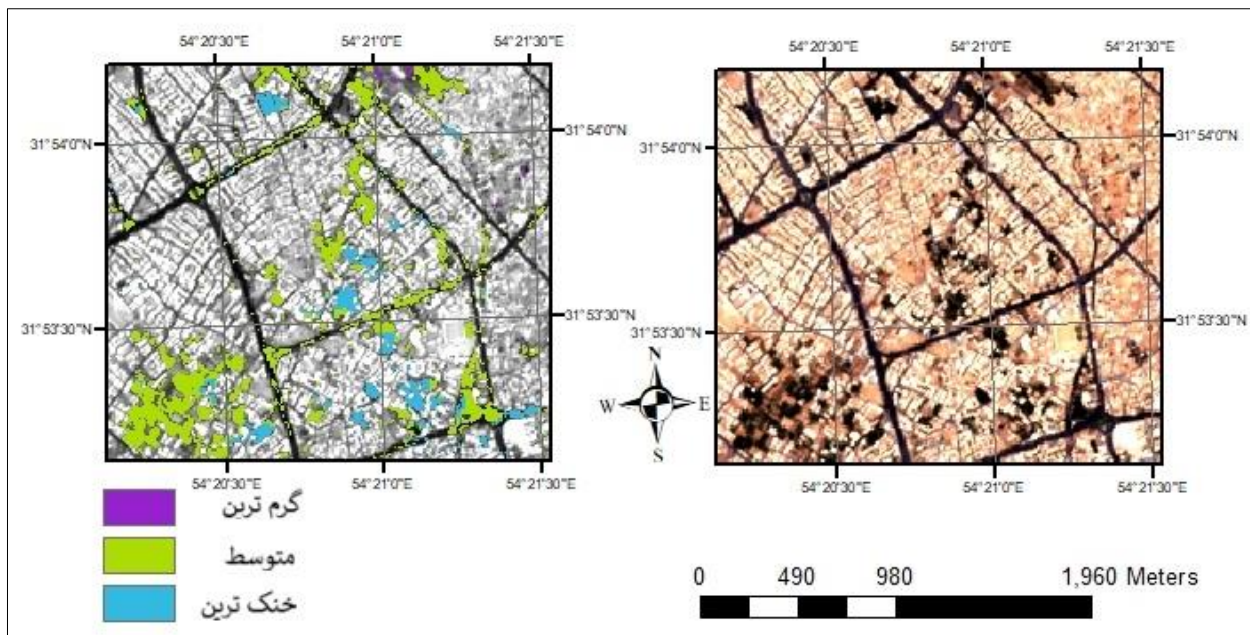
۳- نتایج

تحلیل داده‌های دمای سطح زمین (LST) استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای، زمینه‌ی حرارتی منطقه مورد مطالعه را در اوج دوره گرمای تابستان به‌وضوح ترسیم می‌کند که جزئیات آن با توجه به گستردگی محدوده مطالعاتی به شکل بخشی در شکل ۲ ارائه شده است. این نقشه به‌وضوح شدت پدیده جزیره حرارتی شهری (UHI) را در خوشه شهری یزد تأیید می‌کند، به‌طوری‌که مناطق بافت ساخته‌شده و سطوح نفوذناپذیر، بالاترین مقادیر دمایی را تجربه کرده و کانون‌های داغ را تشکیل داده‌اند. میانگین LST ماتریس غیرگیاهی شهری که به‌عنوان دمای مرجع محیط شهری عمل می‌کند، مقدار قابل توجه بالایی را نشان داد که بر وجود استرس حرارتی شدید در منطقه تأکید می‌کند. در مقابل، لکه‌های زیرساخت سبز با دماهای به‌مراتب پایین‌تر، به‌صورت جزایر خنک مشخصی در پس‌زمینه شهری داغ ظاهر شده‌اند.



شکل ۲. نقشه NDVI و LST در بخشی از محدوده مطالعاتی

برای حرکت از اندازه‌گیری صرف دمای مطلق به ارزیابی عملکرد خالص خنک‌کنندگی، شاخص کاهش حرارت فضای سبز محاسبه و نتایج آن در سه کلاس متمایز طبقه‌بندی شد که در بخشی از نقشه به جهت تفکیک بهتر و قدرت نمایش با کیفیت تر در شکل ۳ به نمایش درآمده است. این طبقه‌بندی، شالوده اصلی تحلیل سیمای سرزمین است، زیرا توانست لکه‌های GI را بر اساس خروجی حرارتی آن‌ها به سه گروه گرم‌ترین، متوسط و خنک‌ترین تفکیک کند. مشاهده زیرساخت سبز در این سه طبقه، توزیع نامتوازن پتانسیل خنک‌کنندگی را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که سهم قابل توجهی از مساحت کل زیرساخت سبز در کلاس متوسط قرار گرفته است، امری که بیانگر کارایی محدود و آسیب‌پذیری حرارتی بالای آن‌ها است. در مقابل، لکه‌های قرار گرفته در کلاس خنک‌ترین، نشان‌دهنده الگوی بهینه فضایی برای بیشینه‌سازی شاخص در برابر دمای سطحی زمین هستند. این نقشه طبقه‌بندی‌شده، پایگاه داده اصلی را برای تحلیل‌های بعدی FRAGSTATS فراهم کرده و امکان بررسی ارتباط میان هندسه فضایی و عملکرد حرارتی را میسر می‌سازد.



شکل ۳. تصویر ماهواره ای بخشی از محدوده مطالعاتی در کنار شاخص کاهش حرارت فضای سبز

۳-۱- ویژگی‌های کلی زیرساخت سبز در سطح سیمای سرزمین

یافته‌های حاصل از تحلیل فضایی با استفاده از نرم‌افزار FRAGSTATS در سطح منظر، وضعیت کلی سیمای سرزمین زیرساخت سبز (GI) در خوشه شهری یزد و مناطق اقماری آن را ترسیم می‌کنند. بر اساس خروجی‌ها، مجموع مساحت زیرساخت سبز (Total TA Area - در منطقه مورد مطالعه بالغ بر ۴۸۵/۸۸ هکتار است که سهم قابل توجهی از کل منطقه شهری را تشکیل می‌دهد. با این حال، شاخص تراکم لبه (ED) که میزان گسستگی لکه‌ها را اندازه‌گیری می‌کند، معادل ۳۹/۵۹۸۳ متر بر هکتار به دست آمد که نشان‌دهنده سطح متوسطی از پیچیدگی و مرزهای مشترک بین GI و ماتریس شهری است؛ این عدد در مقایسه با شهرهای متراکم‌تر، حاکی از یک ساختار نسبتاً پراکنده است که تبادل حرارتی با محیط اطراف را تشدید می‌کند. از سوی دیگر، شاخص بزرگترین لکه (LPI) که میزان تسلط بزرگترین قطعه GI بر کل منظر را نشان می‌دهد، مقدار نسبتاً پایینی معادل ۲/۷۵۵۸ درصد دارد که بیانگر عدم وجود لکه‌های بزرگ و غالب با قابلیت خنک‌کنندگی متمرکز است. این ویژگی ساختاری نشان می‌دهد که زیرساخت سبز یزد از نظر اندازه لکه، یکنواخت و دارای لکه‌های کوچک و پراکنده است و از مزایای خنک‌کنندگی مقیاس‌پذیر (Scale Effect) که در لکه‌های بزرگ‌تر مشاهده می‌شود، محروم است. علاوه بر این، شاخص تنوع شانون (SHDI) با مقدار ۱/۰۵۸۸، تنوع مناسبی از کلاس‌های عملکردی حرارتی در میان لکه‌های GI را تأیید می‌کند.

۳-۲- تحلیل پیکربندی فضایی در سطح کلاس عملکردی

نتایج تحلیل در سطح کلاس، ارتباط معناداری را بین عملکرد حرارتی (بر اساس LST طبقه‌بندی‌شده) و سازمان‌دهی فضایی لکه‌ها نشان می‌دهد. شاخص تراکم لکه (PD) که تعداد لکه‌ها در واحد سطح را بیان می‌کند، به‌وضوح نشان می‌دهد که کلاس‌های با عملکرد حرارتی ضعیف‌تر، با قطعه‌قطعه شدن بیشتری مواجه هستند؛ به‌طوری که کلاس «متوسط» بالاترین PD را با ۴۶۹/۲۵۱۷ لکه در هکتار به خود اختصاص داده است. این امر نشان‌دهنده آن است که لکه‌هایی با عملکرد حرارتی متوسط، اغلب به شکل بسیار ریز، نامنظم و فاقد پیوستگی در سطح شهر پراکنده‌اند که این ساختار مانع کارایی خنک‌کنندگی است. در مقابل، کلاس «خنک‌ترین» با بهترین عملکرد حرارتی، پایین‌ترین تراکم لکه را با ۱۶۹/۳۸۳۴ لکه در هکتار دارا است که بیانگر لکه‌های بزرگ‌تر و متمرکزتر است. این تفاوت در PD قویاً تأیید می‌کند که تجمع لکه‌های کوچک به لکه‌های بزرگ‌تر، یک استراتژی کلیدی برای ارتقاء عملکرد خنک‌کنندگی GI در اقلیم خشک است. نتایج تحلیل رگرسیون نشان داد که شاخص‌های CLUMPY ($\beta=0.72$) و LPI ($\beta=0.65$, $p<0.05$) قوی‌ترین رابطه مثبت را با مقادیر بالاتر GS-HMI (خنک‌کنندگی بهتر) دارند.

تحلیل شاخص خوشه‌بندی (CLUMPY) نیز این روند را به شکلی قاطع تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که لکه‌های با عملکرد حرارتی قوی، دارای انسجام و تجمع فضایی بالاتری هستند. کلاس «خنک‌ترین» با بالاترین مقدار CLUMPY معادل ۰/۶۸۴۸، بیشترین تجمع را نشان می‌دهد؛ این تجمع بالا، به لکه‌ها اجازه می‌دهد تا اثر «سایه اکولوژیکی» خود را تشدید کرده و از تبادل حرارتی ناخواسته با محیط شهری جلوگیری نمایند. در مقابل، کلاس «متوسط» کمترین مقدار CLUMPY یعنی ۰/۴۰۷۶ را داراست که نشان‌دهنده پراکندگی و جدایی فضایی این لکه‌ها از یکدیگر است. این پراکندگی، سطح تماس با ماتریس داغ شهری را افزایش داده و موجب ازدست‌رفتن سریع سرمای تولید شده در لکه می‌شود. نتایج در سطح کلاس، به‌وضوح اثبات می‌کنند که تنها مساحت زیرساخت سبز اهمیت ندارد، بلکه نحوه توزیع و سازمان‌دهی فضایی لکه‌ها تعیین‌کننده اصلی کارایی آن‌ها در کاهش دما است.

۳-۳- تحلیل مجاورت و رابطه با ماتریس شهری

تحلیل مجاورت، ارتباط مستقیمی را بین عملکرد حرارتی GI و میزان قرارگرفتن آن در معرض ماتریس شهری نشان می‌دهد. برای مقایسه عادلانه، میزان مجاورت با پس‌زمینه (Background Adjacency) بر اساس مساحت هر کلاس (CA) نرمال‌سازی شده است تا تراکم مرز مشترک در واحد هکتار به دست آید. یافته‌ها نشان دادند که کلاس «گرم‌ترین» بالاترین نرخ مجاورت با پس‌زمینه را با ۱۳۴/۲۵ واحد مرز در هکتار داراست، درحالی‌که این مقدار برای کلاس «خنک‌ترین» به طور چشمگیری کاهش یافته و به ۸۴/۰۶۶ واحد مرز در هکتار می‌رسد. این اختلاف فاحش، نقش حیاتی هندسه مرزی لکه‌های GI را در فرایندهای انتقال حرارت تأیید می‌کند. لکه‌های «گرم‌ترین» به دلیل اشکال نامنظم، باریک و دراز، دارای نسبت محیط به مساحت بیشتری هستند که منجر به افزایش سطح تماس آن‌ها با آسفالت و سطوح داغ شهری می‌شود. این تماس بالا، انتقال گرمای محسوس از ماتریس شهری به درون لکه GI را تسهیل کرده و توانایی آن در خنک‌سازی را به‌طور جدی تضعیف می‌کند. در نتیجه، برنامه‌ریزان شهری باید بر ساده‌سازی مرزهای فضاهای سبز و کاهش این نرخ مجاورت بالا تمرکز کنند تا پتانسیل خنک‌کنندگی کلاس‌های ضعیف ارتقا یابد. نگاهی به تحلیل رگرسیون رابطه معکوس و معناداری بین تراکم مرز با پس‌زمینه (مجاورت) و مقدار GS-HMI را تأیید کرد. ($\beta = -0.58$, $p < 0.05$)

جدول ۱. نتایج شاخص‌های سیمای سرزمین در سطح منظر برای زیرساخت سبز (GI) یزد

شاخص	مخفف	واحد	مقدار	تفسیر (اثرگذاری حرارتی)
مساحت کل	TA	ha	۴۸۵/۵۵	مساحت کل GI در محدوده مطالعاتی
بزرگ‌ترین لکه	LPI	%	۲/۷۵۵۸	تسلط کم لکه‌های بزرگ، ریسک بالای پراکندگی
تراکم لبه	ED	m/ha	۳۹/۵۹۸۳	تراکم مرز متوسط، پتانسیل بالای تبادل حرارتی
تنوع شانون	SHDI	-	۱/۰۵۸۸	توزیع نسبتاً یکنواخت کلاس‌های عملکردی

جدول ۲. نتایج شاخص‌های سیمای سرزمین در سطح کلاس‌های عملکردی حرارتی

کلاس عملکرد حرارتی	مساحت کل کلاس (CA - ha)	تعداد لکه‌ها (NP)	تراکم لکه (PD - Patch/ha)	شاخص خوشه‌بندی (CLUMPY)
۱. گرم‌ترین	۱۱۹/۸۰	۱۳۷۲	۲۸۲/۳۷	۰/۵۴۲۲
۲. متوسط	۲۲۷/۰۱	۲۲۸۰	۴۶۹/۲۵	۰/۴۰۷۶
۳. خنک‌ترین	۱۳۹/۰۷	۸۲۳	۱۶۹/۳۸	۰/۶۸۴۷
کل (GI)	۴۸۵/۸۸	۴۴۷۵	-	-

جدول ۳. تحلیل مجاورت کلاس‌های عملکردی GI با ماتریس شهری

کلاس عملکرد حرارتی	مجاورت کل با پس‌زمینه (تعداد پیکسل مرز)	مساحت کلاس (CA - ha)	تراکم مرز با پس‌زمینه (Edges/ha)
۱. گرم‌ترین	۱۶۰۸۳	۱۱۹/۸۰	۱۳۴/۲۵
۲. متوسط	۲۷۱۵۰	۲۲۷/۰۱	۱۱۹/۶۸
۳. خنک‌ترین	۱۱۶۹۱	۱۳۹/۰۷	۸۴/۰۶

۳-۴- جمع بندی کمی روابط ساختار - عملکرد

به طور خلاصه، باتوجه به این که مدل رگرسیون نهایی اجرا شده (جدول ۴)، نتیجه نشان داد که به طور تقریبی ۶۸٪ از تغییرات در عملکرد خنک کنندگی (GS-HMI) لکه های سبز در شهر یزد توسط سه شاخص پیکربندی فضایی شاخص خوشه بندی (CLUMPY)، بزرگ ترین لکه (LPI) و تراکم مرز (مجاورت) قابل تبیین است. نتایج حاصل از این یافته به صورت تجربی، برتری الگوهای فضایی بزرگ، متراکم و با مرزهای فشرده را نسبت به الگوهای کوچک، پراکنده و با مرزهای پیچیده و باریک در کارایی حرارتی در اقلیم خشک را نشان می دهد.

جدول ۴. نتایج مدل رگرسیون خطی چندمتغیره

متغیر مستقل	ضریب استاندارد شده (β)	خطای استاندارد	سطح معناداری (p-value)	VIF
CLUMPY	0.72	0.084	<0.01	1.89
LPI	0.65	0.091	<0.05	1.52
تراکم مرز (Adjacency)	-0.58	0.077	<0.05	1.43

جدول ۵. خلاصه آزمون های پیش فرض های آماری مدل رگرسیون

آماره مدل	مقدار
R^2	0.68
R^2 تعدیل شده	0.66
آماره F	28.34
سطح معناداری مدل	<0.001
آماره دوربین-واتسون	1.92

جزئیات کامل مدل رگرسیون در جدول ۴ ارائه شده است. براساس داده های این جدول، شاخص خوشه بندی (CLUMPY) با $\beta=0.72$ بیشترین تأثیر مثبت را بر عملکرد خنک کنندگی دارد. مقادیر R^2 تعدیل شده (۰,۶۶) و آماره دوربین-واتسون (۱,۹۲) نشان دهنده برازش خوب مدل و استقلال خطاهاست. همچنین جدول ۵ نتایج آزمون های پیش فرض آماری را نشان می دهد که دال بر تایید مفروضات رگرسیون خطی کلاسیک است. مقدار VIF برای همه متغیرها کمتر از ۲ است که نشان دهنده عدم هم خطی معنادار میان پیش بین ها است. آماره دوربین-واتسون نزدیک به ۲ بیانگر استقلال خطاهاست. مدل نهایی حدود ۶۸ درصد از تغییرات عملکرد خنک کنندگی (GS-HMI) را تبیین می کند.

۴- بحث

هدف اصلی این پژوهش تحلیل و بررسی تأثیر پیکربندی فضایی زیرساخت های سبز بر شدت دمای سطحی زمین شهر یزد واقع در اقلیم خشک انجام شد. در پژوهش سعی شد تا با استفاده از چارچوب اکولوژی سیمای سرزمین و شاخص کاهش حرارت فضای سبز (GS-HMI)، روابط ساختار - عملکرد در بستر خاص اقلیم خشک به صورت کمی مورد بررسی قرار گیرد. در راستای پاسخ به اولین سؤال در این تحقیق که در پی تبیین وضعیت پیکربندی فضایی زیرساخت سبز در اقلیم خشک یزد بود، نتایج زیر حاصل شد: تحلیل شاخص های سیمای سرزمین نشان می دهد که زیرساخت سبز شهر از ساختاری پراکنده و گسسته برخوردار است ضمن این که

فقدان لکه‌های غالب نیز مشهود می‌باشد. مقادیر عددی ارائه شده مرتبط با پایین شاخص بزرگ‌ترین لکه ($LPI=2.76\%$) و تراکم لکه نسبتاً بالا ($ED=39.60 \text{ m/ha}$) بیانگر آن است که در این شهر ماتریس شهری غیرسبز بر منظر تسلط دارد. ضمن این که مرزهای تماس حرارتی بین فضاهای سبز و سطوح گرم به دلیل همین تسلط گسترده است. نتیجه حاصل چنین ساختاری در اقلیم خشک یزد، اثر مضاعف آن بر کاهش کارایی خنک‌کنندگی زیرساخت‌ها است. چرا که تابش شدید خورشید و رطوبت پایین، وابستگی عملکرد حرارتی به ساختار فضایی فشرده را افزایش می‌دهد.

مقایسه این یافته با مرور ادبیات حکایت از آن دارد که این نتیجه با مطالعات ژو و همکاران (۲۰۱۱) و قریشی و همکاران (۲۰۲۳) همسو است چرا که این مطالعات بر اهمیت پیوستگی و اندازه لکه‌های سبز در عملکرد حرارتی تأکید دارند [۳۹، ۴۰]. البته باید در نظر داشت که در مقایسه با یافته آیین (۲۰۲۵) در شهر ریاض با اقلیم مشابه، که در آن پارک‌های کوچک‌تر نیز کارایی خنک‌کنندگی قابل توجهی داشتند [۲۶]، به نظر می‌رسد در یزد پراکندگی شدید به حدی است که اثر مقیاس مثبت حتی برای لکه‌های کوچک نیز از بین رفته و لذا کارایی آنها به حداقل کاهش یافته است. بر همین اساس می‌تواند استنباط کرد که در شرایط بسیار خشک پیکره‌بندی فضایی نقش تعیین‌کننده‌تری در کیفیت در مقایسه با اندازه دارد. همچنین، مطابق با مطالعه عبدالحسانی (۲۰۲۵) در مورد شهرهای ایرانی، این پژوهش نشان می‌دهد که در مناطق خشک، ساختار فضایی حتی از مساحت کل تعیین‌کننده‌تر است [۳۳].

در پی پاسخ به سؤال دوم در این تحقیق، یافته‌ها در شرایط خشک یزد دلالت بر نوعی رابطه معنادار، مستقیم و قابل کمی‌سازی بین شاخص‌های پیکره‌بندی فضایی و عملکرد حرارتی خالص ($GS-HMI$) دارند. چرا که تحلیل‌ها حکایت از آن دارد: لکه‌های متعلق به کلاس «خنک‌ترین» دارای بالاترین شاخص خوشه‌بندی ($CLUMPY=0.68$) و پایین‌ترین تراکم لکه ($PD=169.38$) هستند. این اعداد بیانگر آن است که لکه‌های بزرگ، فشرده و با مرزهای ساده از کارایی خنک‌کنندگی بهتر و بیشتری در اقلیم خشک برخوردار هستند. این در حالی است که لکه‌های کلاس «متوسط» و «گرم‌ترین» با اشکال نامنظم، پراکنده و با مرزهای پیچیده، نسبت محیط با مساحت بالا، در تماس حرارتی بیشتر با ماتریس شهری هستند. تحلیل نتیجه استنباط مستقیم تحلیل مجاورت که تایید کننده نکته فوق است دال بر آن است که در کلاس گرم‌ترین با ۱۳۴ واحد مرز در هکتار، نزدیک به ۶۰٪ مرز مشترک بیشتری نسبت به کلاس خنک‌ترین (۸۴ واحد مرز در هکتار) دارد. این میزان تماس بالا در اقلیم خشک که اختلاف دمای بین سطوح بسیار محسوس است، انتقال گرمای محسوس از سطوح داغ شهری به درون لکه‌های سبز را تسهیل و کارایی خنک‌کنندگی آنها را مختل می‌کند.

بررسی و مقایسه این یافته با چارچوب نظری اکولوژی سیمای سرزمین در مطالعاتی مانند ژو و همکاران (۲۰۲۲) و نسترن و همکاران (۲۰۱۹) منطبق است. این مطالعات بر رابطه معکوس پیچیدگی مرز و کارایی اکولوژیکی تأکید کرده‌اند [۱۴، ۳۴]. نتایج به دست آمده موید آن است که شدت اثر مشاهده‌شده در یزد (تبیین ۶۸٪ از تغییرات عملکرد توسط سه شاخص ساختاری) از بسیاری مطالعات در اقلیم‌های معتدل گزارش شده، بیشتر است. این موضوع به نوعی می‌تواند حساسیت بالاتر سیستم‌های خشک به الگوی فضایی را نشان دهد. این موضوع با استدلال لیو و همکاران (۲۰۲۴) تطابق دارد. آنها معتقدند رفتار حرارتی در شهرهای خشک ممکن است از الگوهای شناخته شده در اقلیم‌های دیگر تبعیت نکند و نیازمند ملاحظات خاص باشد [۲۴].

بررسی نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون نیز موید آن است که شاخص‌های LPI و $CLUMPY$ ($\beta=0.72, p<0.01$) قوی‌ترین رابطه مثبت را با مقادیر بالاتر $GS-HMI$ خنک‌کنندگی بهتر دارند. همچنین، رابطه معکوس و معناداری بین تراکم مرز با پس‌زمینه (مجاورت) و مقدار $GS-HMI$ تأیید شد ($\beta=-0.58, p<0.05$). به طور خلاصه، دست آورد نهایی مدل رگرسیون نهایی نشان از آن دارد حدود ۶۸٪ از تغییرات در عملکرد خنک‌کنندگی ($GS-HMI$) لکه‌های سبز در شهر یزد توسط سه شاخص پیکره‌بندی فضایی شاخص خوشه‌بندی ($CLUMPY$)، بزرگترین لکه (LPI) و تراکم مرز (مجاورت) تبیین می‌شود. به عبارت دیگر این یافته با نتایج تجربی که تأکید بر برتری الگوهای فضایی بزرگ، متراکم و با مرزهای فشرده را نسبت به الگوهای کوچک، پراکنده و با مرزهای پیچیده و باریک در تأمین کارایی حرارتی در اقلیم خشک دارند را تایید می‌کند. این نتایج از یک سو با اصول کلی مطرح شده در مطالعات بین‌المللی هم سو است و از طرف دیگر، با تشدید اثر این اصول در مناطق خشک، توجه ویژه به پیکره‌بندی فضایی در طراحی شهری مناطق خشک ضرورت بیشتری پیدا می‌کند. این نتایج بیانگر آن است که در اقلیم‌های مرطوب ممکن است مساحت کل فضای سبز نقش تعیین‌کننده‌تری داشته باشد، اما در جایی مانند در اقلیم خشک یزد، نحوه سازمان‌دهی فضایی این عرصه‌ها عاملی کلیدی در کارایی حرارتی آنهاست و نه مساحت صرف.

در نهایت و به منظور پاسخ به سوال سوم، راهبرد عملی کلیدی برای طراحی و برنامه‌ریزی فضای سبز در مناطق خشک باید ارایه شود. با تکیه و استناد به یافته‌های این تحقیق، تجمع لکه‌های سبز کوچک و پراکنده به منظور ایجاد هسته‌های بزرگ‌تر با پیوستگی درونی بالاتر از این قابلیت برخوردارند که شاخص‌های CLUMPY و LPI را بهبود بخشند. علاوه بر آن نتایج تاکید دارند به هر میزان ساده‌سازی هندسه و مرزهای لکه‌های سبز صورت گیرد کاهش نسبت محیط به مساحت رخ داده و در نتیجه تبادل حرارتی با ماتریس شهری داغ به حداقل می‌رسد که باید در اقدامات برنامه‌ریزی و طراحی مد نظر قرار گیرد. علاوه بر این همانگونه که سینگ و همکاران (۲۰۲۵) تاکید می‌کنند ضرورت دارد تا سلسله‌مراتب خنک‌کننده در مقیاس‌های مختلف شهری، از پارک‌های شهری بزرگ تا کریدورها و نقاط سبز محلی ایجاد شود [۲۵]. بالاخره به استناد نتایج به دست آمده، اولویت‌بندی مناطق مداخلی بر اساس نقشه‌های عملکرد حرارتی تولیدشده، لازم و اجتناب‌ناپذیر است، به‌طوری‌که منابع محدود آب و هزینه صورت گرفته به شکلی کارا تر به سمت بهینه‌سازی لکه‌هایی با عملکرد متوسط و گرم هدایت گردد.

این مطالعه از دیدگاه نظری، با تلفیق داده‌های حاصل از سنجش از دور، شاخص عملکردی GS-HMI و متریک‌های اکولوژی سیمای سرزمین، چارچوبی روش‌شناختی ارایه می‌دهد که در تحلیل کمی رابطه ساختار-عملکرد در محیط‌های شهری خشک قابل بهره‌برداری است. اعتبار این چارچوب در بافت اقلیمی خاص، مشابه با مطالعاتی مانند عبدالحسانی (۲۰۲۵) در شهرهای خشک، مورد تأیید قرار می‌گیرد [۳۳]. از دیدگاه عملی، یافته‌های به دست آمده از این قابلیت برخوردارند که مستقیماً به طرح‌های تفصیلی و ضوابط طراحی شهری یزد و شهرهای مشابه کویری تبدیل شوند. خروجی‌های مطالعاتی از این دست می‌تواند به عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری در اختیار برنامه‌ریزان و طراحان شهری قرار گیرد تا بر اساس آن، تخصیص منابع محدود (مانند آب و اعتبار) به گونه‌ای انجام شود که حداکثر بازده حرارتی را در ازای هر واحد سرمایه‌گذاری در فضای سبز به ارمغان آورد [۷]. به طور مشخص، شاخص GS-HMI می‌تواند برای ارزیابی عملکرد پروژه‌های سبز موجود و پیش‌بینی کارایی طرح‌های آتی می‌تواند به کار رود [۴۱]. این رویکرد "عملکرد-ساختار" عملاً تفکر افزایش صرف کمی سرانه فضای سبز را به چالش کشیده و دیدگاه‌ها را به سمت و سوی ارتقای کیفی و بهینه‌سازی پیکربندی فضایی آن برای دستیابی به اهداف تعدیل حرارتی هدایت می‌کند [۴۲-۴۴].

لازم به ذکر است که این پژوهش نیز با محدودیت‌هایی مواجه است. نتایج این تحقیق به داده‌های یک فصل گرم سال و وضوح مکانی ۱۰ متر محدود شده است. لذا از قابلیت پوشش کامل عوامل سبب‌دهی (مانند ارتفاع ساختمان‌ها و ساختار عمودی پوشش گیاهی) برخوردار نیست. بر همین مبنا پیشنهاد می‌شود: تحلیل‌های چندزمانه و بین‌فصلی برای درک پویایی‌های زمانی اثر خنک‌کنندگی در پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرد. ترکیب و یک‌پارچه‌سازی داده‌های با وضوح بسیار بالا مانند داده‌های لیدار با قابلیت در نظر گرفتن دقیق ساختار سه‌بعدی می‌تواند نتایج دقیق‌تر را به دست دهد. لذا این امر می‌تواند موضوع تحقیقات بعدی قرار گیرد. ضمن این که انجام مطالعات تطبیقی همزمان در چند شهر خشک با الگوهای توسعه متفاوت برای استخراج اصولی کلی‌تر و مقاوم‌تر از جمله کارهای تحقیقاتی کاربردی می‌تواند نتایج دقیق‌تر و کاربردی‌تری را به دنبال داشته باشد.

۵- نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش واکاوی تأثیر کیفیت پیکربندی فضایی زیرساخت‌های سبز بر تعدیل دمای سطحی زمین در اقلیم خشک شهر یزد به عنوان بستری منحصر به فرد و نماینده شهرهای گرم و خشک انجام شد. یافته‌های تحقیق دلالت بر وجود رابطه‌ای علی و قابل اندازه‌گیری بین ساختار و عملکرد در سیستم شهری خشک دارند. لذا دستاوردهای این تحقیق نشان داده که سیمای سرزمین ساختارهای سبز یزد، علیرغم برخورداری از مساحت قابل توجه، از پراکندگی بالا و فقدان لکه‌های بزرگ یکپارچه رنج می‌برد که این امر پتانسیل ذاتی آن برای ایجاد قدرت خنک‌کنندگی متمرکز را به شکل چشم‌گیری کاهش می‌دهد. افزون بر این، نتایج تحلیل‌های چندمقیاسی و آماری اثبات کرد که لکه‌های سبز با الگوی فضایی متراکم و با مرزهای ساده‌تر، عملکرد حرارتی به مراتب بهتری دارند تا فضاهای پراکنده و با مرزهای پیچیده. این درحالی است که، لکه‌های ریزدانه، کشیده و با مرزهای نامنظم که تماس بیشتری با ماتریس گرم شهری دارند، کارایی خنک‌کنندگی خود را به سرعت از دست می‌دهند. این یافته دال بر آن است که در محیط‌های با تنش آبی و تابش بالا، بهینه‌سازی هندسه و آرایش فضایی، ابزاری قدرتمندتر در دست طراحان است تا این که صرفاً افزایش کمی سرانه سبز مد نظر قرار گیرد. در نهایت، یافته‌های این تحقیق امکان درک علمی عمیق‌تری از دینامیک حرارتی شهرهای خشک ارائه می‌دهند و بنیان و بینشی عملی را فراهم می‌سازند که می‌تواند در اختیار برنامه‌ریزان و طراحان شهرهای خشک مانند یزد قرار گیرد.

اولویت‌بندی ادغام لکه‌های پراکنده، طراحی فضاهای جدید با اشکال فشرده، و ایجاد شبکه‌های سبز پیوسته می‌تواند راهبردهایی مؤثر برای تبدیل پتانسیل موجود به کارایی واقعی در مقابله با پدیده افزایش دمای سطحی باشد. اگرچه محدودیت‌هایی مانند تمرکز بر یک فصل و وضوح مکانی خاص در این مطالعه وجود داشت، اما چارچوب روشی ارائه‌شده، پایه‌ای مستحکم برای مطالعات آتی با داده‌های بوم‌نگاشت مبتنی بر لیدار و تحلیل‌های چندفصلی در سایر شهرهای خشک ایران فراهم می‌آورد.

۶-منابع

1. Xu, C., et al., *Can improving the spatial equity of urban green space mitigate the effect of urban heat islands? An empirical study*. Science of The Total Environment, 2022. **841**: p. 156687.
2. Halder, B., J. Bandyopadhyay, and P. Banik, *Monitoring the effect of urban development on urban heat island based on remote sensing and geo-spatial approach in Kolkata and adjacent areas, India*. Sustainable Cities and Society, 2021. **74**: p. 103186.
3. Hien, W.N., *Urban heat island research: Challenges and potential*. Frontiers of Architectural Research, 2016. **5**(2): p. 276–278.
4. Zhou, D., et al., *Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives*. Remote Sensing, 2018. **11**(1): p. 48.
5. Abulibdeh, A., *Analysis of urban heat island characteristics and mitigation strategies for eight arid and semi-arid gulf region cities*. Environmental Earth Sciences, 2021. **80**(7): p. 259.
6. Abulimiti, A., et al., *Urbanization Effect on Regional Thermal Environment and Its Mechanisms in Arid Zone Cities: A Case Study of Urumqi*. Remote Sensing, 2024. **16**(16): p. 2939.
7. Balist, J., H. Darabi, and A. Hoveyzavi, *Quantifying the Cooling Nexus of Green-Blue Infrastructure in Hyper-Arid Cities: A Spatial Ecosystem Services Approach*. Buildings, 2025. **15**(21): p. 3975.
8. Di Leo, N., F.J. Escobedo, and M. Dubbeling, *The role of urban green infrastructure in mitigating land surface temperature in Bobo-Dioulasso, Burkina Faso*. Environment, development and sustainability, 2016. **18**(2): p. 373–392.
9. Marando, F., et al., *Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas*. Sustainable cities and society, 2022. **77**: p. 103564.
10. Aram, F., et al., *Urban green space cooling effect in cities*. Heliyon, 2019. **5**(4).
11. Xu, Z. and S. Zhao, *Scale dependence of urban green space cooling efficiency: A case study in Beijing metropolitan area*. Science of the Total Environment, 2023. **898**: p. 165563.
12. Abdulateef, M.F. and H.A. Al-Alwan, *The effectiveness of urban green infrastructure in reducing surface urban heat island*. Ain Shams Engineering Journal, 2022. **13**(1): p. 101526.
13. Shalaby, A.S., *Urban heat island and cities design: a conceptual framework of mitigation tools in hot-arid regions*. Journal of Urban Research, 2011. **8**(1): p. 123–144.
14. Nastran, M., M. Kobal, and K. Eler, *Urban heat islands in relation to green land use in European cities*. Urban Forestry & Urban Greening, 2019. **37**: p. 33–41.

۱۵. عابدینی، آ.، آزمون م، آذرکیش ک و مشتاقی س، ۱۴۰۳. کاهش اثرات جزایر گرمایشی شهر از طریق مصالح روسازی خنک (نمونه مطالعاتی: منطقه ۸ کلان‌شهر تبریز). توسعه پایدار شهری، ۴(۱۳)، صص ۱۰۵-۱۲۸. doi: 10.22034/usd.2024.2008122.1092

۱۶. احمدی م و داداشی رودباری ع، ۱۳۹۵. آثار ترکیبات بیوفیزیکی در شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری (مطالعه موردی شهر مشهد). نشریه سنجش از دور و GIS ایران، ۸(۳)، صص ۳۹-۵۸.
۱۷. حاجی فتحعلی م، فیضی م و دهقان توران پشته ع، ۱۳۹۹. راهبردهای کوتاه مدت برای کاهش اثرات مخرب جزایر گرمایی در مناطق شهری. فصلنامه جغرافیا (برنامه ریزی منطقه ای)، ۱۰(۳۸)، صص ۱۹۵-۲۱۴.
۱۸. منصوریان ح و عسکرزاده ر، ۱۴۰۴. استراتژی های کاهش جزیره گرمایی شهری: راهکارها و چالش ها در بهبود محیط زیست شهری. مجله پژوهش های خشکسالی و تغییر اقلیم، ۳(۱)، صص ۱۱۵-۱۳۴. doi: 10.22077/jdcr.2024.7450.10641
۱۹. مرادی س و رضایی مقدم م ح، ۱۳۹۹. تحلیل زمانی _ مکانی جزیره حرارتی شهر ارومیه با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۹(۲)، صص ۸۳-۹۹. doi: 10.22067/geo.v9i2.8713720.
۲۰. عظیمی ه، اکبری ر و آرمین م، ۱۴۰۱. تبیین رابطه جزایر حرارتی شهری و تعدادی از عوامل مورفولوژی شهر با استفاده از سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: شهر اهواز). جغرافیا و مطالعات محیطی، ۱۱(۴۴)، صص ۵۷-۴۲.
۲۱. فیروزی ا، بمانی ا و عرفانی م، ۱۴۰۲. آشکار سازی ارتباط تغییرات مکانی - زمانی جزایر سرد و حرارتی با گرادیان تغییرات کاربری اراضی/پوشش اراضی در دشت یزد- اردکان. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۱۰(۱)، صص ۱۹۳-۲۱۲.
۲۲. محمودزاده ح، نقدبیشی ا و مومنی س، ۱۳۹۷. تأثیر کاربری های شهری در ایجاد جزایر حرارتی (مطالعه موردی: شهر مشهد). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۷(۳)، صص ۱۰۵-۱۱۹. doi: 10.22067/geo.v0i0.68150
23. Ahmad, B., M.B. Najar, and S. Ahmad, *Analysis of LST, NDVI, and UHI patterns for urban climate using Landsat-9 satellite data in Delhi*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2024. **265**: p. 106359.
24. Liu, Z., et al., *Identification of surface urban heat versus cool islands for arid cities depends on the choice of urban and rural definitions*. Science of The Total Environment, 2024. **951**: p. 175631.
25. Singh, A., et al., *Spatio-temporal assessment of outdoor thermal comfort dynamics in residential neighbourhoods using the TOPSIS method: A novel approach for arid climates*. Sustainable Cities and Society, 2025. **126**: p. 106379.
26. Ain, J., *Measuring the efficiency and intensity of the cooling impact of urban parks in Riyadh, Saudi Arabia: Seasonal analysis and proposed approach to the parks cooling direction index*. Applied Geography, 2025. **179**: p. 103619.
27. Abedrabbob, O., et al., *Enhancing human thermal comfort in hot arid cities: A systematic review of urban heat island observations and mitigation strategies*. Building and Environment, 2025. **283**: p. 113398.
28. Mohammed, A.M.S., *The Heat adaptation priority index (HAPI): A practical tool for urban heat risk assessment and mitigation priority*. Sustainable Cities and Society, 2025. **126**: p. 106420.
29. Abd-Elmabod, S.K., et al., *Seasonal environmental cooling benefits of urban green and blue spaces in arid regions*. Sustainable Cities and Society, 2024. **115**: p. 105805.
30. Li, Y., et al., *What is the relationship between urban heat island (UHI) effect and urban surface parameter (USP) at micro-scale? A case study in Gulangyu, China*. Sustainable Cities and Society, 2025. **134**: p. 106959.
31. Shi, Z., et al., *Modeling the intensity of surface urban heat island based on the impervious surface area*. Urban Climate, 2023. **49**: p. 101529.

32. Wang, J., et al., *Cooling benefits from urban planting depend on local background canopy cover: A continental cross-city comparison*. Science of The Total Environment, 2024. **955**: p. 176864.
33. Abolhasani, M., et al., *Spatiotemporal analysis of land surface temperature dynamics and biophysical influences across diverse climatic zones in Iranian cities*. Sustainable Cities and Society, 2025. **135**: p. 107012.
34. Zhou, L., et al., *Relationship between urban landscape structure and land surface temperature: Spatial hierarchy and interaction effects*. Sustainable Cities and Society, 2022. **80**: p. 103795.
35. Li, B., et al., *Analysis of the relationship between urban landscape patterns and thermal environment: a case study of Zhengzhou City, China*. Environmental Monitoring and Assessment, 2020. **192**(8): p. 540.
36. Huang, F., et al., *Satellite identification of atmospheric-surface-subsurface urban heat islands under clear sky*. Remote Sensing of Environment, 2020. **250**: p. 112039.
37. Nazarian, N. and J.K. Lee, *Personal assessment of urban heat exposure: a systematic review*. Environmental Research Letters, 2021. **16**(3): p. 033005.
38. Schneider, A., M.A. Friedl, and D. Potere, *Mapping global urban areas using MODIS 500-m data: New methods and datasets based on 'urban ecoregions'*. Remote sensing of environment, 2010. **114**(8): p. 1733–1746.
39. Zhou, W., G. Huang, and M.L. Cadenasso, *Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes*. Landscape and urban planning, 2011. **102**(1): p. 54–63.
40. Qureshi, A.M., A. Rachid, and D. Bartlett, *Quantifying the cooling effect of urban heat stress interventions*. International Journal of Global Warming, 2023. **30**(1): p. 60–80.
41. Bartesaghi-Koc, C., P. Osmond, and A. Peters, *Quantifying the seasonal cooling capacity of 'green infrastructure types' (GITs): An approach to assess and mitigate surface urban heat island in Sydney, Australia*. Landscape and urban planning, 2020. **203**: p. 103893.
42. Li, X. and W. Zhou, *Optimizing urban greenspace spatial pattern to mitigate urban heat island effects: Extending understanding from local to the city scale*. Urban Forestry & Urban Greening, 2019. **41**: p. 255–263.
43. Hou, H. and R.C. Estoque, *Detecting cooling effect of landscape from composition and configuration: An urban heat island study on Hangzhou*. Urban Forestry & Urban Greening, 2020. **53**: p. 126719.
44. Wesley, E.J. and N.A. Brunsell, *Greenspace pattern and the surface urban heat island: A biophysically-based approach to investigating the effects of urban landscape configuration*. Remote Sensing, 2019. **11**(19): p. 2322.