



Spatial Pattern of Surface Urban Heat Island (SUHI) in the Valley-Mountainous City of Khorramabad and the Role of Vegetation in Its Mitigation

Amirreza Beiranvand¹, Enayat Mirzaei^{*2}, Atta Hasanpour³

¹ M.Sc. in Urban Design, Lorestan Province Cultural Heritage, Tourism and Handicrafts Organization, Khorramabad, Iran

² Assistant Professor, Department of Urban Planning, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

³ Ph.D. in Archaeology, Lorestan Province Cultural Heritage, Tourism and Handicrafts Organization, Khorramabad, Iran

Abstract

In valley-mountainous cities, differences in solar radiation and ventilation can modify the classic “hot core” pattern and create heat foci along the margins. This study examines the spatial pattern of the Surface Urban Heat Island (SUHI) in Khorramabad from 16 Mehr to 16 Aban 1404 (7 October to 6 November 2025) and assesses vegetation's role in moderating land surface temperature (LST). LST was derived from Landsat-8/9 imagery using a single-channel algorithm with ERA5 atmospheric parameters. NDVI was calculated from Sentinel-2 images and resampled to 30-meter resolution. SUHI was computed as the difference between urban LST and the mean LST of peripheral reference areas, redefined with constraints on elevation, slope, and aspect. Results indicated 27.15% of the urban area in the “neutral” class and 4.82% in the “very hot” class, while 50.61% is cold to cool. Very hot hotspots are concentrated in southern margins (airport, 184th brigade, oil depot, barren lands) and the eastern belt (Mehr Housing to Azad University). Cool islands appear around Kio Lake, along Khorramrud River, and in some central neighborhoods. A strong inverse LST-NDVI relationship ($r = -0.82$; $R^2 = 0.71$; $p < 0.001$) revealed that each 0.1-unit increase in NDVI reduces LST by 2.86°C on average. Based on these findings, low-cost strategies are proposed: protecting intra-valley green patches, strengthening the green-blue network along the river and lake, creating green belts in sensitive margins, restricting construction on steep slopes, and preserving valley-oriented ventilation corridors to alleviate thermal stress.

Keywords: Surface Urban Heat Island; Land Surface Temperature; NDVI; Valley-Mountainous City; Khorramabad

* Corresponding Author: Enayat Mirzaei
Email: mirzaei.e@lu.ac.ir
Phone: 09161760868



تحلیل شدت جزیره حرارتی سطحی و نقش تعدیل کننده پوشش گیاهی در فضای شهری دره‌ای-کوهستانی خرم‌آباد

امیررضا بیرانوند^۱، عنایت‌اله میرزایی^{۲*}، عطا حسن پور^۳

^۱ کارشناسی ارشد طراحی شهری، سازمان میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی استان لرستان، خرم‌آباد، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی شهرسازی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

^۳ دکتری باستان‌شناسی، سازمان میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی استان لرستان، خرم‌آباد، ایران.

چکیده

در شهرهای دره‌ای-کوهستانی، تفاوت تابش و تهویه می‌تواند الگوی «هسته داغ» را به کانون‌های گرمایی در حاشیه تغییر دهد. این پژوهش الگوی مکانی جزیره حرارتی سطحی (SUHI) در خرم‌آباد (۱۶ مهر تا ۱۶ آبان ۱۴۰۴) و نقش پوشش گیاهی در تعدیل دمای سطح زمین را بررسی کرده است. دمای سطح زمین (LST) با تصاویر لندست ۸ و ۹ و الگوریتم تک‌کانالی همراه با پارامترهای ERA5 استخراج شد. NDVI از تصاویر سنتینل-۲ محاسبه و به تفکیک ۳۰ متر هم‌مقیاس گردید. SUHI از تفاضل LST شهری و میانگین LST نواحی مرجع (بازتعریف‌شده با قیود ارتفاع، شیب و جهت دامنه) محاسبه شد. نتایج نشان داد ۲۷,۱۵ درصد از مساحت شهر در کلاس «خنثی» و ۴,۸۲ درصد در کلاس «بسیار گرم» قرار دارد، در حالی که ۵۰,۶۱ درصد در طبقات سرد تا خنک جای می‌گیرد. کانون‌های بسیار گرم در حاشیه جنوبی (فرودگاه، تیپ ۱۸۴، انبار نفت، اراضی بایر) و کمربند شرقی (مسکن مهر تا دانشگاه آزاد) متمرکز شده‌اند. در مقابل، در اطراف دریاچه کیو، حاشیه خرم‌رود و برخی محله‌های مرکزی جزایر خنک دیده می‌شود. تحلیل آماری رابطه معکوس قوی بین LST و NDVI را تأیید کرد ($p < 0.001$; $R^2 = 0.71$; $r = -0.82$)؛ هر افزایش ۰,۱ واحدی NDVI با کاهش متوسط ۲,۸۶ درجه سلسیوس همراه است. بر این اساس، حفاظت از لکه‌های سبز درون‌دره‌ای، تقویت شبکه سبز-آبی حاشیه رودخانه و دریاچه، ایجاد کمربند سبز در حاشیه‌های حساس، محدودیت ساخت‌وساز در شیب‌های تند و حفظ کریدورهای تهویه در راستای دره، به عنوان راهکارهای کم‌هزینه و مؤثر برای کاهش تنش حرارتی پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: جزیره حرارتی سطحی؛ دمای سطح زمین؛ NDVI؛ شهر دره‌ای-کوهستانی؛ خرم‌آباد

۱-مقدمه

شهرها به مثابه سامانه‌های فضایی-اجتماعی پویا، تحت تأثیر رشد جمعیت، گسترش کالبدی و تغییر الگوهای مصرف انرژی به صورت پیوسته دگرگون می‌شوند. یکی از پیامدهای مستقیم این دگرگونی، جایگزینی سطوح طبیعی با سطوح نفوذناپذیر و به کارگیری مصالحی با ظرفیت گرمایی بالا و آلودگی پایین است؛ فرایندی که با کاهش تبخیر-تعرق، افزایش ذخیره‌سازی انرژی در سطح و برهم زدن توازن انرژی، شرایط شکل‌گیری پدیده جزیره حرارتی را فراهم می‌کند [۱، ۲]. در این میان، جزیره حرارتی سطحی به اختلاف دمای سطح زمین میان پهنه‌های شهری و پیرامون روستایی / طبیعی اشاره دارد و می‌تواند پیامدهایی همچون افزایش تقاضای سرمایش، تشدید تنش آبی، افت کیفیت هوا و افزایش مخاطرات سلامت را به دنبال داشته باشد [۳، ۴].

باین‌حال، در شهرهایی با توپوگرافی پیچیده، تفسیر SUHI ساده و یکنواخت نیست. توپوگرافی از طریق سایه‌اندازی و ناهمگنی دریافت تابش می‌تواند میانگین LST را در کف دره کاهش دهد و در برخی فصل‌ها، حتی به «وارونگی» الگوی کلاسیک (مرکز گرم-پیرامون خنک) منجر شود؛ به گونه‌ای که پهنه‌های بایر و آفتاب‌گیر پیرامونی گرم‌تر از هسته شهری سایه‌دار باشند [۵، ۶]. از سوی دیگر، تراکم کالبدی و انسداد کریدورهای تهویه در کف دره می‌تواند محبوس‌سازی گرما و شکل‌گیری کانون‌های داغ موضعی را تشدید کند [۷]. خرم‌آباد به عنوان نمونه‌ای شاخص از شهرهای دره‌ای-کوهستانی، هم از ظرفیت‌های طبیعی تعدیل دما برخوردار است و هم در برابر ایجاد کانون‌های داغ حاشیه‌ای آسیب‌پذیری دارد.

این پژوهش با تمرکز بر بازه زمانی پاییزی (۱۶ مهر تا ۱۶ آبان ۱۴۰۴) که در آن زاویه خورشید پایین‌تر بوده و اثرات سایه‌اندازی توپوگرافیک و تهویه دره‌ای بر الگوی جزیره حرارتی سطحی برجسته‌تر است، الگوی مکانی SUHI و نقش تعدیل‌کننده پوشش گیاهی را بررسی می‌کند.

لازم به ذکر است که تحلیل حاضر صرفاً به ساعات روز (گذر ماهواره لندست حدود ساعت ۱۱:۳۰ محلی) محدود می‌شود. در ساعات شب، پدیده وارونگی دمایی در دره‌های کوهستانی می‌تواند منجر به تشکیل جزیره حرارتی معکوس (هوای سرد در کف دره و هوای گرم‌تر در دامنه‌ها) شود که بررسی آن نیازمند داده‌های حرارتی شب‌هنگام است و در این پژوهش انجام نشده است. بر این اساس، مسئله پژوهش حاضر شناسایی الگوی فضایی SUHI و سنجش نقش پوشش گیاهی در تعدیل LST به منظور پشتیبانی از تصمیم‌گیری مکانی برای مدیریت گرمای شهری در خرم‌آباد است. پرسش‌های پژوهش عبارت‌اند از:

(۱) شدت SUHI در بازه مهر-آبان ۱۴۰۴ چه الگوی مکانی دارد و کانون‌های گرم و سرد در کدام پهنه‌ها تمرکز یافته‌اند؟

(۲) رابطه LST و NDVI از نظر جهت و شدت چگونه است و پوشش گیاهی تا چه اندازه در تعدیل دمای سطح زمین اثرگذار

است؟



شکل ۱- نقشه ذهنی پژوهش

پدیده جزیره حرارتی شهری از مهم‌ترین پیامدهای دگرگونی کالبدی و عملکردی شهرها است و به افزایش دمای سطوح و یا هوای شهری نسبت به پیرامون روستایی / طبیعی اشاره دارد. این پدیده معمولاً به دو صورت اصلی مطالعه می‌شود: جزیره حرارتی هوایی (UHI) که بر پایه دمای هوا در لایه‌های کانوپی شهری یا لایه مرزی اندازه‌گیری می‌شود و جزیره حرارتی سطحی که بر دمای سطح

زمین (LST) متکی است و با سنجش‌ازدور حرارتی پایش می‌شود [۲، ۳]. SUHI غالباً از UHI هوایی شدیدتر است، زیرا سطوح نفوذناپذیر (مانند آسفالت و بتن) تابش خورشیدی را بیشتر جذب و در خود ذخیره می‌کنند و هم‌زمان با کاهش تبخیر-تعرق، به افزایش دمای سطح می‌انجامند. از آنجا که LST به ویژگی‌های سطح (جنس و رطوبت سطح، آلودگی و گسیلندگی) و نیز هندسه شهری حساس است، می‌تواند با دمای هوا تفاوت معنادار داشته‌باشد؛ بنابراین، برای مدیریت گرمایش سطحی، مکان‌یابی مداخلات خنک‌کننده (مانند توسعه پوشش گیاهی یا به‌کارگیری مواد بازتابنده) و ارزیابی تنش حرارتی سطحی شاخص مناسبی به‌شمار می‌آید [۲، ۳، ۸].

از منظر فیزیکی، SUHI ریشه در اختلال توازن انرژی سطحی دارد [۱]. در شرایط طبیعی، بخش مهمی از انرژی دریافتی از طریق تبخیر-تعرق (شار گرمای نهان) و تبادل با خاک مصرف می‌شود؛ اما در محیط‌های شهری، تبدیل سطوح گیاهی به سطوح نفوذناپذیر موجب کاهش شار گرمای نهان، افزایش شار گرمای محسوس و افزایش ذخیره‌سازی گرما در مصالح کالبدی می‌گردد. افزون بر این، کاهش آلودگی (جذب بیشتر تابش کوتاه‌موج)، تله‌اندازی تابش بلندموج در کانون‌های شهری (در اثر هندسه خیابان‌ها و ساختمان‌ها) و همچنین گرمای مصنوعی ناشی از تردد، فعالیت‌های صنعتی و سامانه‌های سرمایش / گرمایش، می‌تواند شدت SUHI را افزایش دهد [۲، ۸، ۹]. این فرایندها علاوه بر افزایش LST، می‌توانند پیامدهای ثانویه‌ای مانند افزایش مصرف انرژی سرمایشی، افت کیفیت هوا و افزایش مخاطرات سلامت (به‌ویژه در موج‌های گرما) ایجاد کنند [۲، ۴].

در مقابل، پوشش گیاهی یکی از مهم‌ترین تعدیل‌کننده‌های گرمایش سطحی است. گیاهان از طریق سایه‌اندازی (کاهش تابش دریافتی سطح)، تبخیر-تعرق (تبدیل انرژی به گرمای نهان) و نیز تغییر ویژگی‌های تابشی سطح (از جمله افزایش نسبی آلودگی و گسیلندگی در برخی شرایط)، می‌توانند LST را کاهش دهند [۱۰، ۱۱]. در این چارچوب، شاخص نرمال‌شده تفاضل پوشش گیاهی به‌عنوان یک پروکسی رایج برای تراکم / سرزندگی پوشش گیاهی، معمولاً رابطه معکوس و معنادار با LST نشان می‌دهد [۱۰، ۱۱]. شواهد پژوهش‌های بین‌المللی همچنین بیانگر آن است که اثر خنک‌کنندگی زیرساخت سبز به نوع پوشش (درختان معمولاً بیش از چمن و بوته)، پیوستگی لکه‌های سبز، دسترسی به آب و زمینه اقلیمی وابسته‌است؛ در اقلیم‌های نیمه‌خشک، انتخاب گونه‌های مقاوم به خشکی و الگوهای آبیاری کارا نقش تعیین‌کننده دارند [۱۲، ۱۳، ۱۴].

در شهرهای دره‌ای-کوهستانی، توپوگرافی پیچیدگی بیشتری به الگوی SUHI می‌افزاید. شیب، جهت دامنه و شکل دره بر دریافت تابش (ناهمگنی سایه‌اندازی)، الگوهای باد محلی و تهویه دره‌ای-کوهستانی و نیز رخداد وارونگی‌های حرارتی اثر می‌گذارند [۶، ۷]. در فصل‌های کم‌تابش (مانند پاییز و زمستان)، کف دره‌های سایه‌دار ممکن است خنک‌تر از دامنه‌های آفتاب‌گیر پیرامونی باشد و در نتیجه، الگوی کلاسیک SUHI (هسته گرم) تضعیف یا حتی وارونه شود؛ در عین حال، توسعه حاشیه‌ای بر اراضی بایر یا سطوح نفوذناپذیر می‌تواند کانون‌های داغ موضعی ایجاد کند [۵، ۶]. از این‌رو، تجربه‌های موردی در شهرهای کوهستانی بر حفاظت از کریدورهای تهویه در راستای محور دره، کنترل تراکم و ساخت‌وساز در شیب‌های تند و تقویت کمربندهای سبز حاشیه‌ای به‌عنوان راهبردهای کم‌هزینه و مؤثر کاهش تنش حرارتی تأکید می‌کنند [۷، ۱۴]. همچنین، وارد کردن متغیرهای توپوگرافیک (ارتفاع، شیب و جهت دامنه) در مدل‌سازی SUHI می‌تواند قدرت تبیین و دقت پیش‌بینی را افزایش دهد [۱۳].

۲- پیشینه پژوهش

مطالعات درباره جزیره حرارتی سطحی و نقش پوشش گیاهی در تعدیل آن از دهه ۱۹۸۰ با کارهای بنیادی Oke آغاز شد. در دهه‌های بعد، پیشرفت سنجش‌ازدور امکان تحلیل‌های مکانی دقیق‌تر، چندفصلی و زمینه‌مند (مانند شهرهای کوهستانی) را فراهم کرد. پژوهش‌های اولیه بیشتر بر سازوکارهای فیزیکی و تمایز SUHI از UHI هوایی متمرکز بودند [۱، ۳]. در ادامه، مطالعات متعددی رابطه معکوس بین دمای سطح زمین (LST) و شاخص پوشش گیاهی را تأیید کردند و این رابطه به مبنایی برای راهبردهای توسعه فضای سبز تبدیل شد [۱۰، ۱۵].

در سال‌های اخیر (۲۰۲۳-۲۰۲۶)، توجه به چالش‌های توپوگرافیک در شهرهای دره‌ای-کوهستانی افزایش یافته است. مطالعات موردی در خاورمیانه (به‌ویژه ایران) نشان داده‌اند که در این شهرها الگوی SUHI اغلب حاشیه‌محور است، سبزی‌نگی در اقلیم‌های نیمه‌خشک اثر خنک‌کنندگی قوی دارد و ضروری است عوامل توپوگرافیک (شیب، جهت دامنه، تهویه) در مدل‌سازی SUHI گنجانده شوند [۷، ۱۴].

در ایران، بیشتر پژوهش‌ها بر کلان‌شهر تهران متمرکز بوده است. به دلیل موقعیت نیمه‌کوهستانی تهران، این مطالعات الگوهای پیچیده SUHI (مانند وارونگی فصلی و تأثیر آلودگی هوا) را آشکار ساخته‌اند. همچنین یافته‌های اخیر تأکید می‌کنند که گسترش شهری، کاهش NDVI و افزایش سطوح نفوذناپذیر شدت SUHI را تشدید می‌کند، در حالی که توسعه زیرساخت سبز می‌تواند LST را تا چند درجه کاهش دهد. در مقابل، برای شهرهای کوهستانی کوچک‌تر مانند خرم‌آباد پژوهش‌های محدودی انجام شده است. این مطالعات عمدتاً بر تغییرات LST ناشی از گسترش شهری متمرکز بوده‌اند و نقش توپوگرافی دره‌ای را در خنک‌سازی کف دره برجسته ساخته‌اند.

پژوهش حاضر با تمرکز بر تحلیل فصلی پاییزی و کمی‌سازی دقیق اثر NDVI در بستر دره‌ای-کوهستانی خرم‌آباد، به پر کردن خلأ موجود در پیشینه علمی کمک می‌کند.

جدول ۱- خلاصه پیشینه پژوهش

منبع	محدوده / مقیاس	داده‌ها و روش‌ها	یافته‌های کلیدی
[۱۷]	قاین (شهر)	NDVI, Landsat ETM+, روش جداسازی طیفی خطی (LSU)	همبستگی منفی معنادار بین NDVI و LST؛ اثربخشی گونه‌های گیاهی بومی در کاهش دمای سطح
[۱۸]	تهران (شهر)	NDVI, Landsat 8, روش جداسازی طیفی	همبستگی منفی بین NDVI و LST؛ اثربخشی پارک‌ها و باغ‌های شهری در خنک‌سازی
[۱۹]	مشهد (شهر)	NDVI, Landsat TM, روش جداسازی طیفی	همبستگی منفی بین NDVI و LST؛ اثربخشی گونه‌های گیاهی بومی
[۲۰]	زابل (شهر)	داده‌های میدانی هواشناسی، شاخص WBGT	اثربخشی فضای سبز در بهبود آسایش حرارتی در اقلیم گرم و خشک
[۱]	نظری	مدل توازن انرژی سطح	پایه‌گذاری نظری پدیده UHI و SUHI
[۳]	شهری	سنجش‌ازدور حرارتی	تمایز بین دمای سطح (LST) و دمای هوا
[۱۰]	شهری	Landsat + NDVI	اثبات رابطه معکوس خطی بین NDVI و LST
[۱۵]	شهری	مقایسه NDVI و ISA	NDVI شاخص مناسب‌تری نسبت به ISA برای مطالعات SUHI
[۷]	جهانی	طبقه‌بندی LCZ	ارائه چارچوب استاندارد مناطق اقلیم محلی برای مطالعات UHI
[۱۳]	مروری	مرور نظام‌مند روش‌های سنجش‌ازدور SUHI	شناسایی چالش‌ها و بهترین روش‌های استخراج LST
[۹]	جهانی	تحلیل چندشهری	نقش تعیین‌کننده اقلیم و جمعیت در شدت UHI
[۱۴]	مروری	مرور سیستماتیک	دسته‌بندی عوامل، داده‌ها و راهبردهای کاهش UHI
[۱۱]	شهری	تحلیل فصلی	تفاوت عوامل مؤثر بر LST در فصول مختلف
[۱۲]	اروپا	ارزیابی زیرساخت سبز (GI)	اثبات کاهش UHI توسط زیرساخت سبز در مقیاس شهری

۳- مواد و روش‌ها

این پژوهش از نوع کاربردی با رویکرد توصیفی-تحلیلی و مبتنی بر سنجش‌ازدور است.

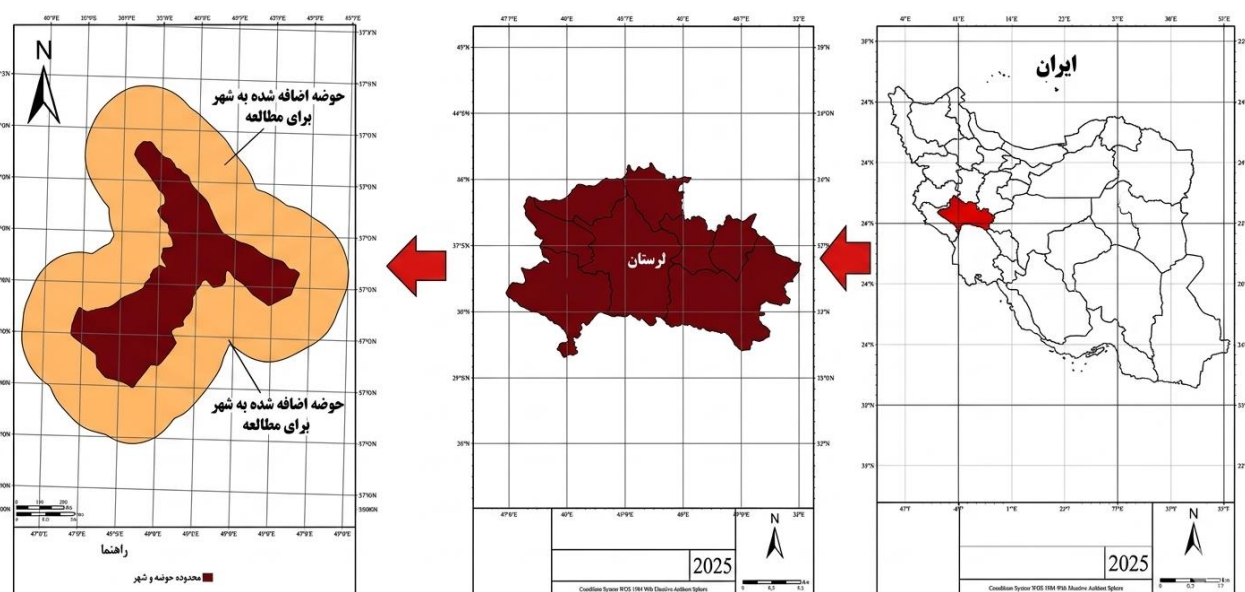
۳-۱- محدوده مورد مطالعه

شهر خرم‌آباد، مرکز استان لرستان، با مساحت تقریبی حوزه خدماتی ۴۸ کیلومتر مربع در طول جغرافیایی ۲۰°۴۸' شرقی و عرض جغرافیایی ۲۹°۳۳' شمالی و در ارتفاع متوسط ۱۱۷۰ متر از سطح دریا، در دره‌ای باریک و کشیده با جهت‌گیری شمال‌غربی-جنوب‌شرقی در دامنه رشته‌کوه زاگرس واقع شده است؛ موقعیتی که از یک‌سو با برخورداری از اقلیم نیمه‌خشک سرد (BSk) در طبقه‌بندی کوپن) و جریان‌های کاتاباتیک شبانه، پتانسیل تعدیل طبیعی دما را فراهم می‌سازد و از سوی دیگر، با محدود شدن شدید

تهویه عرضی دره توسط ساختوسازهای غیراصولی در شیب‌های تند شمالی و جنوبی، به عاملی برای تشدید جزیره حرارتی سطحی تبدیل شده است. این شهر طی سه دهه گذشته رشد شتابان جمعیتی (از حدود ۲۵۰ هزار نفر در سال ۱۳۷۵ به بیش از ۵۵۰ هزار نفر در سال ۱۴۰۴) و گسترش کالبدی بی‌رویه را تجربه کرده که منجر به کاهش سرانه فضای سبز از بیش از ۲۲ مترمربع به کمتر از ۷ مترمربع و افزایش چشمگیر سطوح نفوذناپذیر شده است.

شایان ذکر است که مساحت هسته مرکزی (حوزه خدماتی) شهر حدود ۴۸ کیلومتر مربع است، اما پهنه نفوذ شهری (شامل حومه، اراضی بایر، فرودگاه، تیپ نظامی و کاربری‌های حاشیه‌ای) به ۱۰۲/۶ کیلومتر مربع می‌رسد که در این پژوهش به عنوان پهنه عملکردی شهر تحلیل شده است.

محدوده تحلیل، پهنه عملکردی شهر به مساحت ۱۰۲/۶ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد. راستای دره شمالی-جنوبی و شیب دامنه‌ها در تفسیر تفاوت‌های حرارتی نقش کلیدی دارد. محدوده مرجع پیرامونی مطابق با شرایط ذکر شده در بخش ۲-۵ (محاسبه SUHI) از اراضی طبیعی و روستایی اطراف انتخاب گردید.



شکل ۲- موقعیت و محدوده مورد مطالعه (پهنه شهری و مرجع پیرامونی)

۳-۲- داده‌های ماهواره‌ای و پیش‌پردازش

داده‌ها شامل تصاویر ماهواره لندست ۸ و ۹ مجهز به سنجنده OLI (تصویربردار زمین عملیاتی) و سنجنده TIRS (سنجنده فروسرخ حرارتی) برای استخراج دمای سطح زمین (LST) و تصاویر ماهواره سنتینل-۲ با سنجنده چندطیفی (MSI) در سطح پردازش ۲ (Level-2A) برای محاسبه شاخص نرمال‌شده تفاضل پوشش گیاهی در بازه ۱۶ مهر تا ۱۶ آبان ۱۴۰۴ بود. این بازه زمانی به‌طور هدفمند انتخاب شد تا الگوی جزیره حرارتی سطحی در فصل پاییز و شرایط کم‌تابش خورشیدی بررسی شود، زیرا در این فصل زاویه خورشید پایین‌تر است و سایه‌اندازی توپوگرافیک (به‌ویژه در دره‌های شمال‌غربی-جنوب‌شرقی مانند خرم‌آباد) تأثیر بیشتری بر دریافت تابش کوتاه‌موج دارد و می‌تواند الگوی کلاسیک «هسته گرم-پیرامون خنک» را تضعیف یا حتی وارونه کند. اگرچه در پوشش گیاهی طبیعی دامنه‌های پیرامونی (جنگل‌های بلوط) تا اواسط آبان تبخیر-تعرق قابل توجهی ادامه دارد، اما در منطقه شهری خرم‌آباد با فضای سبز محدود و گونه‌های غیربومی، تبخیر-تعرق در این فصل کاهش می‌یابد؛ بنابراین تأکید اصلی پژوهش بر اثر سایه‌اندازی و تهویه دره‌ای است و نه بر نقش خنک‌کنندگی تبخیر-تعرق پوشش گیاهی شهری. از منظر عملی نیز این دوره با پوشش ابر کم (کمتر از ۱۰ درصد) همراه بود که امکان دسترسی به تصاویر با کیفیت بالا و حداقل نویز ابری را فراهم کرد. پیش‌پردازش شامل ماسک ابر و سایه ابر و ترکیب زمانی برای کاهش نویز انجام شد.

۳-۳- استخراج دمای سطح زمین (LST)

LST با استفاده از الگوریتم تک کانالی [۱۴] و پارامترهای اتمسفری ERA5 (دمای هوای مؤثر، رطوبت ستونی و فشار سطح) استخراج گردید.

گسیلندگی سطح (ε) با استفاده از روش طبقه‌بندی NDVI محاسبه شد. معادله LST به صورت زیر اعمال گردید:

$$LST = \frac{T_b}{1 + \left(\frac{\lambda T_b}{\rho}\right) \ln \varepsilon} \quad (1)$$

که در آن T_b دمای روشنایی، λ طول موج مؤثر (۱۱/۴۵ میکرومتر) و ρ ثابت فیزیکی است.

۳-۴- محاسبه شاخص NDVI و هم‌مقیاس‌سازی

NDVI با استفاده از تصاویر Sentinel-2 و رابطه (۲) محاسبه شد. به دلیل تفاوت تفکیک مکانی (۱۰ متر برای سنتینل-۲ و ۳۰ متر برای لندست)، لایه NDVI با روش میانگین‌گیری پیکسلی به ابعاد ۳۰ متر باز نمونه‌برداری (resample) گردید.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (2)$$

۳-۵- محاسبه شدت جزیره حرارتی سطحی (SUHI)

برای محاسبه SUHI، نخست محدوده مرجع پیرامونی با سه شرط بازتعریف شد:

- ✓ (الف) فاصله حداقل ۱ کیلومتر از لبه توسعه شهری،
- ✓ (ب) ارتفاع بین ۱۱۰۰ تا ۱۲۵۰ متر (همتراز با کف دره اصلی خرم‌آباد) بر اساس مدل رقومی SRTM،
- ✓ (پ) شیب کمتر از ۱۰ درجه و جهت دامنه شمالی-جنوبی متعادل، به منظور کاهش اثر تابش مستقیم خورشید بر دامنه‌های آفتاب‌گیر.

میانگین LST محاسبه‌شده برای این نواحی (LST_{ref}) به عنوان دمای پایه غیرشهری در نظر گرفته شد. سپس SUHI برای هر پیکسل درون پهنه شهری به صورت $SUHI = LST_{pixel} - LST_{ref}$ محاسبه گردید. این روش نسبت به میانگین‌گیری ساده از تمام اراضی پیرامونی (که شامل ارتفاعات و جهت‌های دامنه متفاوت است)، برآورد واقع‌بینانه‌تری از SUHI در توپوگرافی پیچیده ارائه می‌دهد [۵، ۶].

۳-۶- اعتبارسنجی نسبی دمای سطح زمین

به دلیل عدم دسترسی به داده‌های میدانی همزمان دمای سطح زمین در محدوده مطالعاتی، اعتبارسنجی مستقیم امکان‌پذیر نبود. از این رو، رویکرد اعتبارسنجی نسبی مبتنی بر سه شاخص اتخاذ شد:

نخست، مطالعات بین‌المللی نشان داده‌اند که محصول دمای سطحی لندست ۹ (Level-2 ST) در مقایسه با داده‌های زمینی مرجع دارای میانگین بایاس کمتر از ۰/۵ کلوین و خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) حدود ۱/۰ تا ۱/۵ کلوین است [۲۱، ۲۲]. دوم، به منظور بررسی سازگاری با شرایط محلی، دمای هوای ثبت‌شده در ایستگاه همدید خرم‌آباد (کد ۴۰۷۸۲) در ساعت ۱۲:۳۰ محلی (نزدیک به زمان عبور ماهواره لندست ۹) با مقادیر LST استخراج‌شده برای پیکسل متناظر با ایستگاه مقایسه گردید. با وجود تفاوت مفهومی بین LST و دمای هوا، همبستگی پیرسون محاسبه‌شده برابر $r=0.76$ ($p < 0.01$) و RMSE حدود ۲/۴ درجه سانتی‌گراد به دست آمد که در محدوده خطای قابل قبول برای مطالعات شهری با توپوگرافی پیچیده (معمولاً ۳-۴ درجه سانتی‌گراد) قرار دارد [۲۳، ۱۰].

سوم، انطباق الگوی مکانی LST با نقشه کاربری اراضی و NDVI نشان داد که مناطق با پوشش گیاهی متراکم (دریاچه کیو، حاشیه خرم‌رود) به‌طور سیستماتیک دمای پایین‌تری نسبت به سطوح نفوذناپذیر و اراضی بایر دارند که با انتظارات فیزیکی همخوانی کامل دارد.

با توجه به سه شاخص فوق، اگرچه اعتبارسنجی مستقیم زمینی میسر نشد، اما شواهد حاکی از قابلیت اعتماد کافی محصول LST برای تحلیل الگوهای مکانی SUHI و رابطه آن با NDVI در شهر خرم‌آباد است. اعتبارسنجی مستقیم با داده‌های میدانی به عنوان اولویت پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود.

۷-۳- تحلیل آماری

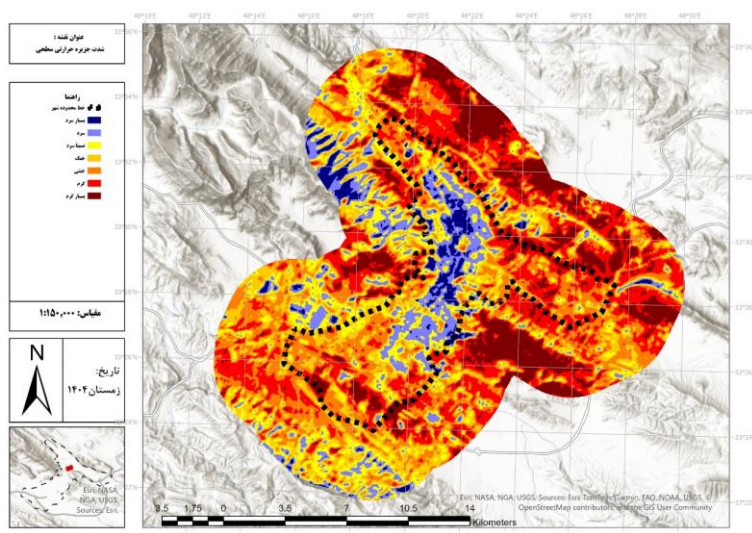
برای تبیین نقش پوشش گیاهی در تعدیل دمای سطح زمین، همبستگی پیرسون^۱ و رگرسیون خطی ساده بین متغیرهای LST و NDVI اجرا شد. همچنین، نقشه SUHI در هفت طبقه حرارتی (از بسیار سرد تا بسیار گرم) طبقه‌بندی و مساحت و درصد هر طبقه محاسبه گردید. کلیه پردازش‌های آماری و مکانی در نرم‌افزارهای ArcGIS Pro و SPSS انجام شد.

پیش از اجرای رگرسیون، مفروضات کلاسیک خطی (نرمال بودن باقیمانده‌ها، همسانی واریانس، استقلال خطاها) با استفاده از آزمون‌های کولموگوروف-اسمیرنوف^۲ و نمودار پراکنش باقیمانده‌ها بررسی شد. نتایج عدم وجود الگوی مشخص در نمودار باقیمانده‌ها (شکل تکمیلی ۱) و عدم رد فرض نرمال بودن ($p > 0.05$) را نشان داد. همچنین آزمون دوربین-واتسون^۳ مقدار ۱/۹۲ محاسبه گردید که بیانگر عدم خودهمبستگی معنادار باقیمانده‌هاست.

۴- بحث و نتایج

۴-۱- پهنه‌بندی دامنه دمای سطح زمین

دامنه دمای سطح زمین در محدوده مطالعاتی از $16/81^{\circ}\text{C}$ در پهنه‌های مرتفع و پوشیده از گیاه تا $43/14^{\circ}\text{C}$ در گرم‌ترین سطوح متغیر بود. میانگین LST در محدوده مرجع پیرامونی $33/80^{\circ}\text{C}$ بود. نقش سایه‌اندازی توپوگرافیک در فصل پاییز موجب خنک‌تر شدن بخش‌هایی از کف دره نسبت به دامنه‌های آفتاب‌گیر پیرامونی شد.



شکل ۳- نقشه دمای سطح زمین (LST) در محدوده مطالعاتی خرم‌آباد

¹ Pearson correlation

² Kolmogorov-Smirnov

³ Durbin-Watson

۲-۴- توزیع طبقات SUHI در پهنه شهری

کلاس خنثی ۲۷/۱۵٪ و کلاس بسیار گرم تنها ۴/۸۲٪ از مساحت شهری را پوشش می‌دهد. طبقات سرد تا خنک در مجموع ۵۰/۶۱٪ شهر را تشکیل می‌دهند که نشان‌دهنده خنک‌تر بودن بسیاری از پهنه‌های درون‌دره‌ای نسبت به میانگین مرجع است.

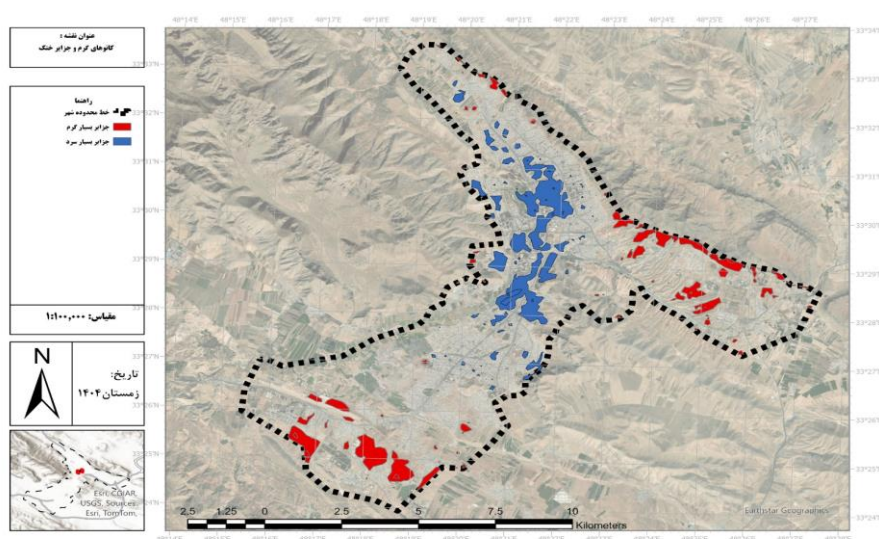
جدول ۲- طبقه‌بندی شدت جزیره حرارتی سطحی (SUHI) در پهنه شهری خرم‌آباد

طبقة	بازه (°C)	مساحت (km ²)	درصد
بسیار سرد	۱۳/۱۶- تا ۱۰/۱۶-	۵/۰۳	۵/۸۴٪
سرد	۱۰/۰۹- تا ۷/۶۴-	۱۶/۴۱	۱۵/۹۱٪
نسبتاً سرد	۷/۶۴- تا ۵/۱۰-	۱۴/۱۷	۱۳/۷۳٪
خنک	۵/۱۰- تا ۲/۶۵-	۱۵/۶۲	۱۵/۱۳٪
خنثی	۲/۶۵- تا ۱/۰۰	۲۸/۰۳	۲۷/۱۵٪
گرم	۱/۰۰ تا ۴/۰۰	۱۷/۳۸	۱۶/۸۵٪
بسیار گرم	۴/۰۰ تا ۸/۰۰	۴/۹۸	۴/۸۲٪
جمع	—	۱۰۲/۶	۱۰۰٪

شکل ۴- نقشه شدت SUHI در پهنه شهری خرم‌آباد

۳-۴- کانون‌های بسیار گرم و بسیار سرد (تحلیل محله‌ای)

کانون‌های بسیار گرم عمدتاً در جنوب شهر (فرودگاه، تیپ ۱۸۴، انبار نفت و اراضی بایر پیرامونی) و در کمربند شرقی (مسکن مهر تا دانشگاه آزاد) دیده شد. این پهنه‌ها عمدتاً با سطوح آسفالتی گسترده، پارکینگ‌های بزرگ، خاک لخت و تراکم پایین پوشش گیاهی همراهند که ذخیره‌سازی گرمای خورشیدی را تسهیل می‌کند. در مقابل، جزایر بسیار سرد درون‌شهری با لکه‌های سبز / آبی و برخی محلات مسکونی مرتبط است (از جمله محور چهارراه بیمارستان تا میدان کیو، محدوده دریاچه کیو و حاشیه رودخانه خرم‌رود)؛ جایی که تبخیر-تعرق آب و گیاهان حاشیه رود، سایه‌اندازی درختان کهنسال و جریان‌های این الگو نشان می‌دهد مداخله‌پذیرترین نقاط برای مدیریت گرمای پهنه‌های حاشیه‌ای با خاک لخت و سطوح نفوذناپذیر گسترده هستند. توزیع حاشیه‌محور کانون‌های داغ، با ویژگی‌های توپوگرافیک دره (سایه‌اندازی کف دره در پاییز و دریافت تابش بیشتر در حاشیه‌های باز) هم‌خوانی دارد و برخلاف الگوی کلاسیک هسته‌محور SUHI در شهرهای دشتی است. همچنین، حضور کاربری‌های صنعتی-نظامی در جنوب شهر، گرمای مصنوعی اضافی از تجهیزات و تردد را به این کانون‌ها افزوده است.



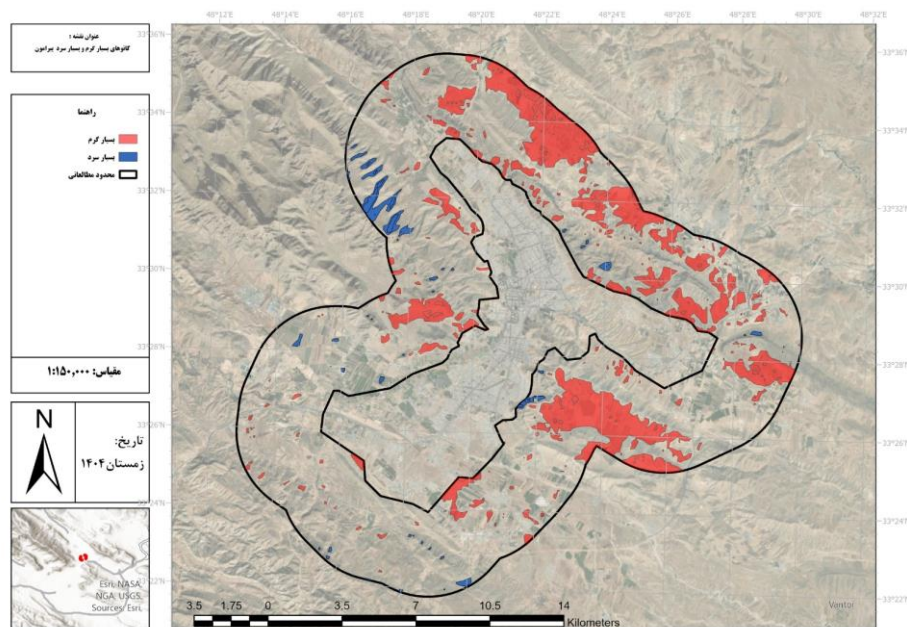
شکل ۵- کانون‌های بسیار گرم و جزایر خنک شهری

۴-۴- محدوده مرجع پیرامونی

محدوده مرجع پیرامونی با مساحت 302.2 km^2 ، یک بافر گسترده اطراف پهنه شهری را شامل می‌شود که عمدتاً اراضی طبیعی، دامنه‌های کوهستانی زاگرس، پوشش گیاهی بلوطزار، مراتع و پهنه‌های روستایی با حداقل تأثیر شهری را دربرمی‌گیرد. این محدوده برای نمایندگی شرایط پایه حرارتی غیرشهری (روستایی / طبیعی) انتخاب شد تا محاسبه SUHI به‌عنوان تفاضل LST شهری از میانگین این پهنه انجام گیرد. توزیع طبقات حرارتی در این محدوده نشان‌دهنده ناهمگنی طبیعی ناشی از ارتفاع، شیب و پوشش گیاهی است، با تمرکز کلاس‌های گرم و بسیار گرم در دامنه‌های آفتاب‌گیر شمالی و شرقی.

جدول ۳- توزیع طبقات شدت حرارتی در محدوده مرجع پیرامونی

درصد	مساحت (km^2)	شدت حرارتی
۱/۹۵٪	۵/۸۵	بسیار سرد
۶/۶۹٪	۲۰/۱	سرد
۱۲/۰۵٪	۳۶/۲۴	نسبتاً سرد
۱۷/۳۱٪	۵۲/۰۳	خنک
۲۲/۲۴٪	۶۶/۸۳	خنثی
۲۳/۶۷٪	۷۱/۱۶	گرم
۱۶/۰۹٪	۵۰	بسیار گرم
۱۰۰٪	۳۰۲/۲	جمع

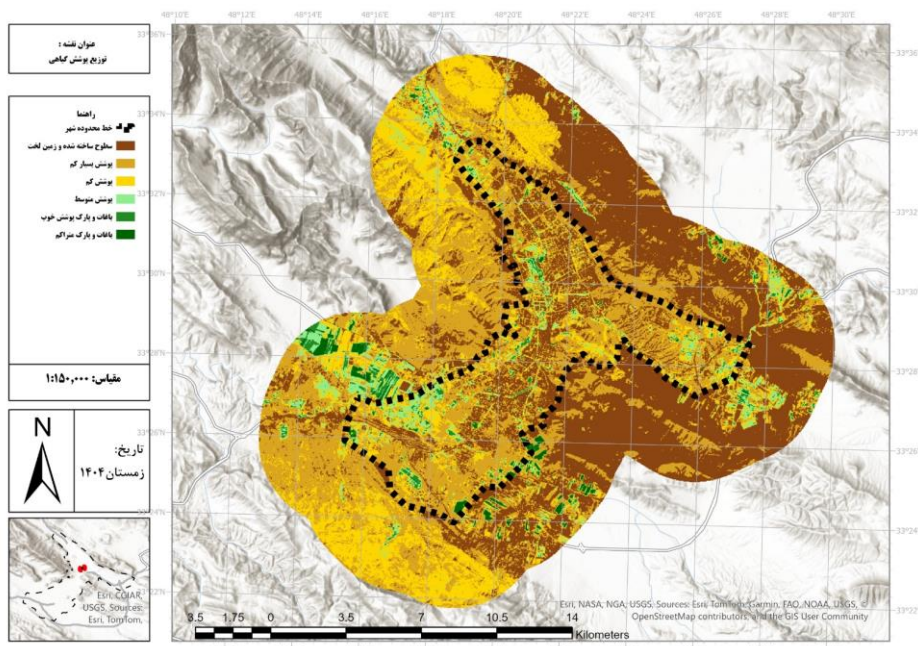


شکل ۶- کانون‌های بسیار گرم و جزایر خنک پیرامونی

۴-۵-NDVI و رابطه LST-NDVI

پوشش گیاهی شهری در خرم‌آباد به‌طور کلی پایین‌تر از محدوده مرجع پیرامونی است و NDVI میانگین شهری حدود ۰/۱۸-۰/۲۵ را نشان می‌دهد، در حالی که در پهنه‌های طبیعی دامنه‌ها به ۰/۴-۰/۶ می‌رسد. لکه‌های سبز پرتراکم عمدتاً در محور دریاچه کیو، پارک‌های مرکزی و باقی‌مانده باغ‌های درون‌دره‌ای متمرکزند، در مقابل حاشیه‌های جنوبی و شرقی با NDVI نزدیک به صفر (خاک لخت و سطوح نفوذناپذیر) همراهند.

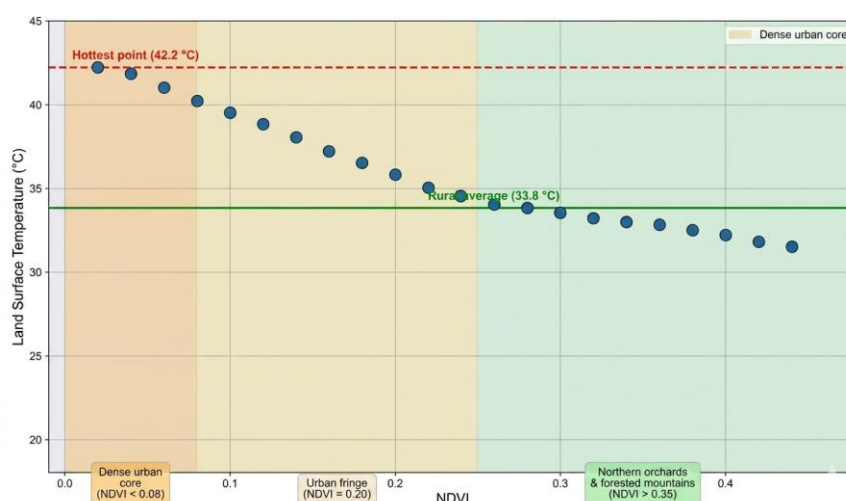
تحلیل آماری رابطه معکوس بسیار قوی بین LST و NDVI را تأیید کرد ($r=-0.82$; $R^2=0.71$; $p<0.001$). این رابطه نشان‌دهنده آن است که ۷۱٪ تغییرات LST توسط پوشش گیاهی تبیین می‌شود. بر اساس معادله رگرسیون خطی، هر ۰/۱ افزایش در NDVI با کاهش متوسط 2.86°C در دمای سطح زمین همراه است؛ اثری که در اقلیم نیمه‌خشک خرم‌آباد، عمدتاً از تبخیر-تعرق و سایه‌اندازی درختان متراکم ناشی می‌شود.



شکل ۷- توزیع NDVI در محدوده مطالعه

جدول ۴- خلاصه نتایج رگرسیون LST-NDVI

شاخص	مقدار	فاصله اطمینان ۹۵٪	خطای استاندارد (SE)
ضریب شیب (β)	-۲۸,۶	[-۲۵,۱ تا -۳۲,۱]	۱,۲۴
عرض از مبدأ (a)	۳۵,۹	[۳۷,۶ , ۳۴,۲]	۰,۸۷
ضریب تعیین (R^2)	۰,۷۱	—	—
ضریب همبستگی (r)	-۰,۸۲	—	—
آماره F (درجه آزادی ۱ و ۲۳۴)	۲۱۴,۷	—	—



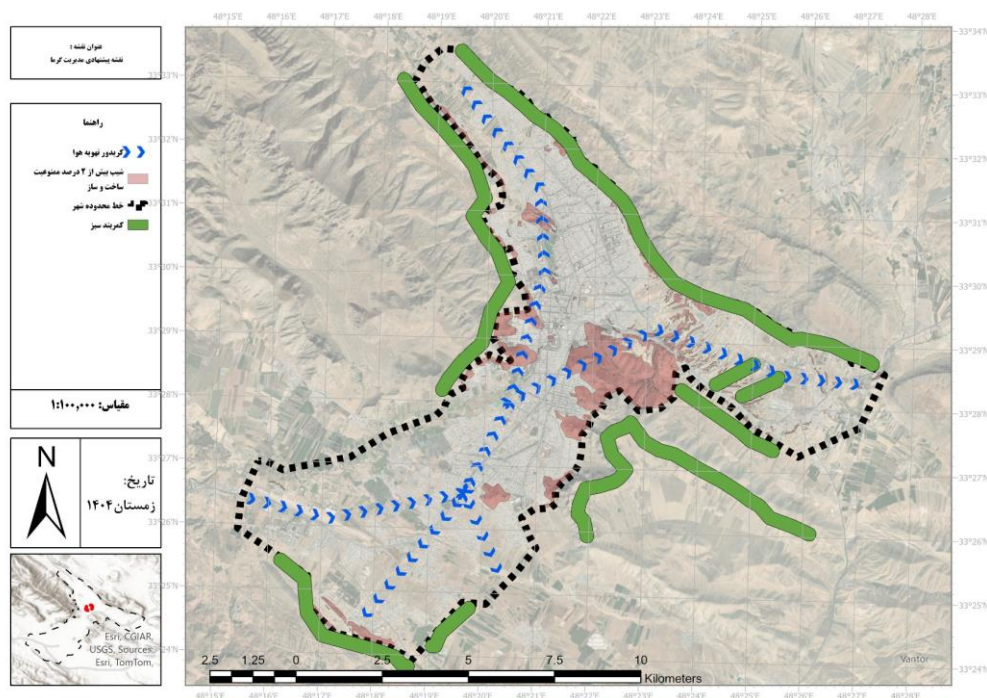
شکل ۸- پراکنش LST در برابر NDVI و خط رگرسیون

۴-۶- نقشه پیشنهادی مدیریت گرما

بر اساس شناسایی کانون‌های بسیار گرم (حاشیه‌های جنوبی و شرقی) و جزایر خنک موجود (محور دریاچه کیو و محلات مرکزی)، نقشه پیشنهادی مدیریت تنش حرارتی با تمرکز بر راهبردهای کم‌هزینه، سازگار با توپوگرافی دره‌ای و مبتنی بر تقویت پوشش گیاهی تدوین شد. پیشنهاد اصلی، ایجاد کمربند سبز با مساحت تقریبی ۲۰ کیلومتر مربع (عرض متوسط ۲۰۰ متر در قطعات حساس حاشیه‌ای شرق-شمال، غرب و جنوب شهر) است؛ به‌ویژه در اطراف فرودگاه، تیپ ۱۸۴، انبار نفت، کمربند مسکن مهر-دانشگاه آزاد و قسمت شرقی بام لریستان (پشت کوه‌های شرقی که از دید شهر پنهان است و عمدتاً زمین لخت و فاقد پوشش گیاهی متراکم دارد). این کمربند با استفاده از گونه‌های بومی مقاوم به خشکی (مانند بلوط، بادام و بنه) و آبیاری کارا، می‌تواند NDVI حاشیه‌ها را به‌طور قابل‌توجه افزایش دهد، ذخیره‌سازی گرما در خاک لخت را کاهش دهد و مانع حرارتی مؤثری در برابر گسترش کانون‌های داغ ایجاد کند. سایر مؤلفه‌های پیشنهادی شامل:

۱. محدودیت ساخت‌وساز در شیب‌های بالای ۲۰٪ دامنه‌های شمالی و جنوبی، برای حفظ پوشش گیاهی طبیعی و جلوگیری از انسداد تهویه.
۲. حفاظت و تقویت کریدورهای تهویه با محور اصلی شمالی-جنوبی (امتداد دره و رودخانه خرم‌رود) به‌عنوان مسیر اصلی جریان کاتاباتیک شبانه و محورهای فرعی جنوب‌غربی و جنوب‌شرقی برای توزیع بهتر هوا و کاهش محبوس‌سازی گرما.

این راهبردها با پیوسته‌سازی شبکه سبز-آبی موجود (به‌ویژه حفاظت از دریاچه کیو، حاشیه رودخانه خرم‌رود و باغ‌های درون‌دره‌ای) ترکیب شده و می‌تواند با تقویت کریدورهای خنک‌کننده آبی (مانند حاشیه رودخانه به‌عنوان مسیر جریان هوای خنک)، اثر تعدیل‌کننده بیشتری ایجاد کند و بر اساس معادله رگرسیون LST-NDVI، می‌تواند کاهش متوسط ۳-۵°C در LST کانون‌های حاشیه‌ای را به‌دنبال داشته‌باشند.



شکل ۹- کمربندهای سبز، پهنه‌های شیب و کریدورهای تهویه (پیشنهادی)

۴-۷- اولویت‌بندی پهنه‌ها و بسته اقدامات پیشنهادی

برای اجرایی‌سازی راهبردهای کاهش تنش حرارتی، پهنه‌های شهری بر اساس شدت SUHI، موقعیت مکانی، حساسیت توپوگرافیک و مداخله‌پذیری به سه سطح اولویت تقسیم شدند. اصل کلی آن است که در پهنه‌های «بسیار گرم» و «گرم» تمرکز بر کاهش سطوح بایر / نفوذناپذیر و افزایش سریع سبزی‌نگی سایه‌دار باشد؛ در پهنه‌های «خنثی» و «خنک» بر حفاظت و پیوسته‌سازی شبکه سبز و در دامنه‌های حساس بر جلوگیری از توسعه جدید تأکید شود.

این ماتریس اولویت‌بندی، اقدامات را با توجه به هزینه، سرعت اجرا و تأثیر بر LST/NDVI هماهنگ می‌کند و امکان تخصیص منابع محدود شهرداری و نهادهای مرتبط را به پهنه‌های پریسک فراهم می‌آورد. اجرای اولویت ۱ می‌تواند در کوتاه‌مدت بیشترین کاهش تنش حرارتی را ایجاد کند.

جدول ۵ - ماتریس اولویت‌بندی و اقدامات پیشنهادی کاهش تنش حرارتی

سطح اولویت	پهنه‌های شاخص	مسئله غالب	اقدامات کوتاه‌مدت (۱-۲ سال)	اقدامات میان‌مدت (۳-۱۰ سال)	شاخص پایش اصلی
۱ (فوری)	جنوب شهر: فرودگاه، تیپ ۱۸۴، انبار نفت و اراضی بایر پیرامونی	خاک لخت گسترده، نفوذناپذیری بالا، گرمای مصنوعی	تثبیت خاک، سایه‌بان موقت، رنگ روشن سطوح، درخت کاری سریع معابر	ایجاد پارک خطی و کمربند سبز مقاوم به خشکی، بازطراحی پارکینگ‌ها با کف‌سازی خنک	کاهش $LST \geq 3^{\circ}C$ ، افزایش $NDVI \geq 0.15$
۱ (فوری)	شرق شهر: مسکن مهر تا دانشگاه آزاد و قسمت شرقی بام لرستان (پشت کوه‌های شرقی پنهان از دید شهر، زمین لخت)	کمربند حرارتی حاشیه‌ای، توسعه پراکنده، خاک برهنه	درخت کاری فوری معابر و نوارهای حاشیه‌ای، پوشش گیاهی کم‌آبر	پیوسته‌سازی کمربند سبز ۲۰۰ متری، احیای پوشش طبیعی پشت کوه	افزایش $NDVI \geq 0.20$ ، کاهش کلاس بسیار گرم
۲ (بالا)	ورودی‌های شهری و زمین‌های خالی (سمت بروجرد و محورهای اصلی)	جزایر گرمایی کوچک و پراکنده	سبزسازی حداقلی، کاشت گونه‌های کم‌آبر	تبدیل به کاربری‌های سازگار، جلوگیری از تبدیل دائمی به خاک لخت	پایداری $NDVI$ ، کاهش مساحت کلاس گرم
۲ (بالا)	محورهای حمل‌ونقل پرتراфик (معابر اصلی با آسفالت تیره)	گرمای مصنوعی از تردد و سطوح تیره	سایه‌اندازی موقت، رنگ روشن آسفالت، مدیریت توقف	کف‌سازی نفوذپذیر و خنک، درخت کاری مداوم معابر	کاهش LST در نوارهای معبری $\leq 2^{\circ}C$
۳ (حفاظتی)	پهنه‌های خنک: دریاچه کیو، حاشیه رودخانه خرم‌رود، محور چهارراه بیمارستان تا میدان کیو و محلات مرکزی	ریسک از دست رفتن جزایر خنک موجود	محدودیت تغییر کاربری، حفاظت درختان کهنسال	تقویت شبکه سبز-آبی، ایجاد مسیرهای پیاده سایه‌دار	حفظ / افزایش مساحت کلاس‌های سرد / خنک
۳ (حفاظتی)	دامنه‌ها و شیب‌های $< 20\%$ (شمالی و جنوبی دره)	انسداد احتمالی تهویه و تخریب اکولوژیک	کنترل فوری ساخت‌وساز، جلوگیری از خاک‌برداری	تدوین ضوابط تراکم و ارتفاع، احیای پوشش گیاهی دامنه	حفظ کریدورهای تهویه، پایداری پوشش طبیعی

۴-۸- سناریوی ساده افزایش NDVI و برآورد کاهش LST

به منظور برآورد پتانسیل کاهش دمای سطح زمین در نتیجه افزایش پوشش گیاهی در پهنه‌های دارای اولویت ۱ (بخش ۳-۷)، از مدل رگرسیون خطی برازش‌شده ۳ استفاده گردید. با این حال، به دلایل زیر این برآوردها باید با احتیاط تفسیر شوند:

$$(LST = -28.6 \times NDVI + 35.9) \quad (3)$$

نخست، رابطه $LST-NDVI$ در سراسر دامنه $NDVI$ کاملاً خطی نیست. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که اثر خنک‌کنندگی پوشش گیاهی در $NDVI$ های پایین (خاک لخت و پوشش کم) شیب تندتری دارد، اما پس از $NDVI$ حدود ۰٫۴ تا ۰٫۵، (پوشش متراکم و سالم) به دلیل اشباع تبخیر-تعرق و سایه‌اندازی کامل، شیب کاهش یافته و اثر آستانه‌ای (threshold effect) ظاهر می‌شود [۱۱، ۱۰]. در این پژوهش، بیش از ۸۵٪ از پیکسل‌های شهری دارای $NDVI$ کمتر از ۰٫۴ هستند، بنابراین کاربرد مدل خطی در این محدوده قابل قبول است. با این حال، در پهنه‌هایی که افزایش $NDVI$ از ۰٫۴ فراتر رود، کاهش LST واقعی کمتر از مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل خطی خواهد بود.

دوم، افزایش NDVI به میزان ۰,۱۵ واحد (مثلاً از ۰,۱۰ به ۰,۲۵) در پهنه‌های اولویت ۱، با فرض تأمین آبیاری کافی و انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب (مانند بلوط، بادام، بنه) و پیوستگی لکه‌های سبز قابل تحقق است. در شرایط خشکی یا پراکندگی لکه‌ها، اثر خنک‌کنندگی به طور معناداری کاهش می‌یابد [۱۲].

سوم، برآورد کاهش LST به جای یک عدد قطعی، به صورت بازه با عدم قطعیت ارائه می‌شود. با استفاده از فاصله اطمینان ۹۵٪ برای ضریب شیب (۳۲,۱- تا ۲۵,۱- برگرفته از جدول ۴) و با فرض افزایش ۰,۱۵ واحدی NDVI، محدوده کاهش LST برابر با:

$$\Delta LST_{min} = |-25.1| \times 0.15 = 3.77^{\circ}C$$

$$\Delta LST_{max} = |-32.1| \times 0.15 = 4.82^{\circ}C$$
(۴)

بنابراین کاهش LST مورد انتظار در خوش‌بینانه‌ترین حالت حدود ۴,۸- درجه سانتی‌گراد، در محافظه‌کارانه‌ترین حالت حدود ۳,۸- درجه سانتی‌گراد و به طور میانگین ۴,۳- درجه سانتی‌گراد خواهد بود.

چهارم، این برآوردها وابسته به شرایط فصلی و آب و هوایی بازه مطالعه (پاییز با تبخیر-تعرق متوسط) هستند و تعمیم آن به تابستان یا خشکسالی‌های شدید نیازمند بررسی جداگانه است.

با وجود این محدودیت‌ها، سناریوی ارائه‌شده یک برآورد پایه و جهت‌دهنده برای برنامه‌ریزان شهری فراهم می‌کند تا اهداف کمی برای افزایش NDVI و کاهش LST تعیین نمایند. اعتبارسنجی میدانی این برآوردها به عنوان اولویت پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود.

جدول ۶- برآورد کاهش LST به ازای افزایش ۰,۱۵ واحدی NDVI

سناریو	ضریب شیب (β)	کاهش LST ($^{\circ}C$)
خوش‌بینانه (حد بالای ۹۵٪ CI)	-۳۲,۱	-۴,۸۲
میانگین (برآورد نقطه‌ای)	-۲۸,۶	-۴,۲۹
محافظه‌کارانه (حد پایین ۹۵٪ CI)	-۲۵,۱	-۳,۷۷

۹-۴- محدودیت‌ها و پیشنهاد پژوهش آینده

این پژوهش صرفاً یک بازه زمانی پاییزی را پوشش می‌دهد؛ از این رو، الگوی SUHI و رابطه LST-NDVI ممکن است در فصول دیگر (به‌ویژه تابستان با تابش و تبخیر-تعرق بالاتر) متفاوت باشد و همچنین تحت تأثیر عواملی مانند نوع پوشش گیاهی، دسترسی به آب و شرایط محلی قرار گیرد که در این مطالعه به طور کامل بررسی نشده‌اند. از دیگر محدودیت‌های مهم، تمرکز صرف بر SUHI روزانه (گذر ماهواره لندست حدود ساعت ۱۱:۳۰ محلی) و عدم بررسی الگوی شبانه است. در دره‌های کوهستانی مانند خرم‌آباد، پدیده وارونگی دمایی شبانه می‌تواند منجر به تشکیل جزیره حرارتی معکوس شود (هوای سرد در کف دره و هوای گرم‌تر در دامنه‌ها)؛ بنابراین تعمیم نتایج به ساعات شب مجاز نیست. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی به تحلیل چندفصلی و چندساله برای بررسی تغییرات بین‌ساله SUHI، ارزیابی نقش بادهای دره‌ای با داده‌های میدانی، افزودن لایه‌های نفوذناپذیری و کاربری زمین برای تبیین بهتر کانون‌های داغ و بررسی تأثیر گونه‌های مختلف گیاهی و الگوهای آبیاری بر اثر خنک‌کنندگی بپردازند. همچنین، برای مطالعه SUHI شبانه و اثر وارونگی، استفاده از داده‌های حرارتی شب‌هنگام توصیه می‌شود. چنین پژوهش‌هایی می‌توانند درک بهتری از دینامیک SUHI و راهبردهای مؤثرتر مدیریت گرما ارائه دهند.

۵- نتیجه گیری

این پژوهش تحلیل جامعی از جزیره دمایی سطحی و نقش تعدیل کننده پوشش گیاهی در فضای شهری دره‌ای-کوهستانی خرم‌آباد می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهند که خرم‌آباد در فصل پاییز الگوی SUHI حاشیه‌محور، با کانون‌های بسیار گرم در حاشیه‌های جنوبی و شرقی است. این الگوی تأثیر توپوگرافی دره‌ای است که با ایجاد سایه‌اندازی و تهویه، کف دره را خنک می‌کند، در حالی که پهنه‌های باز، بایر و نفوذناپذیر حاشیه‌های گرم‌تر می‌شوند. همچنین رابطه معکوس قوی بین LST و NDVI را بررسی می‌کند همچنین، زیرساخت آبی موجود (رودخانه خرم‌رود و دریاچه کیو) در کنار پوشش گیاهی، نقش مکمل در ایجاد جزایر خنک و تعدیل SUHI دارد و تأثیر خنک‌سازی می‌تواند پوشش گیاهی را برجسته کند. به‌طور خاص، هر ۰/۱ افزایش در NDVI با کاهش ۲/۸۶ درجه سانتی‌گراد در LST همراه است که گیاهی را به‌عنوان راهبردی افزایش می‌دهد. بر اساس این یافته‌ها، ایجاد کمربند سبز، تقویت شبکه سبز-آبی (حاشیه رودخانه)، محدودیت ساخت‌وساز در شیب‌های تند و حفاظت از کریدورهای تهویه به‌عنوان راهبردهایی برای مدیریت گرما پیشنهاد می‌شوند. این امر، همراه با اولویت‌بندی پهنه‌های داغ و بسته‌های مناسب، می‌تواند سطح حرارتی را در خرم‌آباد به‌طور قابل توجهی کاهش دهد. کمربند سبز پیشنهادی با مساحت تقریبی ۲۰ کیلومتر مربع، هدف افزایش NDVI در مناطق حساس را دارد و بدین ترتیب LST را کاهش داده و اثر حرارتی شهری را تعدیل می‌کند.

اجرای این راه‌ها برای افزایش تاب‌آوری شهر در برابر تنش حرارتی، بهبود کیفیت زندگی ساکنان و کاهش زیست‌محیطی ناشی از گرمایش شهری است. پژوهش‌ها و پایش‌های آتی باید برای ارزیابی اثربخشی این سازگار و سازگاری آن‌ها با شرایط شهری و اقلیمی در حال تغییر کنند. همچنین، بررسی گونه‌های مختلف گیاهی، الگوهای آبیاری و تغییرات فصلی بر دینامیک SUHI می‌تواند درک بهتری از سازوکارهای کاهش گرما در شهرهای دره‌ای-کوهستانی ارائه دهد.

۶- فهرست منابع

1. Oke, T. R. (1982). *Boundary Layer Climates* (2nd ed.). London: Methuen. DOI: [10.4324/9780203407219](https://doi.org/10.4324/9780203407219)
2. Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voegt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press. DOI: [10.1017/9781139016476](https://doi.org/10.1017/9781139016476)
3. Voegt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370-384. DOI: [10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
4. Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), 335-344. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007)
5. Lazzarini, M., Marpu, P. R., & Ghedira, H. (2013). Temperature-land cover interactions: The inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas. *Remote Sensing of Environment*, 130, 136-152. DOI: [10.1016/j.rse.2012.11.007](https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.11.007)
6. Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1-26. DOI: [10.1002/joc.859](https://doi.org/10.1002/joc.859)
7. Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900. DOI: [10.1175/BAMS-D-11-00019.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1)
8. Li, X., Zhou, Y., Asrar, G. R., Imhoff, M., & Li, X. (2017). The surface urban heat island response to urban expansion: A panel analysis for the conterminous United States. *Science of the Total Environment*, 605-606, 426-435. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.06.229](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.229)

9. Manoli, G., Fatichi, S., Schläpfer, M., Yu, K., Crowther, T. W., Meili, N., Burlando, P., Katul, G. G., & Bou-Zeid, E. (2019). Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 573(7772), 55-60. DOI: [10.1038/s41586-019-1512-9](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1512-9)
10. Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467-483. DOI: [10.1016/j.rse.2003.11.005](https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005)
11. Peng, J., Jia, J., Liu, Y., Li, H., & Wu, J. (2018). Seasonal contrast of the dominant factors for spatial distribution of land surface temperature in urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 215, 255-267. DOI: [10.1016/j.rse.2018.06.010](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.010)
12. Marando, F., Heris, M. P., Zulian, G., Udías, A., Mentaschi, L., Chrysoulakis, N., Parastatidis, D., & Maes, J. (2022). Urban heat island mitigation by green infrastructure in European functional urban areas. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103564. DOI: [10.1016/j.scs.2021.103564](https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103564)
13. Zhou, D., Xiao, J., Bonafoni, S., Berger, C., Deilami, K., Zhou, Y., Frolking, S., Yao, R., Qiao, Z., & Sobrino, J. A. (2019). Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives. *Remote Sensing*, 11(1), 48. DOI: [10.3390/rs11010048](https://doi.org/10.3390/rs11010048)
14. Deilami, K., Kamruzzaman, M., & Liu, Y. (2018). Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 67, 30-42. DOI: [10.1016/j.jag.2017.12.009](https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.009)
15. Yuan, F., & Bauer, M. E. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 106(3), 375-386. DOI: [10.1016/j.rse.2006.09.003](https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003)
16. Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Skoković, D., Mattar, C., & Cristóbal, J. (2014). Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10), 1840-1843. DOI: [10.1109/LGRS.2014.2312032](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032)
17. Ahmadi, M. R., Karimi, A., & Rezaei, H. (2022). The impact of land use and vegetation cover on the formation of urban heat islands: Case study of Qayen city. *Journal of Geography and Urban Space Development*, 9(2), 1-15. Available at: <https://ensani.ir/fa/article/download/509729>
18. Najafian Gorji, M. R., Moghimi, E., & Mohammadi, H. (2017). Assessment of temperature trends, urban heat island patterns, and vegetation cover during hot periods in Tehran using Landsat satellite imagery. *Journal of Natural Geography*, 10(38), 1-18. Available at: https://journals.iau.ir/article_539498_37cdec78dcc95ca7f078e5ad10e45dca.pdf
19. Hashemi, S. A., Karami, F., & Ahmadi, M. (2013). Spatial analysis of land surface temperature and urban heat island using satellite imagery: Case study of Mashhad city. *Journal of Geography and Environmental Planning*, 24(4), 119-136.
20. Meng, X., et al. (2022). Accuracy evaluation of the Landsat 9 land surface temperature product. *IEEE JSTARS*, 15, 8694-8703.

21. Cook, M., et al. (2021). Validation of Landsat 9 thermal infrared sensor. *Remote Sensing*, 13(22), 4562.
22. Li, Z. L., et al. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131, 14-37.
23. Ghorbani, R., Safari, A. A., & Karimi Rad, M. (2016). Investigating the effectiveness of green spaces in improving urban thermal comfort: Case study of Zabol city. *Geographical Research Quarterly*, 31(1), 179–192.