



COPYRIGHTS

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



HOW TO CITE THIS ARTICLE

Rezaee Sh. Salaripour A. Spatio-temporal dynamics of LULC and vegetation structure and their relationship with the urban heat island phenomenon in Rasht. *Urban Economics and Planning* 7(4):18-46.

DOI: [10.22034/uep.2025.556211.1756](https://doi.org/10.22034/uep.2025.556211.1756)

## پویایی فضایی - زمانی LULC و پوشش گیاهی و ارتباط آن با پدیده جزایر گرمایی در شهر رشت

شهریار رضایی<sup>۱</sup>؛ علی اکبر سالاری پور<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد برنامه ریزی شهری، گروه شهرسازی، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲. دانشیار گروه شهرسازی، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

### چکیده

رشد شتابان و غیرقابل کنترل شهرنشینی در کلان شهرهای مرطوب شمال ایران، مانند رشت، باعث تبدیل اراضی کشاورزی و سبز به سطوح نفوذناپذیر شده که به تشدید جزایر گرمایی شهری (SUHI) و کاهش کیفیت زیست شهری منجر شده است. این پژوهش با هدف تحلیل تغییرات بلندمدت کاربری اراضی و پوشش زمین (LULC) و تأثیر آن‌ها بر الگوهای دمای سطح زمین (LST) در رشت از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ انجام شده است. داده‌های حرارتی ماهواره‌های Landsat برای استخراج LST با الگوریتم‌های اختصاصی هر سنجنده به کار گرفته شده و برای رفع نواقص SLC در +ETM، از ترکیب زمانی و نرمال‌سازی پرتوی استفاده شده است. نقشه‌های LULC و ساختار شهری با تصاویر Landsat Sentinel-2 و استفاده از شاخص‌های طیفی NDVI، NDBI، DBI و EBBI تولید شده و روابط بین ساختار پوشش و دمای سطح با تحلیل همبستگی کمی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد سهم سطوح ساخته‌شده از حدود ۴۱ درصد به ۶۳ درصد افزایش یافته و پوشش سبز و اراضی کشاورزی کاهش یافته است؛ این تغییرات با افزایش محسوب LST و ثبت بیشترین دما در سال ۲۰۱۶ هم‌زمان بوده است. همبستگی منفی میان NDVI و LST و همبستگی مثبت میان شاخص‌های ساخت‌وساز و دمای سطح، نشان‌دهنده تأثیر سطوح نفوذناپذیر بر گرمایش شهری است. در نتیجه، تقویت شبکه‌های سبز - آبی و استفاده از مصالح نفوذپذیر برای ارتقای تاب‌آوری حرارتی و برنامه‌ریزی اقلیم‌محور پیشنهاد می‌شود.

### کلمات کلیدی

تحلیل فضایی - زمانی  
تغییر کاربری و پوشش زمین (LULC)  
تنوع کاربری زمین  
جزیره گرمایی سطحی شهری (SUHI)  
دمای سطح زمین (LST)  
سنجش‌ازدور حرارتی مادون قرمز

\* نویسنده مسئول: [salaripour@guilan.ac.ir](mailto:salaripour@guilan.ac.ir)

## ۱. مقدمه

آن‌ها تنیده شده است، تعامل میان میزان رطوبت و ویژگی‌های سطحی می‌تواند شدت و توزیع فضایی UHI را تعدیل کند (Sharmin & Chappell, 2025. Zafar et al., 2024). درک رابطه میان ناهمگنی LULC و آرایش پوشش گیاهی با الگوهای درون‌شهری LST در چنین محیطی، برای مدیریت خطر گرما، بهبود آسایش حرارتی فضای باز، کاهش بار انرژی سرمایشی و دستیابی به هم‌افزایی در بهبود کیفیت هوا ضروری است (Li et al., 2019. Wang et al., 2024).

### ۳.۱. هدف، دامنه و رویکرد پژوهش

بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش، تحلیل جامع روابط میان تغییرات کاربری و پوشش زمین، ساختار پوشش گیاهی و شدت جزیره گرمایی سطحی شهری (SUHI) در شهر رشت و مناطق پیرامونی آن است. در این راستا، مطالعه حاضر با رویکردی چندمرحله‌ای، ابتدا به نقشه‌برداری از تنوع کاربری زمین و ساختار پوشش گیاهی در محدوده شهری و حومه رشت می‌پردازد و سپس تفاوت‌های دمای سطح زمین (LST) را میان انواع کاربری‌ها و ترکیب‌های مختلف پوشش گیاهی مورد سنجش قرار می‌دهد. در ادامه، الگوی شدت فضایی و توزیع نقاط داغ حرارتی (Hotspots) در مناطق درون‌شهری تحلیل می‌شود تا نواحی بحرانی گرمایی شناسایی شوند. در نهایت، با بهره‌گیری از مدل‌سازی آماری فضایی، پیوندهای میان ناهمگنی کاربری و پوشش زمین (LULC)، ساختار پوشش گیاهی و شدت SUHI تبیین می‌شود و نتایج حاصل، مبنایی علمی برای تدوین راهبردهای برنامه‌ریزی شهری با محوریت تقویت زیرساخت‌های سبز، بهبود پیوستگی فضایی فضاهای طبیعی و مدیریت هوشمند کاربری زمین در جهت کاهش تنش حرارتی و ارتقای تاب‌آوری اقلیمی شهر رشت فراهم می‌سازد. در بازه بلندمدت ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، داده‌های LULC و LST از تصاویر ماهواره‌ای Landsat/Sentinel استخراج شده، اصلاحات اتمسفری و پرتوی استاندارد و هم‌ترازی زمانی انجام گرفته و شاخص‌های چندگانه NDVI، NDBI، DBI و EBBI به منظور بررسی ارتباط SUHI با ترکیب و پیکربندی چشم‌انداز با در نظر گرفتن متغیرهای هم‌وابسته (تابش خورشیدی، پوشش ابر، باد، ویژگی‌های مصالح و تراکم شهری) به کار رفته‌اند (Tang et al., 2017. Li et al., 2019. Alhazmi et al., 2022).

### ۴.۱. پیشینه جهانی و اهمیت پیکربندی پوشش گیاهی

شواهد متعددی از سنجش‌ازدور تأیید می‌کند که تغییرات کاربری و پوشش زمین (LULC) عامل اصلی تشدید جزیره گرمایی سطحی شهری (SUHI) هستند و این وابستگی در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف پایدار باقی می‌ماند. در مقیاس پیش‌بینی، مطالعه‌ای در گوانگجو نشان داد تداوم شهرنشینی سریع احتمالاً تعادل پوشش‌های خنک‌کننده را تا سال ۲۰۳۲ به هم می‌زند؛ به گونه‌ای که پهنه‌های آبی مانند رودخانه‌ها و تالاب‌ها حدود ۴۶/۹۷ درصد و پوشش گیاهی ۳۴/۲۴ درصد کاهش یافته و مناطق ساخته‌شده با افزایش چشمگیر معادل ۲۶۳/۷۱ درصد روبه‌رو خواهند شد. در نتیجه، نسبت مناطق با دمای بالا و نسبتاً بالا به ترتیب ۱۲۷/۷۶ درصد و ۳۷۵/۹۲ درصد افزایش خواهد یافت که نشان‌دهنده تقویت چشمگیر شدت SUHI است (Xiang et al., 2024). به طور مشابه، در شهر چانگ‌چون، نواحی شهری بین سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۴ بیش از چهار برابر افزایش یافته و سهم مناطق UHI از ۱۵/۲۷ درصد به ۲۹/۶۲ درصد رسیده است. میانگین دمای سطح زمین (LST) در

پدیده جزیره گرمایی شهری (Urban Heat Island - UHI) یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی و اقلیمی عصر حاضر است که شهرها با آن مواجه‌اند و تأثیر مستقیمی بر کیفیت زندگی، مصرف انرژی و سلامت عمومی دارد (Sharmin & Chappell, 2025. Wei, Lemoy, & Caruso, 2024. Siswanto et al., 2023. Ramsay et al., 2023). این پدیده به دمای بالاتر در مناطق شهری نسبت به نواحی پیرامونی روستایی یا حومه‌ای اشاره دارد. عوامل اصلی شکل‌گیری و تشدید UHI عبارت‌اند از: تغییر کاربری زمین (LUC) و دگرگونی کاربری/پوشش زمین (LULC) در نتیجه گسترش شهری. تبدیل سطوح طبیعی مانند پوشش گیاهی به سطوح مصنوعی نظیر آسفالت، بتن و ساختمان‌ها موجب کاهش آلبدو (بازتابندگی سطحی) و تبخیر - ترقق و در مقابل، افزایش جذب انرژی خورشیدی می‌شود. در نتیجه، این فرایندها به افزایش دمای سطح زمین (LST) و دمای هوای محیطی منجر می‌شوند (Gazi et al., 2021. Koko et al., 2021. Sharma & Vashishtha, 2023). پیامدهای این پدیده در حوزه سلامت عمومی و انرژی بسیار قابل توجه‌اند: قرارگیری در معرض گرما با افزایش خطرات سلامت و رشد تقاضای سرمایش همراه است، در حالی که تغییرات در ترکیب شیمیایی جو و دینامیک آلودگی می‌تواند کیفیت هوا را نیز بیشتر تضعیف کند (Li et al., 2019. Wang et al., 2024).

### ۱.۱. نقش LULC و پوشش گیاهی

از جمله محرک‌های اصلی SUHI، تغییرات LULC است که پوشش نفوذناپذیر را به بهای از بین رفتن پوشش سبز شهری گسترش می‌دهد. حذف درختان و فضاهای سبز ظرفیت زیستی خنک‌کنندگی را از طریق کاهش تبخیر - ترقق و سایه‌اندازی کاهش می‌دهد، در حالی که گسترش آسفالت و بتن موجب افزایش ذخیره گرما در روز و آزادسازی آن در شب می‌شود (Tang et al., 2017. Zafar et al., 2024). شواهد پژوهش‌های اخیر نقش کاهنده اراضی بوم‌شناختی و زیرساخت‌های سبز را در تخفیف تنش حرارتی شهری زمانی که وسعت و پیوستگی فضایی آن‌ها حفظ یا تقویت شود، تأیید می‌کند (Tan et al., 2021. Feng et al., 2021). انتشار حرارت انسان‌زاد از ساختمان‌ها و سامانه‌های سرمایشی می‌تواند با افزودن حرارت مستقیم به لایه مرزی شهری، اثرات گرمایی را تشدید کند (Alhazmi et al., 2022). در حالی که ترافیک و فعالیت‌های صنعتی نیز بر الگوی حرارتی و کیفیت هوا تأثیرگذارند (Wang et Sharmin & Chappell, 2025. al., 2024). مجموعه این فرایندها گرمایش شهری را تشدید کرده و سیگنال UHI را در بسیاری از شهرهای در حال رشد تقویت می‌کنند (Wei et al., 2024).

### ۲.۱. ویژگی‌های خاص شهر رشت و ضرورت مطالعه

در این زمینه گسترده، شهر رشت به عنوان یک کلان‌شهر مهم در شمال ایران طی دهه‌های اخیر شاهد گسترش سریع کالبدی، رشد جمعیت و فعالیت‌های ساختمانی فشرده بوده است. این تحولات سبب دگرگونی در الگوی LULC و تغییر ساختار پوشش گیاهی شهری شده‌اند که می‌توانند به شکل معناداری بر پویایی SUHI اثرگذار باشند. در شهرهای مرطوبی مانند رشت که موزاییکی از پوشش‌های گیاهی متنوع، شبکه‌های طبیعی آبیاری و نظام‌های سنتی کشاورزی (مانند شالیزارها و باغ‌های چای) در ساختار شهری

مناطق شهری همواره بالاتر از پیرامون روستایی بوده و با نسبت سطوح نفوذناپذیر همبستگی مثبت قوی نشان داده است (Yang et al., 2017). در منطقه کلان‌شهری فینیکس، تبدیل اراضی به کاربری‌های مسکونی و نفوذناپذیر، هر دو سیگنال SUHI روزانه و شبانه را به شدت تقویت کرده است، در حالی که پوشش‌های گیاهی با افزایش تبخیر - تعرق و کاهش تجمع گرمای محسوس، به طور مؤثر LST را کاهش داده‌اند (Wang et al., 2016). همچنین در دهلی و بمبئی، گرمایش مداوم، شکل‌گیری نقاط داغ حرارتی و کاهش شاخص آسایش حرارتی شهری (UTFVI) مشاهده شده که حساسیت SUHI به شاخص‌های LULC، به‌ویژه NDVI، را تأیید می‌کند (Shahfahad et al., 2022). با این حال، فقط میزان پوشش گیاهی تعیین‌کننده واکنش حرارتی شهر نیست؛ بلکه پیکربندی فضایی و انسجام چشم‌انداز نیز نقشی کلیدی دارد. در چانگ‌چون، افزایش سهم پوشش گیاهی و NDVI با کاهش قابل توجه  $LST \approx -0.62$  تا منفی (0/81) همبستگی داشته است، در حالی که گسستگی و پیچیدگی لکه‌های افزایش شاخص‌های (Split, LSI, PD) به افزایش دمای سطحی منجر شده‌اند. در مقابل، هم‌پیوستگی و انسجام فضایی پوشش گیاهی افزایش شاخص‌های (LP, Cohesion, AI) اثرات خنک‌کنندگی چشمگیری نشان داده‌اند، به گونه‌ای که تنها با ۱۰ درصد افزایش در شاخص هم‌تجمعی LST، حدود ۱/۹ تا ۳/۸ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. این اثر در مقیاس‌های مکانی بزرگ‌تر تشدید می‌شود. چنین یافته‌هایی برای شهرهای مرطوب با مناظر سبز - آبی موزاییکی مانند رشت بسیار قابل توجه‌اند، زیرا بر اهمیت هم‌زمان وسعت و پیکربندی پوشش گیاهی در تعدیل شدت SUHI و بازگرداندن تعادل انرژی سطحی تأکید می‌کنند (Zhibin et al., 2015). در مقیاس خرد، نتایج به‌دست‌آمده از نقشه‌برداری UHI در سطح خیابان با استفاده از شبکه‌های حسگر اینترنت اشیا شهری نشان می‌دهد محیط‌های با تراکم بالای ساخت‌وساز به دلیل ظرفیت حرارتی بیشتر مصالح ساختمانی، دامنه نوسانات دمای روزانه کمتری دارند و در شب گرم‌تر باقی می‌مانند. در مقابل، پیوستگی و وسعت فضاهای سبز شهری پایداری «نقاط خنک» را تقویت می‌کند؛ شواهد نشان می‌دهد اثر خنک‌کنندگی شبانه پارک‌ها از پهنا مجاور رودخانه‌ها نیز فراتر می‌رود. بزرگی این اثر به ویژگی‌های پوشش گیاهی، مورفولوژی شهری و عامل دید آسمان (Sky View Factor) بستگی دارد و بر یک نکته کلیدی در طراحی شهری تأکید می‌کند: زیرساخت سبز بدون در نظر گرفتن مورفولوژی شهری نمی‌تواند نتایج اقلیمی مؤثری ایجاد کند (Jang et al., 2024). از منظر روش‌شناختی، دو پیشرفت عمده در پژوهش‌های اخیر SUHI حاصل شده است: نخست، به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی LST و شناسایی محرک‌های مورفولوژیکی گرمای شهری است. در میان این روش‌ها، شبکه‌های عصبی عمیق (DNN) و مدل تقویت‌گرایان نهایی (XGB) در مطالعه‌های روی شهر شیراز دقت پیش‌بینی بالاتری نشان دادند، هرچند دینامیک‌های زمانی و سناریوهای تغییر کاربری زمین (LUCC) تنها به طور جزئی لحاظ شده‌اند (Tanoori et al., 2024). پیشرفت دوم، توسعه رویکردهای تلفیقی فضایی - زمانی برای تولید نقشه‌های پیوسته LST با تفکیک مکانی بالا (۳۰ متر) است که با ترکیب مدل پایین‌مقیاس‌سازی جنگل تصادفی (RF) با مدل FSDAF حاصل شد. این روش ترکیبی امکان پیش‌دقیق‌تر SUHI را فراهم کرد و نشان داد شدت SUHI تابستانی در چنگدو بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ از ۲/۷۸ درجه سانتی‌گراد به ۴/۰۴ درجه سانتی‌گراد

افزایش یافته است، به طوری که بیشترین گرمایش در سطوح نفوذناپذیر و کمترین در پهنه‌های آبی مشاهده شد (Yao et al., 2020).

۵.۱. برداشت‌های تحلیلی از مطالعات پیشین در راستای این پژوهش  
با وجود این پیشرفت‌های روش‌شناختی، هنوز خلأهای پژوهشی مهمی وجود دارد. بسیاری از مطالعات، محرک‌های اجتماعی - اقتصادی و سناریوهای تغییر اقلیم را نادیده گرفته‌اند و تبیین‌های فرایندی کافی برای سازوکارهای فیزیکی کلیدی مانند تغییر آلودگی، اینرسی حرارتی و دسترسی به رطوبت سطحی ارائه نکرده‌اند (Xiang et al., 2024). چارچوب پژوهش حاضر مستقیم به این کاستی‌ها پاسخ می‌دهد و با ترکیب طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (SVM)، الگوریتم تک‌پنجره‌ای (Mono-Window) برای بازیابی LST و مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی - سلولی (CA-ANN)، پویایی‌های شهری و حرارتی را تا سال ۲۰۲۲ پیش‌بینی می‌کند. در این چارچوب، شاخص‌های چندمنبعی از جمله NDVI، NDBI، DBI و EBBI به همراه متغیرهای کمکی (تابش خورشیدی، پوشش ابر، باد، ویژگی مصالح و تراکم شهری) به صورت مشترک تحلیل می‌شوند تا ناهمگنی فضایی LULC و پیوندهای آن با رفتار حرارتی شهری آشکار شود. پیشرفت‌های مکمل در یادگیری عمیق و تحلیل سنجش‌ازدور مبتنی بر RGB نشان داده‌اند معماری‌های شبکه عصبی می‌توانند دقت استخراج نقشه‌های پایه شهری را به طور چشمگیری بهبود بخشند. هرچند این روش‌ها به طور مستقیم بر UHI متمرکز نیستند، اما پتانسیل ادغام هوش مصنوعی و سنجش‌ازدور را برای ارتقای طبقه‌بندی LULC و پیش‌بینی تغییرپذیری حرارتی شهری نشان می‌دهند (Benayad et al., 2025). افزون بر این، مطالعات اقلیمی اخیر تأیید کرده‌اند که تغییر اقلیم و دگرگونی کاربری زمین به صورت هم‌افزا ساختار حرارتی مناظر را دگرگون می‌سازند. افزایش دما و تغییر در الگوهای بارش به کاهش پوشش گیاهی، تغییر هیدرولوژی سطحی و به هم خوردن تعادل انرژی - رطوبتی سطح زمین منجر شده و در نتیجه، موجب بروز ناهنجاری‌های حرارتی موضعی و افزایش LST می‌شوند. این هم‌افزایی مفهومی، ضرورت اتخاذ چارچوبی یکپارچه LULC اقلیم را برای بررسی پویایی SUHI در محیط‌های شهری مرطوبی همچون رشت، که در آن‌ها ناهمگنی بوم‌شناختی و فشار انسان‌زاد هم‌زمان وجود دارد، برجسته می‌کند (Karimi et al., 2025).

## ۲. مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، شهر رشت، مرکز استان گیلان در شمال ایران است. به منظور بررسی پویایی‌های فضایی - زمانی کاربری و پوشش زمین (LULC) و ارتباط آن با شدت جزیره گرمایی شهری (UHI)، از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه استفاده شد. داده‌های مورد استفاده شامل تصاویر ماهواره‌های Landsat (TM, ETM+, OLI) و Sentinel-2 مربوط به چهار دوره نماینده از فصل تابستان سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴ بودند که از پایگاه USGS Earth Explorer دریافت شدند. برای سال ۲۰۰۸، از داده‌های Landsat 7 (ETM+) استفاده شده و برای سال‌های بعدی از داده‌های Landsat 8 بهره‌برداری شده است. فصل تابستان به طور خاص انتخاب شد، زیرا در سایر فصل‌های سال، پوشش ابری گسترده در رشت دسترسی به تصاویر با کیفیت بالا را محدود می‌کند. تمامی تصاویر پیش از تحلیل، تحت اصلاحات پرتوی، اتمسفری و هندسی استاندارد

قرار گرفتند تا یکنواختی و قابلیت مقایسه داده‌ها در دوره‌های زمانی مختلف تضمین شود. برای اصلاحات اتمسفری، از الگوریتم (Quick Atmospheric Correction) QUAC استفاده شد که به طور مؤثر اثرات جو را اصلاح می‌کند و دقت داده‌های ماهواره‌ای را برای تحلیل‌های سنجش‌ازدور بهبود می‌بخشد. این الگوریتم به‌ویژه برای داده‌های Landsat و Sentinel-2 مناسب است و تأثیرات جو مانند پراکندگی نور و آلاینده‌ها را به طور دقیق تصحیح می‌کند. فرایند پیش‌پردازش در نرم‌افزار ENVI 5.3 و بر اساس دستورالعمل‌های معتبر تحلیل سنجش‌ازدور چندزمانه انجام شد. در خصوص استفاده از داده‌های Landsat و Sentinel-2، درخور یادآوری است که این دو سنجنده با ویژگی‌های تفکیک مکانی و زمانی متفاوت، به صورت ترکیبی برای اهداف مختلف به کار گرفته شدند Sentinel-2. به منظور بهبود طبقه‌بندی LULC (با تفکیک مکانی بالاتر و باندهای طیفی بیشتر) و Landsat برای استخراج LST (با بهره‌گیری از داده‌های حرارتی دقیق‌تر) استفاده شد. این ترکیب، امکان دستیابی به نتایج دقیق‌تر را فراهم ساخت و محدودیت‌های هر سنجنده به طور مؤثری جبران شد. طبقه‌بندی نظارت‌شده با استفاده از الگوریتم بیشینه شباهت (Maximum Likelihood Classifier - MLC) برای تولید نقشه‌های کاربری زمین در هر سال به کار رفت. طبقات اصلی کاربری زمین شامل اراضی ساخته‌شده، پوشش گیاهی، زمین‌های کشاورزی و پهنه‌های آبی بودند. دقت طبقه‌بندی با استفاده از تصاویر با وضوح بالا از Google Earth ارزیابی شد. این تصاویر برای مقایسه و ارزیابی صحت طبقه‌بندی‌های انجام‌شده استفاده شدند. دمای سطح زمین (LST) از طریق الگوریتم Mono-Window و با بهره‌گیری از باندهای حرارتی (Landsat TM) و باند ۶ استخراج شد. برای داده‌های حرارتی Landsat 8 (TIRS) و Sentinel-2 که فاقد باند حرارتی هستند، از الگوریتم Generalized Single-Channel Method (GSCM) برای استخراج LST از داده‌های Landsat 8 و از NDVI به عنوان یک شاخص کمکی برای Sentinel-2 استفاده شد. سپس نقشه‌های LST با شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) و داده‌های LULC تلفیق شد تا نواحی جزیره گرمایی شهری مشخص شوند. مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین LST برای پنج ناحیه اداری شهر رشت محاسبه شد تا تغییرپذیری حرارتی درون شهری به‌دقت ترسیم شود. رابطه بین LULC، شاخص‌های پوشش گیاهی و LST با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی مورد بررسی قرار گرفت. این مدل‌ها قدرت و جهت روابط بین شدت UHI و متغیرهای تبیین‌گر را کمی‌سازی کردند. از این‌رو در این مطالعه، از رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) برای بررسی رابطه بین دمای سطح زمین (LST) و متغیرهای جغرافیایی/فضایی مختلف شامل NDVI، NDBI، EBBI و DBI استفاده شده است. این روش مدل‌سازی محلی، که از جمله تکنیک‌های پیشرفته در تحلیل داده‌های فضایی است، به‌ویژه برای داده‌های جغرافیایی با ویژگی‌های همبستگی فضایی بسیار مناسب است. رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) امکان تحلیل همبستگی‌های محلی را فراهم می‌آورد که در آن متغیرهای مستقل به طور متفاوت در نقاط مختلف فضایی تأثیر می‌گذارند. تحلیل فضایی مبتنی بر GIS با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای ArcGIS انجام شد تا الگوهای فضایی در چهار دوره مورد مطالعه ارزیابی و مقایسه شوند. با ادغام نقشه‌های LULC، شاخص‌های پوشش گیاهی و داده‌های دمای سطح زمین، این پژوهش ارزیابی جامعی از چگونگی تأثیر گسترش شهری و پویایی پوشش گیاهی بر شدت جزیره

گرمایی در شهر رشت ارائه می‌دهد. در نتیجه، چارچوب سنجش‌ازدور چندزمانه و تحلیل‌های RS-GIS به‌کاررفته در این پژوهش به طور مشخص برای ردیابی پویایی‌های فضایی - زمانی کاربری و پوشش زمین و تبیین رابطه آن‌ها با شدت جزیره گرمایی شهری در شهر رشت طراحی شده است. همین‌طور، یافته‌های این پژوهش می‌توانند در برنامه‌ریزی شهری، مدیریت محیط زیست و راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گیرند و در کاهش خطرات مرتبط با گرما و ارتقای تاب‌آوری حرارتی شهرهای در حال گسترش مؤثر باشند.

## ۱.۲. استخراج دمای سطح زمین (LST)

برای محاسبه دمای سطح زمین، از الگوریتم تک‌بند (Mono-Window) بر اساس خروجی باندهای حرارتی Landsat استفاده شد. این فرایند شامل سه گام اصلی است: ابتدا محاسبه تابش در بالای جو (TOA Radiance)، سپس تابش TOA از ضرایب کالیبراسیون موجود در متادیتای Landsat و DN پیکسل‌ها محاسبه شد و پس از آن محاسبه دمای روشنایی (Brightness Temperature) با استفاده از ضرایب کالیبراسیون حرارتی سنجنده (K1-K2) محاسبه شد و سپس گسیلندگی سطح (ε) از مدل NDVI و کسری پوشش گیاهی استخراج شد و دمای سطح زمین به صورت زیر محاسبه شد.

Radiance (TOA):

$$L\lambda = ML \times Q_{cal} + AL \text{ (Landsat-8/9)}$$

$$L\lambda = ((L_{max} - L_{min}) / (Q_{max} - Q_{min})) \times (Q_{cal} - Q_{min}) + L_{min} \text{ (Landsat-5/7)}$$

Brightness Temperature:

$$TB(K) = K2 / \ln(K1 / L\lambda + 1)$$

NDVI-based Emissivity:

$$Pv = ((NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}))^2$$

$$\epsilon = 0.004 \times Pv + 0.986$$

Land Surface Temperature (emissivity-corrected):

$$LST(^{\circ}C) = TB / (1 + (\lambda \times TB / 1.438 \times 10^8 - 2) \times \ln \epsilon) - 273.15$$

برای محاسبه دمای سطح زمین، طول موج مؤثر (λ) در سنجنده‌های مختلف متفاوت است؛ به گونه‌ای که برای Landsat-8 (باند ۱۰) حدود ۱۰/۸۹۵ میکرومتر (μm) و برای Landsat-5/7 (باند ۶) حدود ۱۱/۴۵ میکرومتر (μm) است. مقادیر ثابت‌های کالیبراسیون K1 و K2، همچنین ضرایب بازتراز پرتوی (ML و AL) و مقادیر Lmin، Lmax و Qmin/Qmax باید مستقیم از فایل فراداده (Metadata - MTL) مربوط به هر صحنه استخراج شوند، زیرا این پارامترها مختص همان تصویر بوده و برای انجام محاسبات دقیق دمای تابشی و تبدیل به دمای سطحی الزامی هستند. در این محاسبات، طول موج باند حرارتی و ضرایب استاندارد طبق دستورالعمل USGS برای سنجنده‌های Landsat اعمال شد. کلیه مراحل در نرم‌افزار ENVI 5.3 و ArcGIS پیاده‌سازی شده است.

همین‌طور فرمول محاسبه NDVI به صورت زیر است:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red})$$

که در آن، (ρ) بیانگر بازتاب سطحی (Surface Reflectance) در هر باند است. این شاخص مقادیر بین مثبت یک تا منفی یک دارد؛ مقادیر نزدیک به (مثبت یک) نشان‌دهنده پوشش گیاهی متراکم و سالم، و مقادیر نزدیک به (منفی یک) نشان‌دهنده سطوح فاقد پوشش گیاهی مانند سطوح شهری، بایر یا آبی هستند. فرمول

ArcGIS استخراج شده و مساحت آن حدود ۱۰۱/۶ کیلومتر مربع برآورد می‌شود. رشت در همین محدوده اداری طی دهه‌های اخیر رشد سریعی را تجربه کرده است؛ به گونه‌ای که جمعیت آن از حدود ۶۰۰ هزار نفر در سال ۱۹۹۰ به بیش از یک میلیون نفر در سال ۲۰۲۴ افزایش یافته است. از طرفی، اقلیم رشت مرطوب نیمه‌گرمسیری است؛ میانگین بارندگی سالانه بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر متغیر است و تابستان‌ها گرم و مرطوب و زمستان‌ها معتدل و بارانی است. در گذشته، چشم‌انداز غالب این شهر را شالیزارهای برنج و پوشش گیاهی جنگل‌های هیرکانی تشکیل می‌داد، اما در نتیجه گسترش شهری، بخش‌های وسیعی از اراضی کشاورزی و فضاهای سبز به مناطق ساخته‌شده تبدیل شده‌اند. این دگرگونی کاربری و پوشش زمین تأثیر چشمگیری بر دمای سطح زمین (LST) و پویایی جزیره گرمایی شهری (UHI) بر جای گذاشته است. در این پژوهش، به منظور تحلیل این پویایی‌ها، از تصاویر ماهواره‌ای فصل تابستان سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴ استفاده شده است. انتخاب فصل تابستان آگاهانه صورت گرفته است، زیرا در سایر فصل‌ها، پوشش ابری مداوم و بارش‌های پی‌درپی، کیفیت و قابلیت اعتماد تصاویر را به طور جدی کاهش می‌دهد. در مقابل، تصاویر تابستانی عموماً از شرایط جوی پایدارتر و جو شفاف‌تری برخوردارند و به این ترتیب، مبنای دقیق‌تر و قابل اتکاتری برای تحلیل تغییرات کاربری زمین، ساختار پوشش گیاهی و شدت جزیره گرمایی شهری فراهم می‌کند.

ریاضی این شاخص (EBBI) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$EBBI = (SWIR - NIR) / (10 \times VTIR + NIR)$$

Band mapping (concise):

Landsat-5/7: NIR=B4, SWIR=B5, TIR=B6; Landsat-8/9:

NIR=B5, SWIR=B6, TIR=B10

فرمول ریاضی این شاخص (DBI) به صورت زیر تعریف می‌شود:

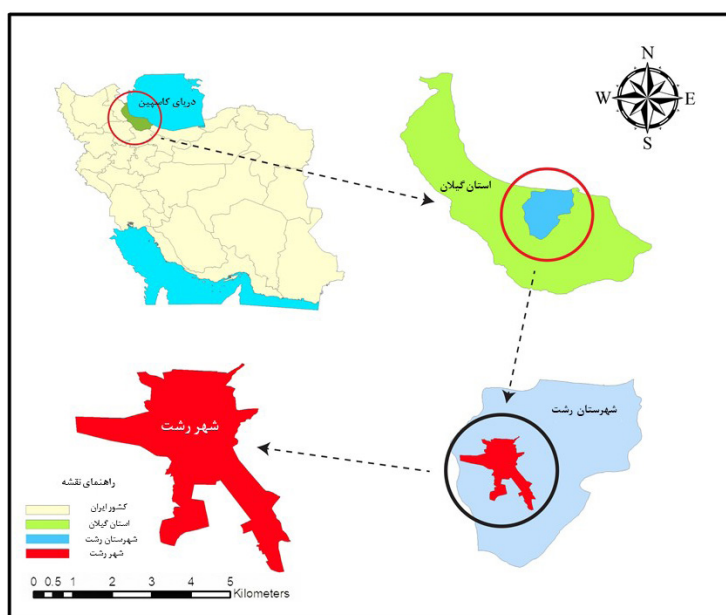
$$DBI = (\rho_{Blue} - \rho_{TIR}) / (\rho_{Blue} + \rho_{TIR}) - (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red})$$

شاخص نرمال‌شده مناطق ساخته‌شده (Normalized Difference Built-Up Index: NDBI) از پرکاربردترین شاخص‌های طیفی برای شناسایی و تفکیک سطوح نفوذناپذیر شهری است. این شاخص از بازتاب بالاتر باند فرسرخ کوتاه‌موج (SWIR) نسبت به فرسرخ نزدیک (NIR) در مواد ساختمانی بهره می‌گیرد و طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$NDBI = (SWIR - NIR) / (SWIR + NIR)$$

### ۲.۲. محدوده مورد مطالعه

شهر رشت، مرکز استان گیلان در شمال ایران، در جلگه گیلان و در مجاورت دریای خزر با مختصات جغرافیایی ۱۶°۳۷ شمالی و ۳۶°۴۹ شرقی و در ارتفاعی بین ۷ تا ۱۰ متر از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱). محدوده مورد مطالعه، مرز اداری شهر رشت است که بر اساس لایه چندضلعی رسمی (marz\_rasht) در محیط



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه. شهر رشت (با رنگ قرمز) در محدوده شهرستان رشت (با رنگ آبی) و در درون استان گیلان (با رنگ سبز) در شمال ایران واقع شده است

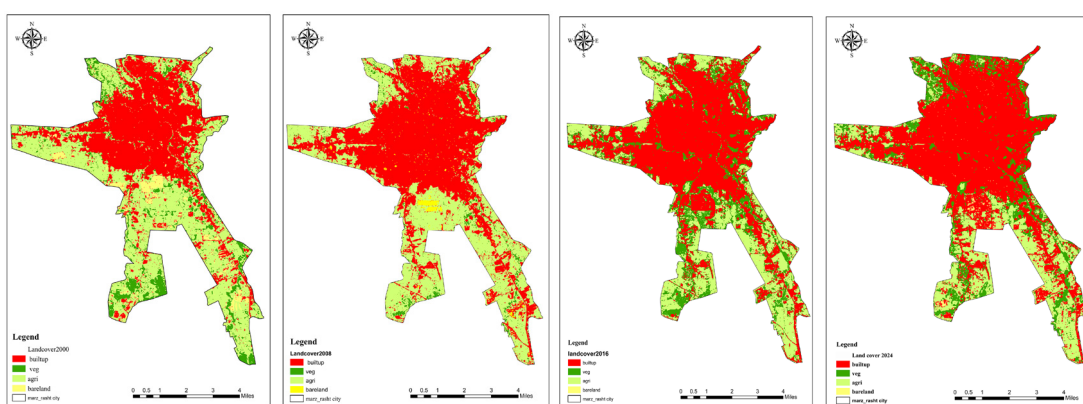
نظارت‌شده روی تصاویر ماهواره‌ای لندست (TM-OLI) و Sentinel-2 انجام شد. در نرم‌افزار ENVI نسخه ۵.۳، نمونه‌های آموزشی به صورت نواحی مورد علاقه (ROI) برای چهار طبقه اصلی تعریف

### ۳. یافته‌ها

تحلیل کاربری و پوشش زمین (LULC) برای استخراج نقشه‌های کاربری و پوشش زمین (LULC)، طبقه‌بندی

شدند: الف) اراضی ساخته شده، شامل بافت متراکم و نیمه متراکم شهری، شبکه معابر، فضاهای صنعتی و سایر سطوح سخت نفوذناپذیر (built up)؛ ب) اراضی کشاورزی و باغی، شامل شالیزارهای برنج، باغ‌های چای و میوه و سایر اراضی زراعی که تحت مدیریت زراعی، الگوهای مشخص کاشت - برداشت و رژیم‌های آبیاری قرار دارند؛ (agri) پ) پوشش گیاهی طبیعی و فضاهای سبز شهری، شامل حاشیه‌های سبز رودخانه و پارک‌ها و فضاهای سبز عمومی درون شهری که از نظر ساختار تاج‌پوش، تراکم، استمرار مکانی و کارکرد بوم‌شناختی با اراضی کشاورزی متمایز هستند؛ (veg) ت) اراضی بایر، شامل سطوح فاقد پوشش گیاهی مؤثر (با تراکم کمتر از حدود ۱۰ درصد) نظیر خاک لخت، اراضی تخریب شده هستند. (bareland) سپس طبقه‌بندی نظارت‌شده تصاویر در محیط ENVI با استفاده از الگوریتم بیشینه شباهت (Maximum Likelihood)

شدند: الف) اراضی ساخته شده، شامل بافت متراکم و نیمه متراکم شهری، شبکه معابر، فضاهای صنعتی و سایر سطوح سخت نفوذناپذیر (built up)؛ ب) اراضی کشاورزی و باغی، شامل شالیزارهای برنج، باغ‌های چای و میوه و سایر اراضی زراعی که تحت مدیریت زراعی، الگوهای مشخص کاشت - برداشت و رژیم‌های آبیاری قرار دارند؛ (agri) پ) پوشش گیاهی طبیعی و فضاهای سبز شهری، شامل حاشیه‌های سبز رودخانه و پارک‌ها و فضاهای سبز عمومی درون شهری که از نظر ساختار تاج‌پوش، تراکم، استمرار مکانی و کارکرد بوم‌شناختی با اراضی کشاورزی متمایز هستند؛ (veg) ت) اراضی بایر، شامل سطوح فاقد پوشش گیاهی مؤثر (با تراکم کمتر از حدود ۱۰ درصد) نظیر خاک لخت، اراضی تخریب شده هستند. (bareland) سپس طبقه‌بندی نظارت‌شده تصاویر در محیط ENVI با استفاده از الگوریتم بیشینه شباهت (Maximum Likelihood)



شکل ۲. نقشه‌های کاربری و پوشش زمین (LULC) در چهار مقطع زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴

جدول ۱. مساحت (کیلومتر مربع) و سهم درصدی (%) طبقات کاربری و پوشش زمین شامل مناطق ساخته شده، پوشش گیاهی، اراضی کشاورزی و باغی، و اراضی بایر در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴

سال	۲۰۲۴	سال ۲۰۱۶	سال ۲۰۰۸	سال ۲۰۰۰	سال ۲۰۰۸	سال ۲۰۰۰	طبقه‌بندی کاربری‌ها
	(بر حسب درصد)	(بر حسب درصد)	(بر حسب درصد)	(بر حسب درصد)	(بر حسب درصد)	(بر حسب درصد)	
مناطق ساخته شده	۶۲.۶۹	۵۵.۹۰	۵۴.۹۲	۵۵.۸۰	۴۰.۶۴	۴۱.۲۸	
پوشش گیاهی	۲۱.۳۷	۲۷.۲۰	۴۱.۱۱	۴۱.۷۷	۴۶.۱۷	۴۶.۸۹	
اراضی کشاورزی و باغی	۱۵.۱۷	۱۶.۷۴	۲.۷۳	۲.۷۸	۹.۳۹	۹.۵۴	
اراضی بایر	۰.۷۵	۰.۱۴	۱.۲۲	۱.۲۵	۳.۷۹	۳.۸۵	

همان‌گونه که در جدول ۱ نشان داده شده است، مناطق ساخته شده در شهر رشت طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ به طور پیوسته گسترش یافته‌اند؛ مساحت این طبقه از حدود ۴۱/۳ کیلومتر مربع (۴۰/۶۴ درصد) در سال ۲۰۰۰ به ۵۵/۸ کیلومتر مربع (۵۴/۹۲ درصد) در سال ۲۰۰۸ و ۵۶/۸ کیلومتر مربع (۵۵/۹۰ درصد) در سال ۲۰۱۶ رسیده و در نهایت در سال ۲۰۲۴ به حدود ۶۲/۵ کیلومتر مربع (۶۲/۶۹ درصد) افزایش یافته است. در مقابل، پوشش گیاهی (جنگل‌های هیرکانی و فضاهای سبز طبیعی/شهری) روندی کاهشی را تجربه کرده و از حدود ۴۶/۹ کیلومتر مربع (۴۶/۱۷ درصد) در سال ۲۰۰۰ به ۲۱/۷ کیلومتر مربع (۲۱/۳۷ درصد) در سال ۲۰۲۴ رسیده است. اراضی کشاورزی و باغی در سال ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴ نیز سهم نسبتاً کوچکی از سطح شهر را در

همان‌گونه که در جدول ۱ نشان داده شده است، مناطق ساخته شده در شهر رشت طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ به طور پیوسته گسترش یافته‌اند؛ مساحت این طبقه از حدود ۴۱/۳ کیلومتر مربع (۴۰/۶۴ درصد) در سال ۲۰۰۰ به ۵۵/۸ کیلومتر مربع (۵۴/۹۲ درصد) در سال ۲۰۰۸ و ۵۶/۸ کیلومتر مربع (۵۵/۹۰ درصد) در سال ۲۰۱۶ رسیده و در نهایت در سال ۲۰۲۴ به حدود ۶۲/۵ کیلومتر مربع (۶۲/۶۹ درصد) افزایش یافته است. در مقابل، پوشش گیاهی (جنگل‌های هیرکانی و فضاهای سبز طبیعی/شهری) روندی کاهشی را تجربه کرده و از حدود ۴۶/۹ کیلومتر مربع (۴۶/۱۷ درصد) در سال ۲۰۰۰ به ۲۱/۷ کیلومتر مربع (۲۱/۳۷ درصد) در سال ۲۰۲۴ رسیده است. اراضی کشاورزی و باغی در سال ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴ نیز سهم نسبتاً کوچکی از سطح شهر را در

۶۳/۵ کیلومتر مربع رسیده و افزایش خالصی در حدود ۲۲/۲ کیلومتر مربع داشته است؛ این رشد عمدتاً در دوره‌های ۲۰۰۸-۲۰۰۰ و ۲۰۱۶-۲۰۲۴ (۶/۷۹+) km<sup>2</sup> رخ داده است. در مقابل، پوشش گیاهی طی کل دوره حدود ۲۵/۲ کیلومتر مربع کاهش یافته و بیشترین افت آن طی سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۱۶ حدود (۱۴/۱-) km<sup>2</sup> مشاهده می‌شود. اراضی کشاورزی و باغی پس از کاهش اولیه در دوره ۲۰۰۸-۲۰۰۰ (-۶/۸) km<sup>2</sup>، در بازه ۲۰۰۸-۲۰۱۶ حدود ۱۴/۲ کیلومتر مربع گسترش یافته و در نهایت نسبت به سال ۲۰۰۰ افزایش خالصی معادل ۵/۹ کیلومتر مربع دارند. اراضی بایر نیز با وجود نوسانات بین دوره‌ها، در مجموع نزدیک به ۲/۸ کیلومتر مربع کاهش نشان می‌دهند؛ به گونه‌ای که افزایش چشمگیر ۲۰۰۸-۲۰۰۰ تقریباً در دوره ۲۰۰۸-۲۰۱۶ خنثی شده است.

بر می‌گیرند و در مجموع طی دوره مطالعه روندی کاهشی دارند؛ به گونه‌ای که از حدود ۳/۹ کیلومتر مربع (۳/۷۹ درصد) در سال ۲۰۰۰ به ۱/۲ کیلومتر مربع (۱/۲۲ درصد) در سال ۲۰۰۸ و ۰/۱۴ کیلومتر مربع (۰/۱۴ درصد) در سال ۲۰۱۶ کاهش یافته و تنها در سال ۲۰۲۴ اندکی تا ۰/۷۷ کیلومتر مربع (۰/۷۵ درصد) افزایش یافته است. این الگوی عددی نشان می‌دهد افزایش مداوم مساحت مناطق ساخته‌شده عمدتاً با کاهش پایدار پوشش گیاهی و بازتوزیع بخشی از اراضی کشاورزی و بایر همراه بوده و زمینه تشدید پاسخ حرارتی شهر و تقویت جزیره گرمایی سطحی شهری را فراهم کرده است. جدول ۲ تغییرات مساحت طبقات اصلی کاربری/پوشش زمین شهر رشت را در بازه‌های زمانی ۲۰۰۰-۲۰۰۸، ۲۰۰۸-۲۰۱۶ و ۲۰۱۶-۲۰۲۴ و ۲۰۰۰-۲۰۲۴ نشان می‌دهد (اعداد بر حسب کیلومتر مربع هستند). در مجموع، مساحت مناطق ساخته‌شده از حدود ۴۱/۳ به

جدول ۲. تغییرات مساحت (کیلومتر مربع) و تغییرات نسبی (%) طبقات کاربری/پوشش زمین شهر رشت در دوره‌های زمانی مورد مطالعه

دوره‌های مورد بررسی	مناطق ساخته‌شده	پوشش گیاهی	اراضی کشاورزی و باغی	اراضی بایر
۲۰۰۰-۲۰۰۸ (km <sup>2</sup> ) Δ	+۱۴.۵۱	-۵.۱۲	-۶.۷۶	-۲.۶۰
۲۰۰۰-۲۰۰۸ (%) Δ	+۱۴.۲۸	+۵.۰۶	-۶.۶۶	-۲.۵۷
۲۰۱۶-۲۰۰۸ (km <sup>2</sup> ) Δ	+۱.۰۰	-۱۴.۱۳	+۱۴.۲۴	-۱.۱۰
۲۰۱۶-۲۰۰۸ (%) Δ	+۰.۹۸	-۱۳.۹۱	+۱۴.۰۱	-۱.۰۸
۲۰۲۴-۲۰۰۸ (km <sup>2</sup> ) Δ	+۶.۶۹	-۵.۹۳	-۱.۶۰	+۰.۶۲
۲۰۲۴-۲۰۱۶ (%) Δ	+۶.۷۹	-۵.۸۳	-۱.۵۷	+۰.۶۲
۲۰۲۴-۲۰۰۰ (km <sup>2</sup> ) Δ	+۲۲.۲۰	-۲۵.۱۸	+۵.۸۸	-۱.۹۷
۲۰۲۴-۲۰۰۰ (%) Δ	+۲۲.۰۵	-۲۴.۸۰	+۵.۷۸	-۱.۹۵

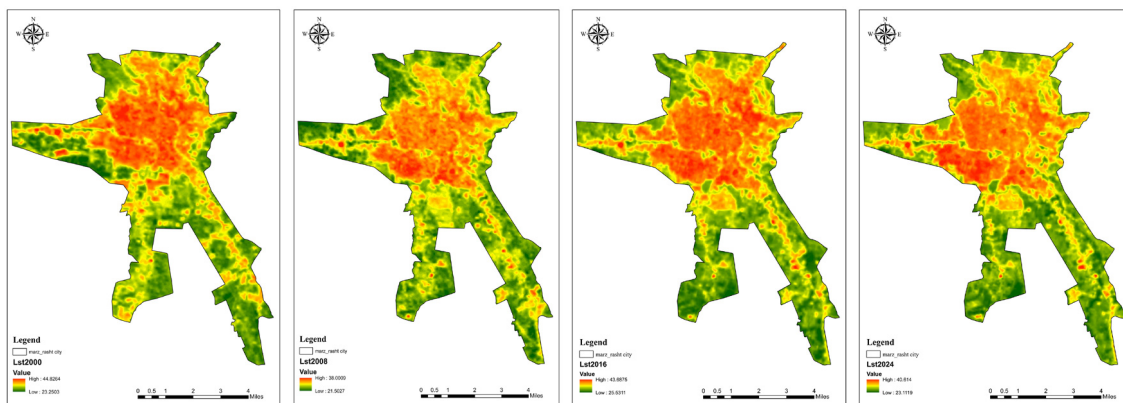
(LST) را در چهار مقطع ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴ نشان می‌دهد. در هر چهار سال، مقادیر بالای LST (رنگ‌های زرد تا قرمز) عمدتاً در نواحی مرکزی و بخش‌هایی از شمال و شرق شهر متمرکز است، در حالی که مقادیر پایین‌تر (رنگ‌های سبز) بیشتر در پیرامون شهر و به‌ویژه در حاشیه‌های جنوبی و غربی و برخی بخش‌های شرقی مشاهده می‌شود. مقایسه نقشه‌ها نشان می‌دهد گستره و پیوستگی لکه‌های داغ حرارتی در سال ۲۰۱۶ بیشترین مقدار را دارد و بخش وسیع‌تری از نواحی مرکزی، شمالی و شرقی شهر را پوشش می‌دهد؛ در سال ۲۰۰۸ نسبت به ۲۰۰۰ سطح مناطق با دمای بسیار بالا محدودتر شده و بخش‌های بیشتری از سطح شهر در طبقات دمایی متوسط قرار گرفته‌اند؛ در سال ۲۰۲۴ نیز، با وجود تداوم هسته گرم در مرکز و شرق، بخشی از این لکه‌های داغ نسبت به ۲۰۱۶ به کلاس‌های دمایی متوسط منتقل شده‌اند و نواحی با LST پایین‌تر در پیرامون شهر همچنان قابل مشاهده‌اند. مقایسه این الگو با نقشه کاربری/پوشش زمین (شکل ۲) نشان می‌دهد نواحی با LST پایین‌تر عمدتاً با اراضی کشاورزی و لکه‌های پوشش گیاهی در حاشیه‌های جنوبی، غربی و بخشی از شرق شهر منطبق‌اند، در حالی که نواحی با LST بالاتر با پهنه‌های ساخته‌شده و بافت متراکم شهری هم‌خوانی دارند. این هم‌پوشانی مکانی، تضاد حرارتی پایدار بین مرکز شهری متراکم و پیرامون‌های سبزتر را طی دوره مطالعه

### تحلیل دمای سطح زمین (LST)

طی چهار سال مورد مطالعه در شهر رشت (۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴)، میانگین دمای سطح زمین (LST) نوسانات محسوسی داشته است؛ به طوری که از ۳۱/۱۸ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۰۰ به ۲۷/۱۳ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۰۸ کاهش یافته، سپس در سال ۲۰۱۶ به ۳۲/۵۹ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کرده و در سال ۲۰۲۴ به ۲۹/۶۵ درجه سانتی‌گراد رسیده است. دامنه حرارتی (کمینه - بیشینه) نیز الگوی مشابهی نشان می‌دهد و از ۲۲/۲۵-۴۴/۸۳ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۰۰ به ۲۱/۵۰-۳۸ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۰۸ کاهش یافته، در سال ۲۰۱۶ به ۲۵/۵۲-۴۳/۶۹ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کرده و در سال ۲۰۲۴ در محدوده ۲۳/۱۱-۴۰/۶۱ درجه سانتی‌گراد تثبیت شده است (جدول ۳). این نوسانات میانگین LST لزوماً بازتاب مستقیم روند یک‌سویه توسعه شهری نیست؛ زیرا به گفته مطالعات پیشین، علاوه بر تغییرات کاربری و پوشش زمین، به شرایط اقلیمی روز تصویربرداری (دمای هوا، رطوبت نسبی، پوشش ابر و زاویه خورشیدی) نیز حساس است؛ از این‌رو، کاهش میانگین LST در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۲۴ نسبت به ۲۰۰۰ و ۲۰۱۶ را باید نتیجه ترکیب اثرات تغییرات LULC و تغییرات بین‌سالی شرایط جوی دانست، نه کاهش شدت شهرنشینی. همین‌طور در شکل ۳ الگوی فضایی دمای سطح زمین

برجسته می‌کند و با مقادیر آماری جدول ۲ نوسان میانگین و دامنه LST سازگار است. به صورت هم‌زمان، تغییرات کمی LULC در جدول ۱ نشان می‌دهد سهم مناطق ساخته‌شده از ۴۰/۶۴ درصد در سال ۲۰۰۰ به ۶۲/۶۹ درصد در سال ۲۰۲۴ رسیده است (افزایش ۲۲/۰۵ واحد درصدی)، در حالی که پوشش گیاهی طبیعی از ۴۶/۱۷ درصد به ۲۱/۳۷ درصد کاهش یافته و مجموع سهم پوشش گیاهی و اراضی کشاورزی/باغی از ۵۵/۵۶ درصد به ۳۶/۵۴ درصد تنزل یافته است. بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴، مساحت مناطق ساخته‌شده

۶۶۸/۸۶ کیلومتر مربع افزایش یافته، در حالی که اراضی کشاورزی و باغی ۱۵۹/۸۷ کیلومتر مربع و پوشش گیاهی ۵۹۲/۸۳ کیلومتر مربع کاهش نشان داده‌اند. این تغییرات، در کنار الگوهای فضایی LST، نشان می‌دهند اگرچه میانگین LST تحت تأثیر نوسانات اقلیمی بین‌سالی است، اما مکان و تمرکز لکه‌های داغ حرارتی طی دوره مطالعه با روند گسترش سطوح نفوذناپذیر و کاهش پوشش سبز شهری هم‌خوانی دارد.



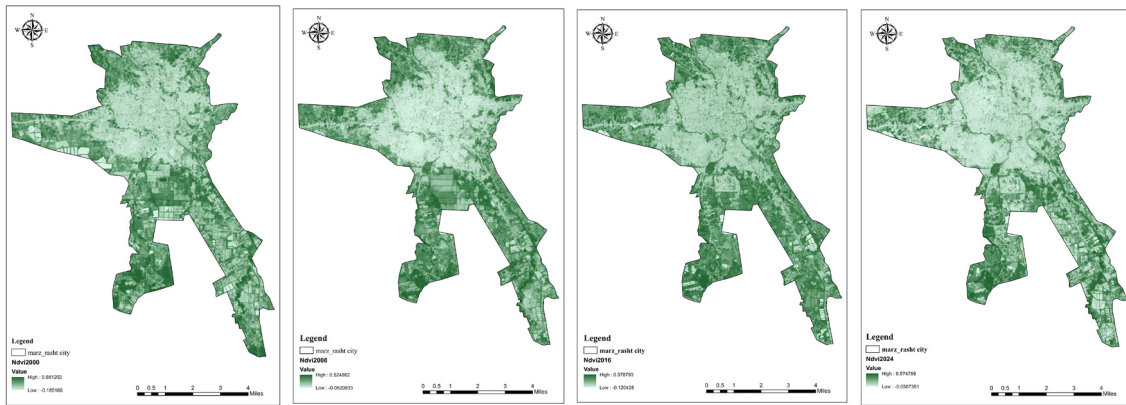
شکل ۳. نقشه‌های دمای سطح زمین (LST) در چهار مقطع زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴

جدول ۳. آمار خلاصه دمای سطح زمین (C°) در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴

تاریخ - مقدار	حدافل (درجه سانتی‌گراد)	حداکثر (درجه سانتی‌گراد)	میانگین	انحراف معیار
سال ۲۰۰۰	۲۳.۲۵	۴۴.۸۳	۳۱.۱۸	۳.۹۹
سال ۲۰۰۸	۲۱.۵۰	۳۸	۲۷.۱۳	۲.۷۰
سال ۲۰۱۶	۲۵.۵۳	۴۳.۶۹	۳۲.۵۹	۳.۴۰
سال ۲۰۲۴	۲۳.۱۱	۴۶.۱	۲۹.۶۵	۲.۹۳

است. این شاخص بر پایه ویژگی طیفی گیاهان سالم بنا شده که در آن، بازتاب زیاد در باند فرسرخ نزدیک (NIR) و جذب قوی در باند قرمز طیف مرئی (RED) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

توزیع شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) در منطقه مورد مطالعه شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) از پرکاربردترین سنجه‌ها برای اندازه‌گیری گستره و سرزندگی پوشش سبز گیاهی



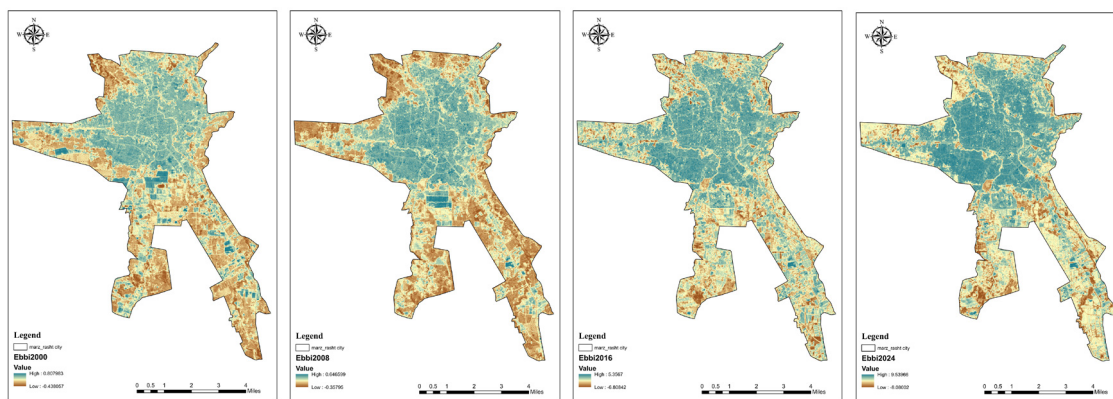
شکل ۴. نقشه‌های شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) برای شهر رشت در چهار مقطع زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴

می‌شود و توزیع آن حالتی گسسته و تکه‌تکه دارد. با تداوم دمای سطحی نسبتاً بالا و توسعه غالب در محور شرق - جنوب شرق شهر منطبق است؛ جایی که سطوح نفوذناپذیر گسترش یافته‌اند. در مجموع، نتایج نقشه‌ها بیانگر آن است که طی دو دهه اخیر، الگوی فضایی شهر رشت از کمربندهای سبز پیوسته و منسجم پیرامونی به ساختاری پیرامونی با ماتریسی سبز اما پراکنده، منفصل و پرشکاف در اطراف هسته‌ای کم‌پوشش از نظر گیاهی دگرگون شده است؛ الگویی که توضیح‌دهنده وجود سلول‌های خنک‌تر بر فراز اراضی آبیاری شده و کشاورزی، و لکه‌های حرارتی مکرر بر محور مرکزی - شمالی متراکم و امتدادهای شرق - جنوب شرقی شهر است.

#### توزیع شاخص توسعه یافته برهنگی و ساخت‌وساز (EBBI) در منطقه مطالعه

شاخص توسعه یافته مناطق ساخته شده و خاک برهنه (Enhanced Built-up and Bare Soil Index: EBBI) یک شاخص تک‌معیاره برای تفکیک هم‌زمان سطوح ساخته شده و اراضی بدون پوشش گیاهی است که با استفاده از باندهای فرورسرخ نزدیک (NIR)، فرورسرخ کوتاه‌موج (SWIR) و فرورسرخ حرارتی (TIR) محاسبه می‌شود. این شاخص از بازتابش بالاتر باند SWIR و گسیل یا دمای روشنایی بیشتر مواد نفوذناپذیر نسبت به امضای طیفی متمایز خاک‌های برهنه بهره می‌گیرد. با تلفیق کنتراست‌های بازتاب طیفی و اطلاعات حرارتی سطح، شاخص EBBI دقت تفکیک سطوح نفوذناپذیر و خاک‌های برهنه را، به‌ویژه در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک، افزایش داده و میزان اختلاط با پوشش گیاهی و پهنه‌های آبی را کاهش می‌دهد. با توجه به آنکه مؤلفه حرارتی (TIR) در تعریف EBBI حضور دارد، بخشی از اطلاعات مرتبط با دمای سطح زمین (LST) به طور درونی در این شاخص نهفته است؛ از این رو در این پژوهش، نقش اصلی EBBI به عنوان یک شاخص تفکیک‌کننده فضایی سطوح ساخته شده و اراضی برهنه در نظر گرفته شده و از به‌کارگیری آن به عنوان متغیر مستقل در مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره LST خودداری شده است.

در چهار دوره زمانی مورد بررسی شاخص NDVI، که در شکل ۴ آمده، الگوی پوشش گیاهی شهر رشت به طور مداوم بیانگر کاهش شدت پوشش سبز در هسته متراکم مرکزی - شمالی شهر است، در حالی که نواحی پیرامونی، به‌ویژه در جنوب و غرب، مقدار نسبتاً بالاتری از NDVI را حفظ کرده‌اند و در شرق نیز نوارهای سبز پراکنده‌ای مشاهده می‌شود. بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸، طیف رنگی نقشه‌ها به طور محسوس در سراسر شهر کم‌رنگ‌تر می‌شود؛ به گونه‌ای که پیکسل‌های دارای NDVI متوسط تا بالا در محدوده‌های ساخته شده کاهش یافته و نشانه‌هایی از تکه‌تکه شدن فضای سبز درون‌شهری پدیدار می‌شود. در سال ۲۰۱۶، نوعی بازگشت نسبی مشاهده می‌شود؛ به طوری که لکه‌های دارای NDVI متوسط در حاشیه شهر و در امتداد مسیرهای زهکشی و نوارهای آبیاری دوباره ظاهر می‌شوند. با این حال، هسته شهری همچنان رنگ پریده باقی می‌ماند که بیانگر تداوم کمبود پوشش گیاهی در مرکز شهر است. در سال ۲۰۲۴، شبکه لکه‌های سبز از هر زمان پیش‌تر گسسته‌تر و خردتر به نظر می‌رسد. هرچند نواحی حاشیه‌ای همچنان مقدار NDVI بالاتری نسبت به مرکز دارند، اما سلول‌های دارای NDVI بالا به سوی پیرامون عقب‌نشینی کرده و به لکه‌های کوچک و مجزا تقسیم شده‌اند؛ وضعیتی که نشان‌دهنده فرایند پرشدگی (infill) و فشرده‌گی کالبدی (densification) درون‌شهری است این پویایی‌های مشاهده شده از نقشه‌ها با تغییرات کاربری زمین (افزایش اراضی ساخته شده تا حدود ۶۳ درصد در سال ۲۰۲۴ و کاهش کلاس‌های پوشش گیاهی و کشاورزی/باغی) و همچنین با الگوهای ثبت شده دمای سطح زمین (LST) تطابق دارد. در سال ۲۰۰۸، کاهش شاخص NDVI با دوره‌ای مقارن است که میدان‌های دمای سطح زمین (LST) بیشترین یکنواختی فضایی و پایین‌ترین مقادیر دما را در سطح شهر نشان می‌دهند؛ بازگشت نسبی پوشش سبز در سال ۲۰۱۶ با وجود خود، تحت‌الشعاع افزایش نفوذپذیری‌ناپذیری سطوح (imperviousness) قرار گرفته و با اوج پیوستگی لکه‌های حرارتی هم‌زمان است؛ در سال ۲۰۲۴، الگوی NDVI با مقادیر متوسط عمدتاً در نواحی پیرامونی شهر مشاهده

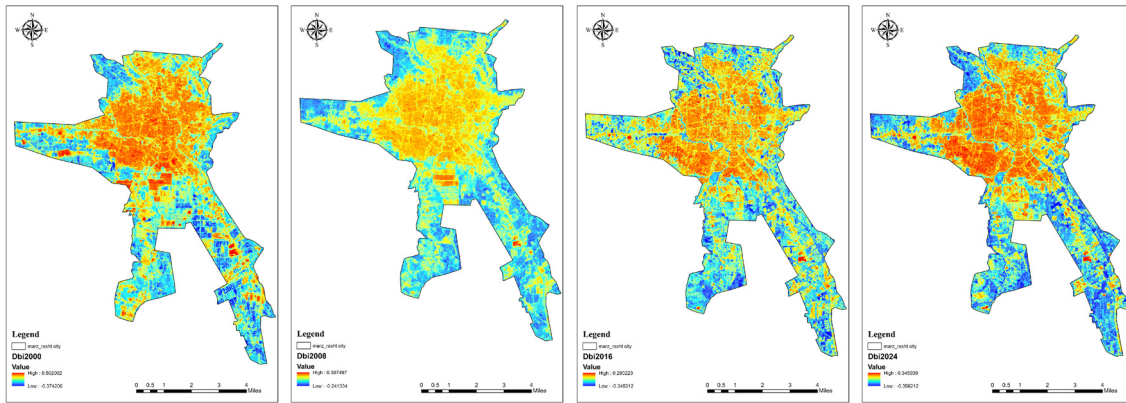


شکل ۵. نقشه‌های شاخص Ebbi شهر رشت در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴

### توزیع شاخص نواحی ساخته‌شده خشک (DBI) در منطقه مطالعه‌شده

شاخص نواحی ساخته‌شده خشک (Dry Built-Up Index: DBI) یک شاخص طیفی است که با هدف تفکیک نواحی ساخته‌شده از اراضی خشک یا فاقد پوشش گیاهی طراحی شده است. این شاخص در ادبیات اولیه عمدتاً برای محیط‌های خشک و نیمه‌خشک پیشنهاد شده، جایی که شباهت طیفی خاک‌های خشک و سطوح نفوذناپذیر دقت شاخص‌های متداول تری همچون NDBI را کاهش می‌دهد. در مطالعه حاضر، شاخص (DBI) نه به عنوان سنجه‌ای از «خشکی اقلیم»، بلکه به عنوان ابزاری برای تفکیک موضعی سطوح ساخته‌شده و خاک‌های برهنه در فصل تابستان به کار رفته است؛ به طوری که تفسیر مقادیر آن به صورت نسبی و در چارچوب نقشه کاربری/پوشش زمین (LULC) و تصاویر با وضوح بالای Google Earth انجام شده و به این ترتیب محدودیت‌های اقلیمی تعریف اولیه شاخص کاهش یافته است. شاخص DBI با ترکیب اطلاعات حاصل از باندهای طیف مرئی، فروسرخ نزدیک (NIR) و فروسرخ حرارتی (TIR) کنتراست میان سطوح دارای پوشش گیاهی تنک (که غالباً ساخته شده‌اند) و خاک‌های برهنه را افزایش می‌دهد و در نتیجه، ابهام طیفی میان این دو نوع سطح را کاهش می‌دهد. در این پژوهش، شاخص DBI با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-5 و Landsat-8 برای چهار مقطع زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴ محاسبه شد و الگوهای فضایی آن در کنار شاخص‌های NDVI، NDBI و Ebbi برای تفسیر پویایی سطوح نفوذناپذیر و اراضی برهنه در مقیاس شهری به کار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد در مقیاس شهری، (DBI) نواحی با پوشش گیاهی محدود و الگوهای حرارتی متناظر با سطوح نفوذناپذیر را به خوبی برجسته می‌سازد و فرایند تبدیل اراضی خشک شهری به بافت ساخته‌شده (در نتیجه پرشدگی و فشردگی کالبدی) را آشکار می‌کند؛ روندی که با تغییرات مشاهده‌شده در کاربری زمین طی دوره مطالعه (مطابق با شکل ۴) هم‌خوان است.

همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، شاخص توسعه‌یافته مناطق ساخته‌شده و خاک برهنه (EBBI) که از ترکیب باندهای فروسرخ نزدیک (NIR)، فروسرخ کوتاه‌موج (SWIR) و فروسرخ حرارتی (TIR) با بهره‌گیری از داده‌های حرارتی سنجنده Landsat استخراج شده است، ابزاری تک‌میاره برای تفکیک سطوح نفوذناپذیر شهری و خاک‌های بدون پوشش گیاهی فراهم می‌آورد. در این شاخص، مقادیر بالاتر معمولاً نشان‌دهنده اراضی ساخته‌شده یا برهنه بوده و مقادیر پایین‌تر به نواحی دارای پوشش گیاهی یا پهنه‌های آبی مربوط می‌شود. در شهر رشت، الگوی فضایی - زمانی شاخص Ebbi حاکی از پایداری مقادیر بالا در هسته مرکزی - شمالی و گسترش جهت‌دار این نواحی در امتداد محور شرق - جنوب شرق است. بیشترین پیوستگی لکه‌های Ebbi بالا در سال ۲۰۱۶ مشاهده می‌شود و تا سال ۲۰۲۴، اگرچه هسته‌های اصلی همچنان تداوم دارند، بخش‌هایی از کمربندهای پیشین کشاورزی در شمال و غرب شهر به نواحی با مقادیر بالای Ebbi ملحق شده‌اند. این تغییرات با الگوی تحول کاربری اراضی (LULC) هم‌راستا است؛ به گونه‌ای که سهم اراضی ساخته‌شده طی دوره مطالعه افزایش یافته، در حالی که پوشش گیاهی و اراضی کشاورزی و باغی کاهش نشان داده‌اند. مقایسه نقشه‌های Ebbi با الگوی دمای سطح زمین (LST) نشان می‌دهد نواحی با مقادیر بالای Ebbi عمدتاً با پهنه‌های داغ‌تر در هسته شهری و محور شرق - جنوب شرق هم‌مکان‌اند، در حالی که مقادیر پایین Ebbi بر فراز کمربندهای سبز خنک‌تر قرار گرفته‌اند. با این حال، از آنجا که تعریف Ebbi خود شامل مؤلفه حرارتی است، این هم‌مکانی فضایی و همبستگی عددی Ebbi-LST تا حدی ناشی از اشتراک اطلاعات حرارتی میان دو متغیر است و در این پژوهش فقط به عنوان هم‌خوانی طیفی - فضایی تفسیر شده است، نه به عنوان رابطه علی مستقل. در مجموع، افزایش پیوستگی و گسترش جهت‌دار نواحی دارای Ebbi بالا بیانگر جایگزینی اراضی سبز و کشاورزی با بافت‌های ساختمانی و اراضی برهنه است، در حالی که پهنه‌های با مقادیر متوسط Ebbi (کاربری‌های مختلط) نقش میانگیر و پایداری نسبی بیشتری را در ساختار فضایی شهر حفظ کرده‌اند.



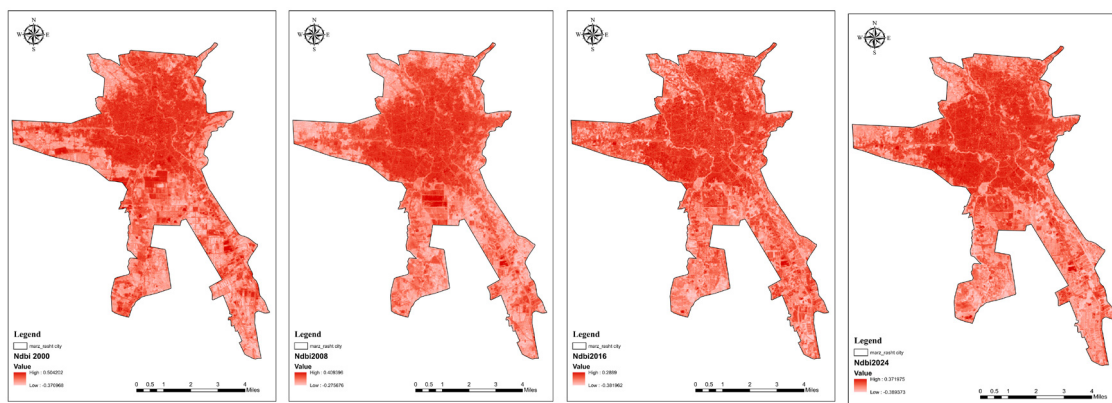
شکل ۶. نقشه‌های شاخص DBI شهر رشت در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴

نواحی حاشیه‌ای بیانگر تداوم مرز تماس شهری - روستایی است. در مجموع، الگوهای فضایی DBI نشان‌دهنده پیوسته‌تر شدن بافت ساختمانی، شکل‌گیری یک حلقه میانی متراکم و گسترش جهت‌دار سطوح نفوذناپذیر هستند که در کنار نقشه‌های دمای سطح زمین (LST) با تمرکز لکه‌های داغ در همان نواحی، با تقویت فضایی جزیره گرمایی شهری در دوره‌های متأخر مطالعه سازگار است.

#### توزیع شاخص نرمال‌شده مناطق ساخته‌شده (NDBI) در منطقه مطالعه

شاخص نرمال‌شده مناطق ساخته‌شده (Normalized Difference Built-Up Index: NDBI) از پرکاربردترین شاخص‌های طیفی برای شناسایی و تفکیک سطوح نفوذناپذیر شهری است. در این شاخص، مقادیر مثبت معمولاً بیانگر نواحی ساخته‌شده یا سطوح کم‌پوشش و مشابه خاک هستند، در حالی که مقادیر منفی معرف نواحی دارای پوشش گیاهی یا پهنه‌های آبی هستند. در این پژوهش، شاخص NDBI با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-5 TM و Landsat-8 OLI برای چهار مقطع زمانی (۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴) استخراج شد. در مقیاس شهری، این شاخص مرز بین هسته متراکم شهری رشت و کمربندهای کشاورزی و مرطوب پیرامونی را به روشنی تفکیک کرده و تداوم فزاینده سطوح نفوذناپذیر را در گذر زمان نمایش می‌دهد. به‌ویژه سال ۲۰۲۴، توزیع مقادیر NDBI دنباله مثبت بلندتری را نشان می‌دهد (حداکثر حدود ۰/۳۷ در مقایسه با ۰/۲۸ در سال ۲۰۱۶) و لکه‌های دارای NDBI بالا پیوستگی بیشتری یافته‌اند، به‌ویژه در هسته مرکزی، شرق و بخش‌هایی از شمال شهر؛ در حالی که نواحی جنوبی و بخش عمده مناطق غربی همچنان دارای مقادیر پایین‌تر یا منفی هستند که با اراضی زراعی و تالابی مطابقت دارد. با توجه به آنکه شاخص NDBI ممکن است خاک‌های روشن و باز را با سطوح شهری اشتباه بگیرد، تفسیر آن در این مطالعه همراه با لایه‌های پوشش گیاهی و کاربری زمین انجام شده است. الگوهای فضایی حاصل از این تحلیل در شکل ۷ ارائه شده‌اند.

شکل ۶ الگوی فضایی شاخص ساخته‌شده خشک (DBI) را در چهار مقطع ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴ نشان می‌دهد. در سال ۲۰۰۰، ساختار فضایی شهر رشت عمدتاً به صورت یک هسته متراکم تک‌مرکزی با مقادیر بالای DBI در مرکز شهر و مقادیر پایین‌تر در پیرامون ظاهر می‌شود. تا سال ۲۰۰۸، این هسته مرکزی شروع به گسترش در امتداد محورهای توسعه هم‌راستا با شریان‌های اصلی دسترسی کرده است و لکه‌های با DBI بالا در جهت‌های غرب/جنوب غرب و شمال غرب در پیرامون شهر پدیدار شده‌اند؛ به گونه‌ای که نشانه‌های اولیه یک کمربند میان‌مرتبه ساخته‌شده در اطراف هسته مرکزی قابل مشاهده است. در سال ۲۰۱۶، این لکه‌های با DBI بالا بزرگ‌تر و به هم پیوسته‌تر شده‌اند و پراکنش پیشین تکه‌تکه به الگویی نیمه‌پیوسته در قالب یک حلقه پیرامونی تبدیل شده است. این الگو با ترکیب فرایند فشردگی درونی (infill) در محدوده موجود و گسترش لبه‌ای (edge expansion) در حاشیه شهر سازگار است. در سال ۲۰۲۴، حلقه میانی متراکم‌تر و پهن‌تر شده و بخش قابل توجهی از شکاف‌های کم‌تراکم درون شهری کاهش یافته است؛ هم‌زمان، خوشه‌های جدیدی از مقادیر بالای DBI در حاشیه‌ها شکل گرفته‌اند که به‌ویژه در جهت‌های غرب - جنوب غرب و شمال غرب، الگوی ساختاری شهر را به سمت آرایشی نزدیک به چندمرکزی شدن سوق می‌دهند. در مقابل، نواحی شرق و شمال شرق الگوی ترکیبی‌تر و با پیوستگی ضعیف‌تری را نشان می‌دهند و در بخش‌های جنوبی، رشد سطوح با DBI بالا بیشتر به صورت خطی و محوری مشاهده می‌شود. در هسته مرکزی، مقادیر DBI از ابتدا بالا بوده‌اند و تغییرات عمدتاً به صورت افزایش پیوستگی فضایی و پرشدن فضاهای میان‌بافتی (interstitial spaces) نمود پیدا کرده است، نه گسترش سطحی گسترده. این تحول با روند تبدیل اراضی کشاورزی و اراضی باز پیرامونی به کاربری‌های مسکونی - خدماتی و یکپارچه‌سازی و نوسازی قطعات درون محدوده مصوب شهری - همان‌گونه که در نقشه LULC نیز دیده می‌شود - هم‌خوان است، در حالی که پایداری مقادیر پایین‌تر DBI در برخی



شکل ۷. توزیع فضایی - زمانی شاخص NDBI در شهر رشت برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴

در این پژوهش، شاخص NDBI که بر اساس رابطه  $(SWIR - NIR) / (SWIR + NIR)$  تعریف می‌شود، از تصاویر ماهواره‌ای Landsat TM و OLI برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴ محاسبه شد. به منظور در نظر گرفتن تغییرات رادیومتریک بین صحنه‌ها و اثرات ناشی از تفاوت‌های فصلی زمان تصویربرداری، نقشه‌های حاصل به صورت طیف‌های پیوسته گرادینتی ارائه شده‌اند؛ از این‌رو، جدول ۳ فقط به عنوان یک راهنمای تجربی برای تفسیر و قرائت نقشه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۴. کلید تفسیر تجربی شاخص NDBI در شهر رشت: بازه‌های غالب NDBI بر اساس کلاس‌های کاربری زمین همراه با توضیحات تشخیصی، استخراج‌شده از داده‌های ماهواره‌ای Landsat TM/OLI طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴

توضیحات	بازه غالب NDBI	کلاس کاربری زمین
حضور گسترده بام‌های بتنی، سطوح آسفالتی پیوسته، و خیابان‌های باریک با ترافیک سنگین؛ نشان‌دهنده تراکم بالای ساخت‌وساز، نفوذناپذیری شدید سطح زمین و حداقل پوشش گیاهی در محدوده‌های مرکزی و پرفت‌وآمد شهر.	+0.22 to +0.37	بافت مسکونی متراکم
شامل انبارها، پارکینگ‌ها و محوطه‌های وسیع آسفالتی یا سنگ‌فرش شده است؛ این نواحی بازتاب بالایی در SWIR دارند و معمولاً با بافت‌های مسکونی متراکم هم‌پوشانی فضایی دارند. سطح نفوذناپذیر بسیار زیاد و پوشش گیاهی حداقلی از ویژگی‌های شاخص این کلاس است.	+0.18 to +0.37	تجاری / صنعتی
ترکیبی از بافت‌های کم‌تراکم، فضاهای باز و لکه‌های سبز پراکنده شامل واحدهای مسکونی منفرد، باغچه‌ها و معابر نیمه‌آسفالتی. این نواحی معمولاً دارای مقادیر میانی NDBI بوده و گذار بین مناطق ساخته‌شده متراکم و اراضی کشاورزی یا پوشش گیاهی طبیعی را نشان می‌دهند.	+0.05 to +0.22	حومه پراکنده / کاربری مختلط
دارای بازتاب بالا در باند SWIR و مقادیر اندکی مثبت NDBI؛ در برخی موارد ممکن است با سطوح ساخته‌شده اشتباه گرفته شود. این اراضی معمولاً فاقد پوشش گیاهی و دارای رطوبت بسیار پایین هستند و در مناطق بایر یا در حال توسعه شهری مشاهده می‌شوند.	0.00 to +0.18	خاک خشک و روشن (Bare Dry — Bright Soil)
مقادیر پایین یا نزدیک به صفر به دلیل بازتاب بالاتر در NIR نسبت به SWIR در مراحل رشد گیاه؛ در فصل‌های آبیاری، مقادیر ممکن است منفی‌تر شوند. این نواحی معمولاً شامل شالیزارهای مرطوب، باغ‌ها و کشت‌های فصلی هستند و در تصاویر چندزمانه نوسان طیفی قابل توجهی نشان می‌دهند.	-0.38 to 0.00	اراضی کشاورزی (شالیزار / باغ‌ها)
شامل پوشش‌های گیاهی نفوذپذیر مانند چمن، درختان و بوته‌زارها؛ دارای بازتاب بالا در NIR و جذب زیاد در SWIR که منجر به مقادیر منفی NDBI می‌شود. این نواحی نقش مهمی در تنظیم حرارتی شهری و کاهش دمای سطح زمین (LST) دارند و معمولاً در پارک‌ها، حاشیه خیابان‌ها و فضاهای باز سبز مشاهده می‌شوند.	-0.38 to -0.10	فضاهای سبز شهری / پارک‌ها
دارای مقادیر به شدت منفی NDBI به دلیل بازتاب بسیار پایین در باند SWIR و بازتاب بسیار ناچیز در باند NIR. این نواحی شامل تالاب‌ها، رودخانه‌ها، استخرها و اراضی اشباع از آب بوده و معمولاً با کمترین دمای سطح زمین (LST) در تصاویر ماهواره‌ای مشخص می‌شوند.	$\leq -0.20$	پهنه‌های آبی باز / تالاب‌ها

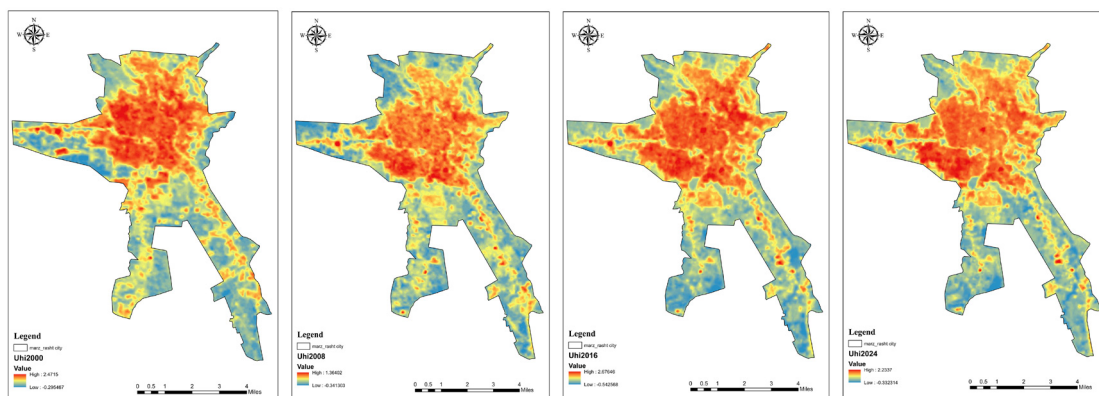
مقایسه چهار نقشه که در شکل ۷ آمده است نشان می‌دهد الگوی فضایی شهر رشت از یک ساختار متراکم و تک‌مرکزی در سال ۲۰۰۰ با گرادین شاعی مشخص از مرکز به پیرامون و مقادیر پایین یا منفی NDBI در نواحی پیرامونی متناسب با وجود شالیزارها، باغ‌ها و کمربندهای تالابی (از جمله حاشیه‌های تالاب عینک در غرب رشت) به ساختاری با حلقه میانی متراکم و زیرمرکزهای پیرامونی در سال ۲۰۲۴ تحول یافته است. در سال ۲۰۰۸، گسترش جانبی پیرامون شهر، به‌ویژه در جهت جنوب و شرق آشکار است؛ لکه‌های

دارای مقادیر پایین یا منفی باقی مانده‌اند. در مجموع، شواهد نشان می‌دهد پیوستگی سطوح نفوذناپذیر افزایش یافته، گسست فضایی کاهش یافته و الگوی شهری از ساختار تک‌مرکزی به الگویی حلقوی با گرایش به چندمرکزی شدن تغییر یافته؛ مسیری که با رشد مبتنی بر توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل و تداوم مرز تماس شهری - کشاورزی سازگار است و به احتمال زیاد بیانگر گسترش و تشدید پدیده جزیره حرارتی شهری (UHI) در دوره‌های متأخر است.

#### توزیع پدیده جزیره حرارتی شهری (UHI) در منطقه مطالعه

پدیده جزیره حرارتی شهری (Urban Heat Island: UHI) به حالتی گفته می‌شود که در آن، مناطق شهری دارای دمایی بالاتر نسبت به نواحی روستایی یا طبیعی پیرامون خود هستند. در چارچوب جزیره حرارتی سطح زمین (Surface UHI)، این اثر از طریق مقایسه دمای سطح زمین (LST) در محدوده شهری با دمای نواحی مرجع روستایی یا جنگلی سنجد می‌شود. شدت جزیره حرارتی شهری (Urban Heat Island Intensity: UHI) معمولاً به صورت تفاوت دمای میان نواحی شهری و مناطق مرجع تعریف می‌شود که مطابق با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$UHII = T(\text{urban}) - T(\text{rural})$$



شکل ۸. تغییرات فضایی - زمانی شدت جزیره حرارتی شهری (UHI) در شهر رشت در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴

از اتلاف گرما می‌شد. در سال ۲۰۰۸، میدان حرارتی شهر خنک‌تر و یکنواخت‌تر شد؛ حداکثر شدت به حدود ۱/۳۶، میانگین به ۰/۲۴ و انحراف معیار به ۰/۲۸ کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش نوسانات حرارتی است. نواحی خنک غرب و شمال غرب (منفی ۰/۳۴) تداوم داشتند و مقیاس لکه حرارتی مرکزی کاهش یافت. این تغییر با پایداری کمرندهای سبز پیرامونی، رطوبت بیشتر خاک و کاهش پیوستگی سطوح نفوذناپذیر مطابقت دارد. در مقابل، سال ۲۰۱۶ نشانه بازگشت گرمایش شهری بود؛ مقدار بیشینه به حدود ۲/۶۷، میانگین به ۱/۰۰ و انحراف معیار به ۰/۷۰ افزایش یافت. لکه‌های حرارتی از هسته مرکزی به سمت شمال و شرق گسترش یافتند، در حالی که کمرندهای جنوبی و غربی (منفی ۰/۵۴) همچنان نقش ریه‌های حرارتی شهر را ایفا کردند. تغییرات کاربری زمین شامل تراکم بیشتر بافت‌های مسکونی - تجاری و خوشه‌های صنعتی، پیوستگی حرارتی را افزایش داد، در حالی که تنظیم‌کننده‌های اقلیمی محلی (نظیر بادهای ملایم شمالی و بارش‌های فصلی) توان جبران گرمایش را نداشتند. در سال ۲۰۲۴،

دارای مقادیر متوسط تا بالای NDBI در امتداد محورهای دسترسی و مسیر کمربندی افزایش یافته‌اند. اگرچه اندکی کاهش در مقدار حداکثر محلی شاخص مشاهده می‌شود (که می‌تواند ناشی از تفاوت‌های رادیومتریکی، فصلی یا سایه‌اندازی باشد)، اما هسته مرکزی پیوستگی درونی بیشتری پیدا کرده و مناطق شمال غرب و شمال شرق همچنان در سطح متوسط تا پایین باقی مانده‌اند. در سال ۲۰۱۶، دنباله بالای شاخص تقویت شده و مقدار حداکثر مثبت حدود ۰/۲۸ ثبت شده است. لکه‌های دارای NDBI بالا گسترش یافته و به یکدیگر متصل شده‌اند و الگو از پراکندگی موضعی به یک حلقه پیرامونی نیمه‌پیوسته تبدیل شده است. در این مرحله، شکاف‌های کم‌تراکم درون‌شهری کاهش یافته و هسته‌های با تراکم متوسط در کمربند میانی ظاهر شده‌اند؛ شدت شاخص در شرق و بخش‌هایی از شمال افزایش یافته، در حالی که جنوب و بخش‌هایی از غرب همچنان دارای مقادیر پایین یا منفی‌اند که با حضور اراضی کشاورزی و کمرندهای تالابی هم‌خوان است. تا سال ۲۰۲۴، کران بالای شاخص از حدود ۰/۲۸ به حدود ۰/۳۷ افزایش یافته است؛ فشردگی در هسته مرکزی تشدید شده، حلقه میانی پیوستگی بیشتری یافته و شکاف‌های کم‌تراکم درون‌شهری به حداقل رسیده‌اند. زیرهسته‌های دارای NDBI بالا در شرق و شمال تثبیت و تقویت شده‌اند، در حالی که جنوب و بخش‌هایی از غرب همچنان

تحلیل چهار مقطع زمانی نقشه‌های جزیره حرارتی شهری (UHI) در شکل ۸ نشان می‌دهد که الگوی حرارتی شهر رشت از وضعیت «هسته داغ با شدت بالا و پیرامون‌های خنک‌تر» در ابتدای دوره، به الگویی با تمرکز حرارتی تعدیل‌شده‌تر در سال‌های اخیر تحول یافته است. در سال ۲۰۰۰، شدت جزیره حرارتی شهری در محدوده مرکزی و شرقی شهر به حدود ۲/۴۷ رسید. میانگین نسبتاً بالا (۰/۷۲) و انحراف معیار قابل توجه (۰/۵۱) بیانگر ناهمگنی حرارتی شدید و تضاد آشکار میان بافت متراکم مرکزی و کمرندهای خنک‌تر جنوبی و غربی بوده؛ مناطقی که به دلیل وجود شالیزارها، باغ‌ها و مجاورت با رودخانه سفیدرود، مقادیر منفی در حدود منفی ۰/۳۰ را نشان می‌دادند. این الگو با مورفولوژی فضایی بخش تاریخی شهر (خیابان‌های باریک، نسبت ارتفاع به عرض بالا و میدان دید آسمان [SVF] محدود هم‌خوانی دارد و سطوح نفوذناپذیر تیره‌رنگ مانند آسفالت و بتن این اثر را تشدید کرده‌اند. از نظر اقلیمی، رطوبت بالای رشت از طریق تبخیر - تعرق در نواحی پیرامونی به خنک‌سازی کمک می‌کرد، اما تهویه ضعیف در هسته مرکزی مانع

نوعی تعدیل نسبی در شدت گرمایش مشاهده می‌شود؛ مقدار بیشینه به حدود ۲/۲۳، میانگین به ۰/۵۵ و انحراف معیار به ۰/۶۰ کاهش یافت. تمرکز حرارت بار دیگر در هسته مرکزی افزایش یافت، اما مناطق جنوبی و غربی همچنان خنک‌ترین بخش‌ها باقی ماندند (حدود منفی ۰/۳۳ تا ۰/۵). این وضعیت با اجرای مداخلات سبز هدفمند و به‌کارگیری مصالح با آلبدوی بالاتر در پروژه‌های نوسازی شهری هم‌راستا است؛ هرچند تداوم تراکم بالا در امتداد محورهای اصلی همچنان خطر بازتولید لکه‌های حرارتی را در پی دارد. در مجموع، تعامل میان عوامل انسانی و محیطی نشان می‌دهد ساختار کالبدی شهر (نسبت ارتفاع به عرض بالا، میدان دید آسمان محدود

و پیوستگی سطوح نفوذناپذیر) در کنار پوشش زمین (تالاب‌ها و کمربندهای سبز پیرامونی)، نقش اصلی را در شکل‌گیری الگوهای UHI رشت ایفا کرده‌اند. بنابراین، با وجود تعدیل نسبی اخیر، کاهش بار حرارتی در هسته و بخش‌های شمال شرقی باید در اولویت سیاست‌های شهری قرار گیرد و حفاظت و تداوم کمربندهای سبز جنوبی و غربی به عنوان زیرساخت‌های حیاتی خنک‌کننده شهر ضروری است.

### تحلیل روند و الگوهای فضایی - زمانی پویایی جزیره حرارتی شهری (UHI) در رشت

جدول ۵. پویایی‌های فضایی - زمانی شاخص‌های جزیره حرارتی شهری (UHI) در شهر رشت در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴

شاخص	سال ۲۰۰۰	سال ۲۰۰۸	سال ۲۰۱۶	سال ۲۰۲۴	تغییرات بازه (۲۰۰۸-۲۰۰۰)	تغییرات بازه (۲۰۱۶-۲۰۰۸)	تغییرات بازه (۲۰۲۴-۲۰۱۶)
حداقل مقدار جزیره حرارتی شهری	منفی ۰.۳۰	منفی ۰.۳۴	منفی ۰.۵۴	منفی ۰.۳۳	۰.۰۴	۰.۲۰	۰.۲۱
بیشترین مقدار جزیره حرارتی شهری	۲.۴۷	۱.۳۶	۲.۶۷	۲.۲۳	-۱.۱۱	۱.۳۱	-۰.۴۴
میانگین جزیره حرارتی شهری	۰.۷۲	۰.۲۴	۱	۰.۵۵	-۰.۴۸	۰.۲۶	۰.۰۷
انحراف معیار	۰.۵۱	۰.۲۸	۰.۷۰	۰.۶۰	۰.۱۹	۰.۴۲	۰.۴۱
نقاط بحرانی حرارتی	مرکز - شرق	مرکز - شمال	مرکز - شمال شرقی	مرکز	کاهش شدت حرارتی در بخش شرقی شهر	افزایش فشار حرارتی در نواحی شمالی و شرقی شهر	تداوم تمرکز حرارتی در بخش‌های مرکزی و شمالی شهر
عوامل کلیدی تغییر	توسعه سریع شهری	سیاست‌های حفاظتی	رشد جمعیت و ساخت‌وساز	سیاست‌های سبز و توسعه کنترل‌شده	پروژه‌های سبز و محدودیت‌های مقرراتی	تضعیف مقررات و غلبه رویکرد توسعه‌محور	تعمیر ترکیبی فشرده‌گی کالبدی، تغییر سیاست‌ها و دگرگونی کاربری زمین

ارتباط دمای سطح زمین با شاخص‌های DBI, NDBI, NDVI, EBI، با استفاده از رگرسیون وزن دار جغرافیایی (GWR) در دوره زمانی (۲۰۰۰ - ۲۰۲۴)

در این بخش از مقاله، به تحلیل و بررسی تغییرات دمای سطح زمین (LST) و ارتباط آن با شاخص‌های مختلف NDVI, NDBI, DBI و EBI در دوره زمانی ۲۰۰۰ و ۲۰۲۴ پرداخته شده است. تحلیل‌ها با استفاده از رگرسیون وزن دار جغرافیایی (GWR) انجام شده است، که به دلیل توانایی آن در در نظر گرفتن همبستگی فضایی و تغییرات مکانی در داده‌ها، برای این نوع تحلیل‌ها بسیار مناسب است. مدل GWR به ما این امکان را می‌دهد که درک دقیقی از نحوه تأثیرگذاری هر یک از این شاخص‌ها بر دمای سطح زمین در نقاط مختلف

جغرافیایی و طی زمان به دست آوریم. در این مطالعه، دو سال کلیدی ۲۰۰۰ و ۲۰۲۴ به عنوان نقاط شروع و پایان تغییرات بررسی شده‌اند. این دو سال به دلیل تغییرات قابل توجه در عوامل اقلیمی، شهری و محیطی در سطح جهانی و به‌ویژه در ایران و شهر رشت، برای مقایسه و تحلیل انتخاب شده‌اند. استفاده از داده‌های این دو سال به طور خاص، به تحلیل تغییرات دما در مقیاس زمانی ۲۴ ساله می‌پردازد و به ما کمک می‌کند تا تأثیرات ناشی از توسعه شهری، تغییرات اقلیمی و سایر عوامل مؤثر بر دمای سطح زمین را بهتر درک کنیم. نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد تغییرات دمای سطح زمین در سطح محلی و طی زمان، تحت تأثیر متغیرهای مختلف جغرافیایی و زیست‌محیطی قرار داشته است. یافته‌ها در ادامه

برای داده‌های LST در دوره زمانی (۲۰۲۴) است. مقادیر میانگین، کمینه، بیشینه و انحراف معیار به منظور بررسی تغییرات فضایی و زمانی LST در شهر رشت محاسبه شده‌اند. این اطلاعات به درک بهتر نحوه توزیع و تغییرات دما طی زمان کمک می‌کند و به ارزیابی دقت مدل‌های رگرسیونی به خصوص (GWR) برای پیش‌بینی LST در مناطق مختلف شهر کمک می‌کند.

نشان‌دهنده تغییرات میانگین، حداقل و حداکثر LST در دوره‌های مختلف و بررسی رابطه این تغییرات با شاخص‌های مختلف محیطی خواهد بود.

### توصیف آماری متغیرهای LST دوره ۲۰۲۴

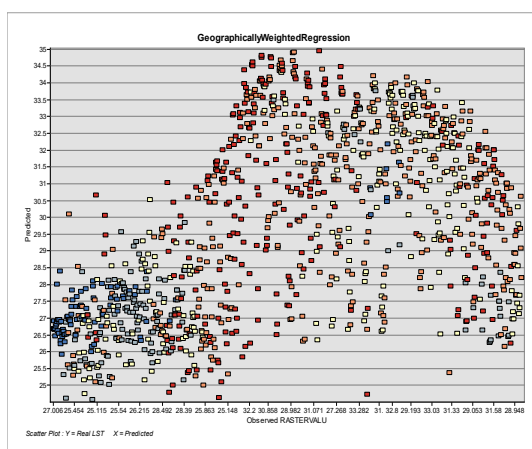
در این بخش، توصیف آماری مربوط به متغیر دمای سطح زمین (LST) ارائه می‌شود. این تحلیل شامل محاسبه مقادیر آماری اصلی

جدول ۶. توصیف آماری متغیر دمای سطح زمین (LST) در دوره زمانی (۲۰۲۴)

مقدار	شاخص
۲۹.۶۴ درجه سانتی‌گراد	Observed LST – میانگین
۲۳.۲۱ درجه سانتی‌گراد	Observed LST – کمینه
۳۸.۲۸ درجه سانتی‌گراد	Observed LST – بیشینه
۲۹.۷۰ درجه سانتی‌گراد	Predicted LST – میانگین
۲۴.۵۸ درجه سانتی‌گراد	Predicted LST – کمینه
۳۴.۹۶ درجه سانتی‌گراد	Predicted LST – بیشینه
-۰.۰۵۶	Residual – میانگین
+۴.۷۰	Residual – بیشینه
-۴.۷۰	Residual – کمینه
-۰.۰۴۶	StdResidual – میانگین
+۶.۲۰	StdResidual – بیشینه
-۴.۸۷	StdResidual – کمینه

درجه قرار دارند که نشان‌دهنده همبستگی مثبت و عملکرد مطلوب مدل است. هرچه نقاط به این خط نزدیک‌تر باشند، مدل در پیش‌بینی LST دقیق‌تر بوده است. پراکندگی کمی در نقاط پایین نمودار نشان‌دهنده پیش‌بینی‌های کم‌دقت در برخی مناطق خاص است که نیاز به بررسی دقیق‌تری دارند.

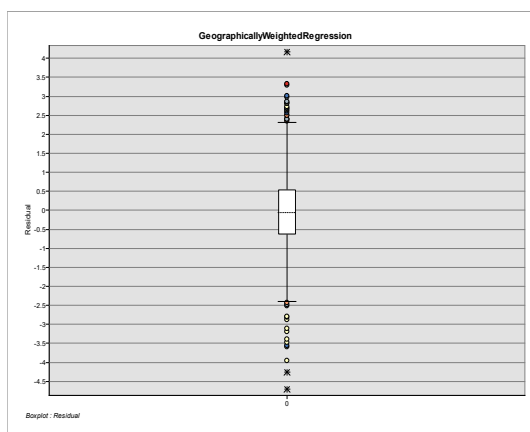
مقایسه مقادیر واقعی (Real LST) و پیش‌بینی شده (Predicted LST) دمای سطح زمین (LST) با مدل GWR شکل ۹ نشان می‌دهد چگونه LST واقعی (محور افقی) با LST پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) (محور عمودی) مقایسه می‌شود. بیشتر نقاط در اطراف خط ۴۵



شکل ۹. نمودار Scatter Plot مقایسه LST واقعی و LST پیش‌بینی شده مدل GWR

نقاط خارج از جعبه (Outliers) نقاطی که در بالای جعبه یا زیر آن قرار دارند، نقاط دورافتاده (outliers) هستند. این نقاط نشان می‌دهند در برخی نواحی مدل نتوانسته است به خوبی پیش‌بینی کند و خطاهای زیاد دارد. این نواحی ممکن است شامل مناطق خاص با تغییرات پیچیده در کاربری زمین یا ویژگی‌های محیطی غیرعادی باشند. (پ ستاره‌ها و علامت‌ها: نقاطی که به صورت ستاره یا علامت‌های \* در نمودار دیده می‌شوند، به طور خاص outliers شدید هستند که مدل در این بخش‌ها به طور جدی دقت نداشته است.

نمودار Boxplot باقی‌مانده‌ها (Residuals) مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) در شکل ۱۰ که نمودار Boxplot باقی‌مانده‌ها (Residuals) نشان‌دهنده توزیع خطاهای مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) است. این نمودار به‌ویژه برای ارزیابی دقت مدل در پیش‌بینی LST استفاده می‌شود و می‌تواند بینش‌های مهمی درباره کیفیت پیش‌بینی‌ها ارائه دهد. الف) جعبه وسط (IQR) بیشتر داده‌ها در محدوده باقی‌مانده‌های بین (منفی ۰/۶ و ۰/۶) قرار دارند، که نشان می‌دهد مدل به طور کلی عملکرد مناسبی داشته است و خطاهای پیش‌بینی در بیشتر نقاط محدود و قابل قبول بوده‌اند. (ب)



شکل ۱۰. نمودار Boxplot باقی‌مانده‌ها (Residuals) مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR)

در این نواحی است. این مقادیر بالای  $Local R^2$  نشان می‌دهند مدل GWR در این بخش‌ها نتوانسته ارتباط معناداری بین LST و شاخص‌های محیطی برقرار کند و دمای سطح زمین را با دقت بالا پیش‌بینی کند. به بیان دیگر، مدل در این مناطق نتوانسته است ویژگی‌های محلی مانند پوشش گیاهی (NDVI) یا تراکم ساخت‌وساز (NDBI) را به خوبی در نظر بگیرد. با این حال، در برخی از نواحی شهر،  $Local R^2$  نزدیک به صفر است، که به این معناست که مدل در این مناطق دقت زیادی ندارد. این نقاط ممکن است به دلایل مختلفی مانند تغییرات پیچیده در کاربری زمین، وجود داده‌های خارج از الگو یا تاثیرات متغیرهای خارجی که در مدل لحاظ نشده‌اند، از دقت کمتری برخوردار باشند. این نواحی به‌ویژه ممکن است مناطق با تغییرات سریع کاربری زمین یا نواحی صنعتی باشند که ویژگی‌های محیطی آن‌ها از الگوی عمومی شهر متفاوت است.

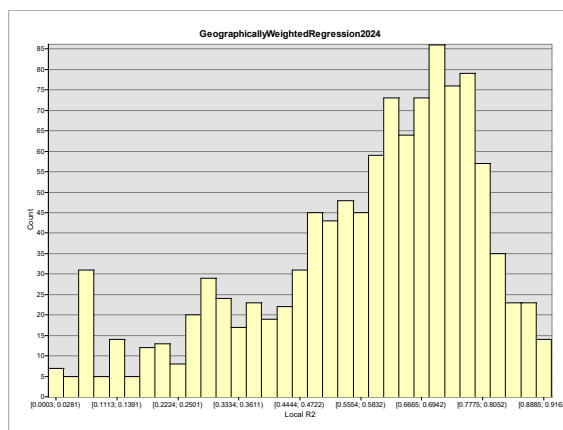
ارزیابی کیفیت مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) برای تحلیل ارتباط LST و شاخص‌های محیطی در این بخش، نتایج مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) برای  $Local R^2$  بررسی می‌شود.  $Local R^2$  معیاری است که نشان می‌دهد مدل چگونه توانسته است ارتباط بین دمای سطح زمین (LST) و شاخص‌های محیطی NDVI، NDBI، DBI، EBDI را در سطح محلی (مناطق مختلف شهر) توضیح دهد. مقادیر  $Local R^2$  به طور خاص در تحلیل‌های فضایی به کار می‌روند تا نشان دهند مدل در کدام نقاط از دقت بالایی برخوردار است و در کدام نقاط نیاز به بهبود دارد. در این تحقیق،  $Local R^2$  در دوره‌های زمانی مختلف (۲۰۲۴) برای مناطق مختلف شهر رشت محاسبه شده است. در جدول ارائه‌شده، بیشتر نقاط شهر دارای مقادیر  $Local R^2$  بین ۰/۴۷ تا ۰/۷۳ هستند، که نشان‌دهنده عملکرد خوب تا خیلی خوب مدل

جدول ۷. توزیع مقادیر  $Local R^2$  برای مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) در تحلیل ارتباط دمای سطح زمین (LST) با شاخص‌های محیطی در دوره زمانی (۲۰۲۴)

مقدار	شاخص
۰.۵۷۶	میانگین $Local R^2$
۰.۰۰۰۳	کمترین $Local R^2$
۰.۹۱۶	بیشترین $Local R^2$
۰.۷۲۸-۰.۴۶۸	$IQR Local R^2$

در شکل ۱۱، مقادیر مختلف  $Local R^2$  بر اساس تعداد دفعات وقوع هر مقدار در محدوده‌های مختلف آن، به نمایش درآمده‌اند. از این نمودار می‌توان مشاهده کرد که توزیع  $Local R^2$  در بیشتر نواحی شهر به صورت چند قله قرار دارد، که نشان‌دهنده تفاوت‌های عملکرد مدل در نواحی مختلف است. که میانه  $Local R^2$  (median) در حدود ۰/۵۷۶ است که نشان می‌دهد بیشتر نواحی پیش‌بینی LST دارای دقت متوسط هستند. همین‌طور کمترین  $Local R^2$  برابر

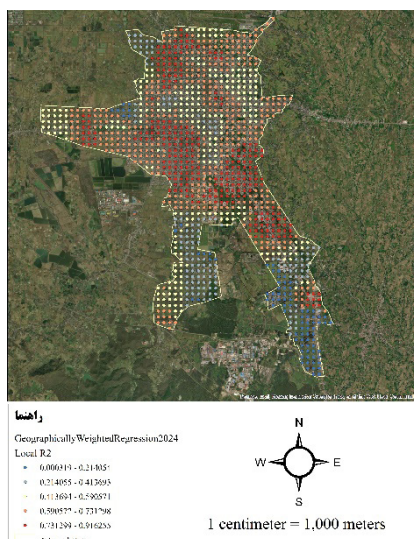
۰/۰۰۰۳ است که مناطقی را نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی‌های خود دقت پایینی داشته است. از این‌رو بیشترین  $Local R^2$  برابر ۰/۹۱۶ است که نشان‌دهنده مناطقی است که مدل در آن‌ها دقت بسیار خوبی داشته است. در نهایت، نمودار از یک توزیع تقریبی متقارن برخوردار است و بخش عمده‌ای از داده‌ها در محدوده متوسط قرار دارند.



شکل ۱۱. Histogram توزیع مقادیر  $Local R^2$  مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) برای تحلیل ارتباط دمای سطح زمین (LST) با شاخص‌های محیطی در سال ۲۰۲۴

همبستگی بالای بین LST و شاخص‌های محیطی در این بخش‌ها هستند. در مقابل، رنگ‌های آبی و سبز در نقشه نشان‌دهنده مقادیر پایین  $Local R^2$  هستند. این مقادیر به‌ویژه در نواحی که کاربری زمین به‌شدت تغییر کرده است یا ویژگی‌های محیطی خاصی دارند، به چشم می‌خورند.

در شکل ۱۲، مقادیر  $Local R^2$  در مناطق مختلف شهر رشت با رنگ‌های متفاوتی نشان داده شده است. از رنگ‌های تیره تا روشن، توزیع مقادیر  $Local R^2$  را در نقشه مشاهده می‌کنیم. رنگ‌های قرمز و نارنجی به مقادیر بالای  $Local R^2$  اشاره دارند که نشان‌دهنده پیش‌بینی‌های دقیق‌تر LST در این نواحی هستند. این مناطق به طور کلی از عملکرد مطلوب مدل GWR برخوردارند و نشان‌دهنده



شکل ۱۲.  $Local R^2$  مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) برای تحلیل ارتباط دمای سطح زمین (LST) و شاخص‌های محیطی در سال ۲۰۲۴

برای داده‌های LST در دوره زمانی (۲۰۰۰) است. مقادیر میانگین، کمینه، بیشینه و انحراف معیار به منظور بررسی تغییرات فضایی و زمانی LST در شهر رشت محاسبه شده‌اند. این اطلاعات به درک

توصیف آماری متغیرهای LST دوره ۲۰۰۰ در این بخش، توصیف آماری مربوط به متغیر دمای سطح زمین (LST) ارائه می‌شود. این تحلیل شامل محاسبه مقادیر آماری اصلی

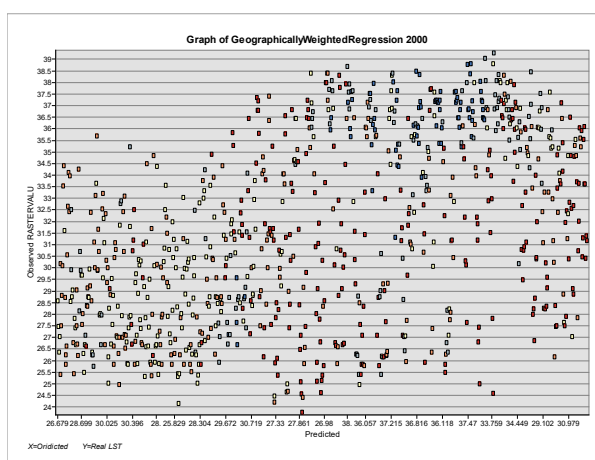
بهتر نحوه توزیع و تغییرات دما طی زمان کمک می‌کند و به ارزیابی دقت مدل‌های رگرسیونی به‌خصوص (GWR) برای

جدول ۸. توصیف آماری متغیر دمای سطح زمین (LST) در دوره زمانی (۲۰۰۰)

شاخص	مقدار
Observed LST – میانگین	۳۱.۵۹ درجه سانتی‌گراد
Observed LST – کمینه	۲۳.۷۷ درجه سانتی‌گراد
Observed LST – بیشینه	۳۹.۲۷ درجه سانتی‌گراد
Predicted LST – میانگین	۳۱.۶۲ درجه سانتی‌گراد
Predicted LST – کمینه	۲۲.۷۶ درجه سانتی‌گراد
Predicted LST – بیشینه	۳۸.۳۵ درجه سانتی‌گراد
Residual – میانگین	-۰.۰۳
Residual – بیشینه	+۴.۳۰
Residual – کمینه	-۳.۶۶
StdResidual – میانگین	-۰.۰۱
StdResidual – بیشینه	+۳.۳۰
StdResidual – کمینه	-۳.۱۷

اطراف خط مورب قرار گرفته‌اند، که نشان‌دهنده تطابق قابل قبول بین پیش‌بینی‌ها و مشاهدات واقعی است. هرچه نقاط داده‌ها به این خط نزدیک‌تر باشند، دقت بیشتر مدل در پیش‌بینی دما را نشان می‌دهد. این تطابق خوب در بیشتر نواحی نشان‌دهنده عملکرد صحیح مدل در پیش‌بینی دمای سطح زمین است. با این حال، برخی از نقاط از خط مورب فاصله دارند که نشان‌دهنده وجود باقی‌مانده‌های بیشتر و اختلافات بیشتر بین پیش‌بینی‌ها و مشاهدات واقعی است. این نقاط به طور معمول در نواحی با ویژگی‌های خاص جغرافیایی یا محیطی که مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق آن‌ها نبوده است، مشاهده می‌شوند.

مقایسه مقادیر واقعی (Real LST) و پیش‌بینی شده (Predicted LST) دمای سطح زمین (LST) با مدل GWR در شکل ۱۳، رابطه بین دمای سطح زمین مشاهده‌شده (Observed LST) و پیش‌بینی شده (Predicted LST) در دوره زمانی مورد نظر، با استفاده از مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) مورد بررسی قرار گرفته است. محور عمودی این نمودار، مقادیر Observed LST را نشان می‌دهد که از مشاهدات واقعی به دست آمده‌اند، در حالی که محور افقی مقادیر Predicted LST را نمایش می‌دهد که توسط مدل GWR برای همان مناطق پیش‌بینی شده است. در ارزیابی این نمودار، مشاهده می‌شود که بیشتر نقاط داده‌ها به طور پراکنده در

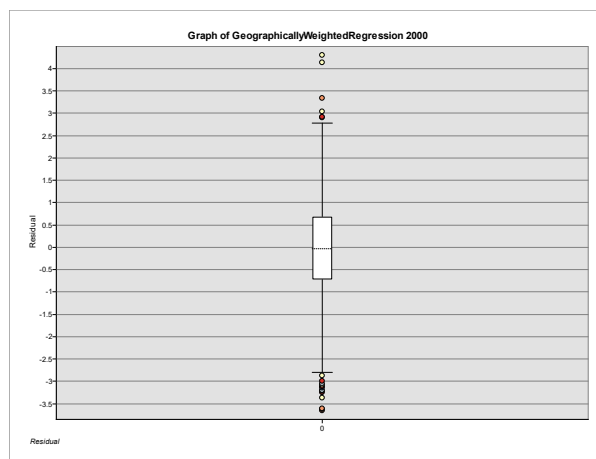


شکل ۱۳. نمودار Scatter Plot مقایسه LST واقعی و LST پیش‌بینی شده مدل GWR

چند نقطه پرت (Outliers) مشاهده می‌شود که خارج از محدوده طبیعی داده‌ها قرار دارند. این نقاط نمایانگر باقی‌مانده‌های بزرگ هستند که مدل نتوانسته است به طور دقیق پیش‌بینی کند. وجود این نقاط نشان می‌دهد در برخی از مناطق جغرافیایی یا شرایط خاص، مدل ممکن است دقت کمتری داشته باشد. به طور کلی، پراکندگی بیشتر باقی‌مانده‌ها در بازه میانه نمودار نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل است، اما این نقاط پرت نیاز به توجه و تحلیل دقیق‌تری دارند تا دلایل آن‌ها مشخص شود.

نمودار Boxplot باقی‌مانده‌ها (Residuals) مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR)

شکل ۱۴ باقی‌مانده‌ها (Residuals) مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) برای سال ۲۰۰۰، توزیع و پراکندگی باقی‌مانده‌ها را به طور واضح نمایش می‌دهد. در این نمودار، میانه باقی‌مانده‌ها که نزدیک به صفر قرار دارد، نشان‌دهنده دقت نسبی مدل در پیش‌بینی داده‌ها است. این امر به این معناست که مدل GWR به طور کلی توانسته است پیش‌بینی‌های دقیقی ارائه دهد و تفاوت‌ها بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی کم است. با این حال، در اطراف مربع Box



شکل ۱۴. نمودار Boxplot باقی‌مانده‌ها (Residuals) مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR)

در سه حالت میانگین، کمینه و بیشینه برای داده‌های سال ۲۰۰۰ نشان می‌دهد که میانگین (Local R<sup>2</sup>: 0.68)، نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل در پیش‌بینی تغییرات LST در سطح کلی است. و کمینه (Local R<sup>2</sup>: 0.13)، نشان‌دهنده دقت پایین مدل در برخی مناطق خاص است که نیاز به بهبود دارند. سپس بیشینه (Local R<sup>2</sup>: 0.92)، نشان‌دهنده دقت بالا و تطابق خوب مدل با داده‌ها در نواحی خاص است.

ارزیابی کیفیت مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) برای تحلیل ارتباط LST و شاخص‌های محیطی در دوره ۲۰۰۰

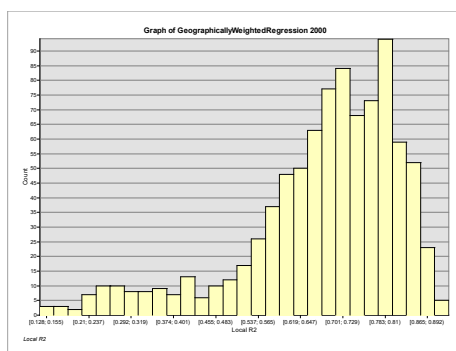
این بخش به ارزیابی عملکرد مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) در تحلیل رابطه دمای سطح زمین (LST) با شاخص‌های محیطی پرداخته است. برای ارزیابی مدل از ضریب تعیین محلی (Local R<sup>2</sup>) استفاده شده که نشان‌دهنده میزان تطابق مدل با داده‌ها در سطح منطقه‌ای است. جدول شماره ۹ مقادیر Local R<sup>2</sup> را

جدول ۹. توزیع مقادیر Local R<sup>2</sup> برای مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) در تحلیل ارتباط دمای سطح زمین (LST) با شاخص‌های محیطی در دوره زمانی ۲۰۰۰

مقدار	شاخص
۰.۶۸	میانگین Local R <sup>2</sup>
۰.۱۳	کمترین Local R <sup>2</sup>
۰.۹۲	بیشترین Local R <sup>2</sup>

نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل در بیشتر نقاط است. با این حال، مقادیر کم Local R<sup>2</sup> در سمت چپ نمودار نشان می‌دهد در برخی مناطق پیش‌بینی‌ها توسط نرم افزار دقیق نبوده و نیاز به بهبود مدل در این نواحی وجود دارد.

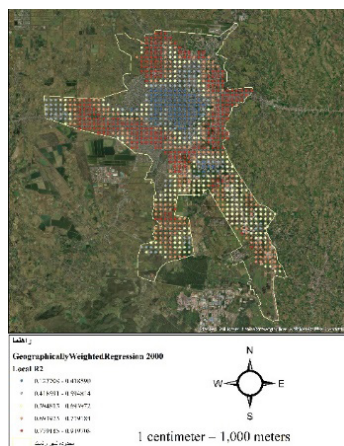
این نمودار هیستوگرام توزیع مقادیر Local R<sup>2</sup> را در مدل GWR برای داده‌های سال ۲۰۰۰ نشان می‌دهد. Local R<sup>2</sup> نشان‌دهنده میزان تطابق مدل در سطح منطقه‌ای است، و این نمودار به ما کمک می‌کند تا پراکندگی و توزیع این مقادیر را در میان داده‌ها مشاهده کنیم. بیشتر مقادیر Local R<sup>2</sup> در بازه ۰/۶۰ تا ۰/۹۰ قرار دارند که



شکل ۱۵. Histogram توزیع مقادیر Local R<sup>2</sup> مدل رگرسیون وزن دار جغرافیایی (GWR) برای تحلیل ارتباط دمای سطح زمین (LST) با شاخص‌های محیطی در سال ۲۰۰۰

قادر به شبیه‌سازی آن‌ها بوده است. از طرف دیگر، مناطق آبی که نشان‌دهنده مقادیر پایین Local R<sup>2</sup> هستند؛ به این معنا که مدل نتوانسته در این نواحی پیش‌بینی‌های دقیقی انجام دهد. این نواحی اغلب در حاشیه‌ها یا مناطق دور از مراکز شهری قرار دارند و می‌توانند نشان‌دهنده دقت پایین مدل در پیش‌بینی دما در این مناطق باشند. این مشکل ممکن است به دلیل ویژگی‌های خاص جغرافیایی یا کمبود داده‌ها در این نواحی باشد که مدل نتوانسته به طور مؤثر آن‌ها را شبیه‌سازی کند. مناطق زرد و نارنجی نمایانگر مقادیر متوسط Local R<sup>2</sup> هستند، که نشان‌دهنده پیش‌بینی‌های نسبتاً دقیق مدل، اما با تفاوت‌های خاص در این مناطق است. این بخش از نقشه نشان‌دهنده نواحی‌ای است که مدل عملکرد بهتری نسبت به سایر نواحی داشته، اما همچنان نیاز به بهبود در برخی بخش‌ها دارد.

نقشه ارائه‌شده در شکل ۱۶، مربوط به مدل رگرسیون وزن دار جغرافیایی (GWR) برای سال ۲۰۰۰ است و مقادیر Local R<sup>2</sup> را در نقاط مختلف جغرافیایی نشان می‌دهد. این نقشه به طور خاص، ارتباط بین دمای سطح زمین (LST) و ویژگی‌های جغرافیایی را از طریق مدل GWR در سطح نواحی مختلف بررسی می‌کند. بر اساس لجنده موجود در نقشه، مقادیر Local R<sup>2</sup> به طور رنگی نمایش داده شده است که نشان‌دهنده کیفیت پیش‌بینی مدل در هر نقطه جغرافیایی است. در این نقشه، مناطق قرمز نمایانگر مقادیر بالای Local R<sup>2</sup> هستند؛ به این معنا که مدل GWR در این نواحی دقت بالایی در پیش‌بینی دما داشته است. این نقاط معمولاً در مناطق مرکزی و برخی مناطق نزدیک به شهرها مشاهده می‌شوند، که نشان‌دهنده پیش‌بینی‌های دقیق‌تر مدل در این مناطق است. این دقت ممکن است به دلیل ویژگی‌های جغرافیایی مشابه در این نواحی یا تأثیرات مشترک عوامل محیطی باشد که مدل به خوبی



شکل ۱۶. Local R<sup>2</sup> مدل رگرسیون وزن دار جغرافیایی (GWR) برای تحلیل ارتباط دمای سطح زمین (LST) و شاخص‌های محیطی در سال ۲۰۰۰

(EBBI) و شاخص ساخت‌وساز خشک (DBI) به صورت هم‌زمان با داده‌های دمای سطح زمین، در چهار مقطع زمانی (۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴) مورد تحلیل قرار گرفتند. این شاخص‌ها ابعاد مکملی از ساختار پوشش زمین را نمایندگی می‌کنند: الف) شاخص (NDVI) میزان سبزی‌نگی پوشش گیاهی و پتانسیل تبخیر - تعرق را نشان می‌دهد؛ ب) شاخص (NDBI) محدوده‌های نفوذناپذیر و بافت‌های ساخته‌شده را تفکیک می‌کند؛ پ) شاخص (EBBI) با ترکیب اطلاعات حرارتی، توانایی تمایز میان خاک‌های برهنه و

روندهای زمانی و ارتباط میان دمای سطح زمین (LST) و شاخص‌های کلیدی در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ درک پویایی زمانی میان دمای سطح زمین (LST) و شاخص‌های زیست‌فیزیکی - شهری، بینش‌های اساسی در زمینه عوامل محرک جزیره حرارتی شهری (UHI) و پیامدهای بوم‌شناختی آن فراهم می‌آورد. در این پژوهش، چهار شاخص کلیدی شامل شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص نرمال‌شده مناطق ساخته‌شده (NDBI)، شاخص توسعه‌یافته ساخت‌وساز و برهنگی

معکوس قوی میان این دو متغیر بود؛ به گونه‌ای که پوشش گیاهی مترکام در نواحی جنوبی و غربی با مقادیر پایین‌تر LST همراه بوده و در مقابل، هسته شهری و بخش‌های شرقی دارای NDVI پایین و دمای سطحی بالا بودند. در سال ۲۰۰۸، این همبستگی تقویت شد (منفی ۰/۸۰) که نشان‌دهنده بازبازی نسبی پوشش گیاهی، ایجاد اثر خنک‌کنندگی موضعی و اجرای سیاست‌های حفاظتی در آن دوره است. در سال ۲۰۱۶، رابطه یادشده تضعیف شد (منفی ۰/۶۵) که ناشی از گسترش سریع شهری، جایگزینی اراضی سبز با سطوح نفوذناپذیر و افزایش تضاد دمایی مرکز - پیرامون بود. در سال ۲۰۲۴، ضریب همبستگی تا حدودی بازبازی شد (منفی ۰/۷۸) که با اجرای پروژه‌های سبز شهری (مانند پارک‌های جنگلی شرقی) و استفاده از مصالح ساختمانی با بازتاب بیشتر (آلبدوی بالا) هم‌راستا است. به طور کلی، کاهش NDVI در بخش‌های مرکزی و شمالی شهر به عنوان عامل اصلی افزایش دمای سطح زمین و تشدید UHI شناسایی می‌شود؛ در حالی که سیاست‌های سبز شهری و حفاظت از کمربندهای طبیعی موجب تقویت رابطه منفی NDVI-LST و افزایش تاب‌آوری حرارتی شهر رشت شده‌اند. همچنین، نمودارها، جدول‌ها و توضیحات تفصیلی در ادامه، ارتباط میان این شاخص و دمای سطح زمین (LST) را به صورت تحلیلی نمایش می‌دهند.

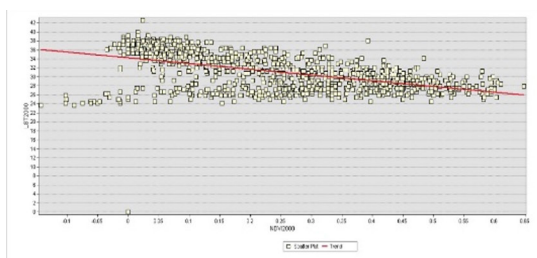
بافت‌های شهری را افزایش می‌دهد؛ ت شاخص (DBI) با کاهش خطای طیفی میان خاک‌های خشک و سطوح شهری، دقت شناسایی بافت‌های ساخته‌شده را در مناطق خشک و نیمه‌خشک بهبود می‌بخشد. تحلیل هم‌زمان روند این شاخص‌ها با تغییرات LST در این بخش با سه هدف انجام شده است: الف) شناسایی الگوهای زمانی تغییرات در دمای سطح زمین و شاخص‌های منتخب، ب) بررسی همبستگی‌ها و اثرات متقابل میان سبزی‌نگی، نفوذناپذیری و پاسخ‌های حرارتی، پ) تبیین فرایندهای فضایی - زمانی مؤثر بر تشدید یا تعدیل پدیده جزیره حرارتی شهری در رشت طی دوره مورد مطالعه‌شده. علاوه بر این، شکل‌ها، جدول‌ها و توضیحات همراه در ادامه، ارتباط میان هر یک از شاخص‌ها با دمای سطح زمین (LST) را به صورت تحلیلی و مقایسه‌ای نمایش می‌دهند.

#### رابطه میان شاخص NDVI و دمای سطح زمین (LST)

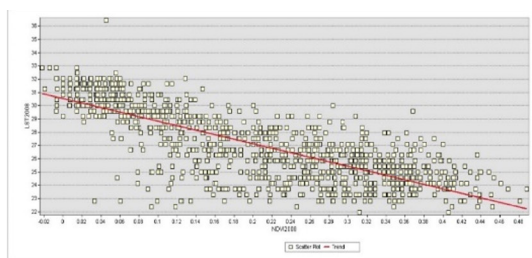
تحلیل همبستگی زمانی میان پوشش گیاهی و دمای سطح زمین (LST) در شکل ۱۷ نشان می‌دهد طی کل دوره مطالعه، رابطه‌ای منفی و پایدار میان NDVI و LST وجود دارد؛ به این معنا که افزایش پوشش گیاهی (و در نتیجه افزایش تبخیر - تعرق) موجب کاهش دمای سطح زمین و تعدیل پدیده جزیره حرارتی شهری می‌شود. در سال ۲۰۰۰، ضریب همبستگی حدود منفی ۰/۷۵ بیانگر رابطه

جدول ۱۰. رابطه میان شاخص NDVI و دمای سطح زمین (LST) در شهر رشت طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴

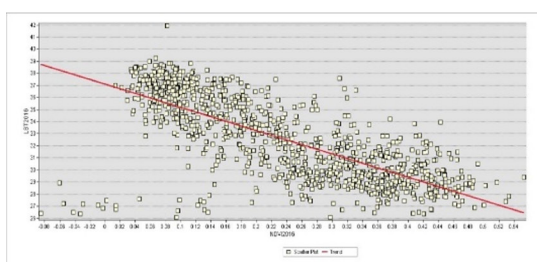
سال	میانگین NDVI	میانگین دمای سطح زمین (°C)	ضریب همبستگی (NDVI-LST)	تفسیر
۲۰۰۰	۰.۲۵	۳۵	منفی ۰.۷۵	رابطه معکوس قوی؛ توسعه شهری محدود
۲۰۰۸	۰.۳۰	۳۳	منفی ۰.۸۰	بهبود پوشش گیاهی؛ کاهش جزئی در دمای سطح زمین
۲۰۱۶	۰.۲۰	۳۷	منفی ۰.۶۵	توسعه ناپایدار؛ افزایش نابرابری حرارتی (تضاد دمایی)
۲۰۲۴	۰.۳۵	۳۴	منفی ۰.۷۸	بهبود نسبی در پی اجرای سیاست‌های سبز شهری



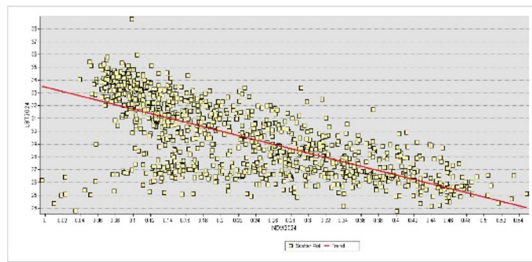
الف: ۲۰۰۰



ب: ۲۰۰۸



پ: ۲۰۱۶

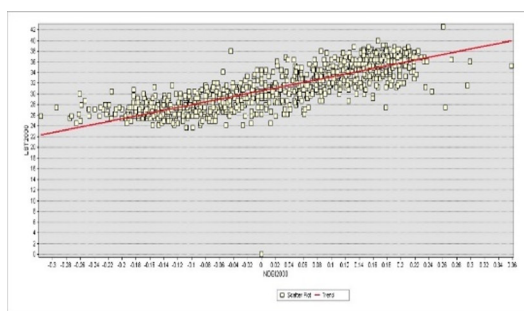


ت: ۲۰۲۴

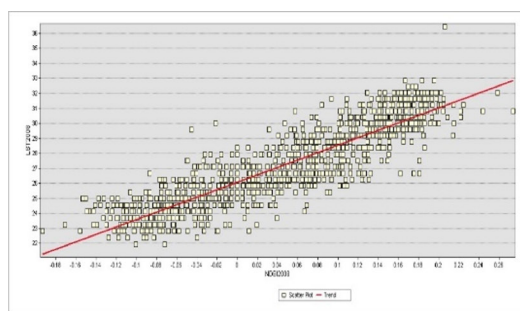
شکل ۱۷. روابط رگرسیونی میان شاخص NDVI و دمای سطح زمین (LST) در شهر رشت برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴

دماهای پایین‌تر همراه بوده‌اند که نشان‌دهنده اثر خنک‌کنندگی پوشش سبز و پهنه‌های آبی است. در سال ۲۰۰۸، شیب خط رگرسیون افزایش یافته و پراکندگی داده‌ها کاهش یافته است؛ نقاط دارای NDBI منفی کاهش یافته‌اند و در مقابل، نواحی با NDBI مثبت و LST بالاتر فراوان‌تر شده‌اند. در سال ۲۰۱۶، دامنه LST گسترده‌تر شده و خوشه‌های داغ در مقادیر مثبت NDBI شدت گرفته‌اند، که با گسترش کاربری‌های شهری پیوسته و تراکم کالبدی بیشتر هم‌خوان است. در سال ۲۰۲۴، تمرکز نقاط در محدوده NDBI مثبت (۰ تا ۰/۱۲) و دمای سطحی بالا (حدود ۳۲ تا ۴۲ درجه سانتی‌گراد) همراه با شیب تندتر منحنی، نشان می‌دهد رابطه میان نفوذناپذیری سطح و گرمایش سطح زمین به بیشینه خود رسیده است؛ در حالی که سهم نواحی دارای NDBI منفی (پوشش گیاهی و تالابی) به طور محسوسی کاهش یافته است.

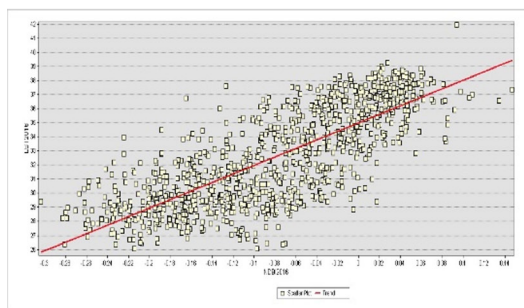
رابطه میان شاخص NDBI و دمای سطح زمین (LST) رابطه میان شاخص نرمال‌شده مناطق ساخته‌شده (NDBI) و دمای سطح زمین (LST) که در شکل ۱۸ آمده است، در تمامی سال‌های مورد مطالعه مثبت بوده و از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ به طور پیوسته تقویت شده است؛ به طوری که با افزایش سطوح نفوذناپذیر و بافت‌های ساخته‌شده، دمای سطح زمین نیز به صورت متناظر افزایش یافته است. مقدار همبستگی از حدود (۰/۶۰-۰/۵۰) در سال ۲۰۰۰ به (۰/۷۰-۰/۶۰) در سال ۲۰۰۸، سپس (۰/۷۵-۰/۷۰) در سال ۲۰۱۶ و در نهایت به حدود (۰/۸۰) در سال ۲۰۲۴ رسیده است؛ که بیانگر روندی با شیب تندتر و هم‌گرایی بیشتر نقاط داده پیرامون خط رگرسیون است. در سال ۲۰۰۰، اگرچه ارتباط مثبت میان NDBI و LST مشاهده می‌شود، پراکندگی گسترده داده‌ها و وجود مقادیر منفی NDBI (نواحی دارای پوشش گیاهی یا مرطوب) با



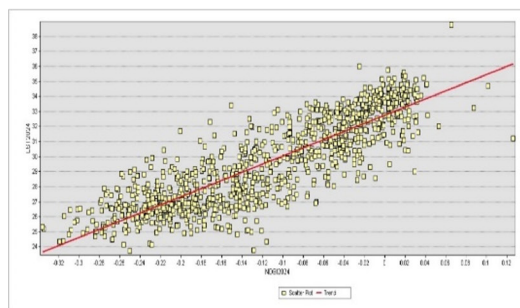
الف : ۲۰۰۰



ب : ۲۰۰۸



پ : ۲۰۱۶



ت : ۲۰۲۴

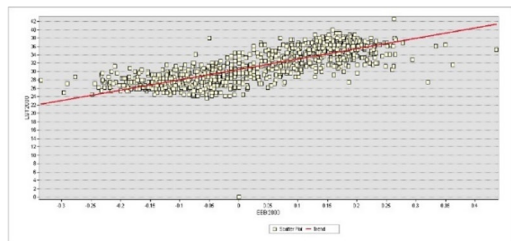
شکل ۱۸. روابط رگرسیونی میان شاخص NDBI و دمای سطح زمین (LST) در شهر رشت برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴

پوشیده از پوشش گیاهی و اراضی مرطوب با دماهای پایین‌تر است، جایی که اثر خنک‌کنندگی چشمگیر مناظر پیرامونی همچنان قابل مشاهده است. در سال ۲۰۰۸، شیب نمودار افزایش یافته و داده‌ها تراکم بیشتری پیرامون خط رگرسیون پیدا کرده‌اند؛ سهم نقاط با مقادیر پایین EBBI کاهش یافته و در مقابل، نواحی با مقادیر متوسط تا بالا همراه با دماهای سطحی بالاتر افزایش یافته‌اند. روندی که با گسترش کالبدی شهری و کاهش لکه‌های سبز یا مرطوب هم‌خوان است. در سال ۲۰۱۶، این رابطه بیشتر تقویت شده و دامنه دماهای سطحی گسترش یافته است. خوشه‌های حرارتی در مقادیر بالای EBBI افزایش یافته‌اند که بیانگر نقش سطوح صنعتی - تجاری و بافت‌های پیوسته‌تر شهری در تشدید گرمایش سطحی است، در حالی که نواحی با EBBI پایین هنوز حضور دارند اما تأثیرشان کاهش یافته است. در سال ۲۰۲۴، شیب رابطه همچنان بالا و

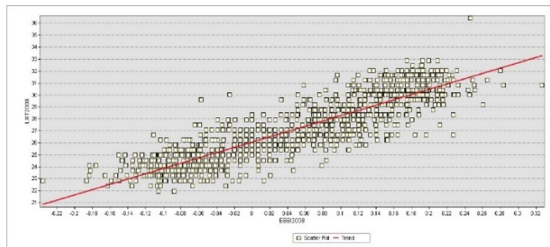
رابطه میان شاخص EBBI و دمای سطح زمین (LST) چهار نمودار پراکنش (Scatterplots) در شکل ۱۹ نشان می‌دهند شاخص توسعه‌یافته ساخت‌وساز و برهنگی (Enhanced Built-up and Bareness Index: EBBI) که با ادغام اطلاعات حرارتی، توانایی بهتری در شناسایی سطوح ساخته‌شده و خاک‌های برهنه دارد در تمام دوره‌های زمانی مورد بررسی، رابطه‌ای مثبت و معنادار با دمای سطح زمین (LST) حفظ کرده است. به بیان دیگر، با افزایش گستره سطوح نفوذناپذیر و خاک‌های بدون پوشش، دمای سطح زمین نیز به طور متناسب افزایش یافته است. به دلیل بهره‌گیری از مؤلفه حرارتی، شاخص EBBI نسبت به شاخص‌های صرفاً طیفی، ارتباطی پایدارتر و فیزیکی‌تر با ذخیره و انتشار حرارت سطحی برقرار می‌کند. در سال ۲۰۰۰، شیب خط برازش مثبت ولی نسبتاً ملایم است؛ پراکندگی گسترده داده‌ها و مقادیر پایین EBBI بیانگر نواحی

رسیده است. با این حال، تعداد محدودی از نقاط دارای EBBI پایین همچنان وجود دارند که نقش خنک‌کنندگی کمربندهای سبز و مرطوب جنوبی و غربی شهر را آشکار می‌سازند.

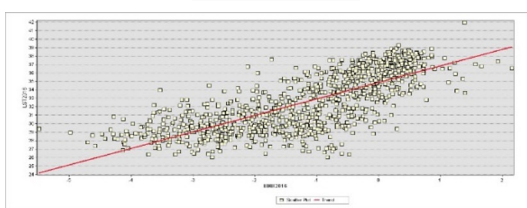
پراکندگی داده‌ها کنترل شده‌تر است؛ تمرکز نقاط در محدوده EBBI متوسط تا بالا همراه با مقادیر بالای LST نشان می‌دهد پیوند میان سطوح ساخته شده/برهنه و گرمایش سطحی به مرحله بلوغ کامل



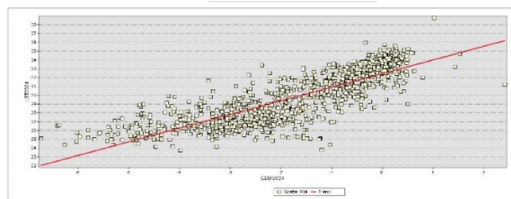
الف: ۲۰۰۰



ب: ۲۰۰۸



پ: ۲۰۱۶

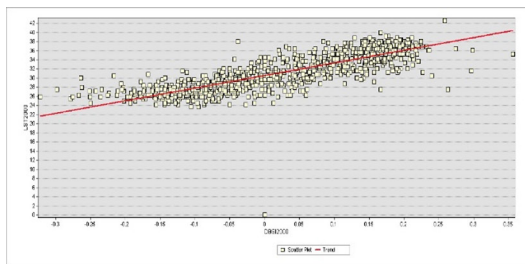


ت: ۲۰۲۴

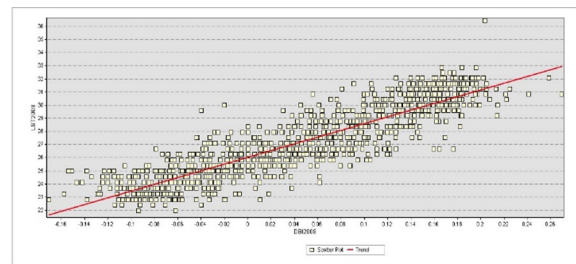
شکل ۱۹. روابط رگرسیونی میان شاخص توسعه یافته ساخت‌وساز و برهنگی (EBBI) و دمای سطح زمین (LST) در شهر رشت برای سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴

مرطوب پراکنده مطابقت دارد و نشانگر افزایش توان تبیینی شاخص DBI برای تغییرات دمایی است. در سال ۲۰۱۶، رابطه بیش از پیش تقویت شده و دامنه دمای سطح زمین گسترش یافته است. در این مقطع، خوشه‌های داغ در مقادیر مثبت DBI که نشان‌دهنده بافت‌های مسکونی - تجاری پیوسته و بسترهای خاکی خشک شده هستند، برجسته‌تر شده‌اند؛ در حالی که سهم نقاط با DBI پایین کاهش یافته است. در سال ۲۰۲۴، شیب رابطه همچنان بالا و پراکندگی منظم‌تر است؛ تمرکز داده‌ها در محدوده DBI مثبت همراه با مقادیر بالای LST بیانگر آن است که پیوند میان سطوح خشک/ساخته شده و گرمایش سطحی به بلوغ کامل رسیده است. تعداد اندکی از نقاط با DBI و LST پایین همچنان وجود دارند که بیانگر تداوم هسته‌های مرطوب و سبز در بخش‌های جنوبی و غربی هستند، هرچند سهم نسبی آن‌ها نسبت به سال‌های پیشین کاهش یافته است. در مجموع، تحلیل چهار دوره نشان می‌دهد گسترش و تثبیت کالبدی شهر همراه با خشکی تدریجی سطح زمین، اصلی‌ترین محرک افزایش دمای سطح زمین و تشدید جزیره حرارتی شهری (UHI) در رشت طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ بوده است.

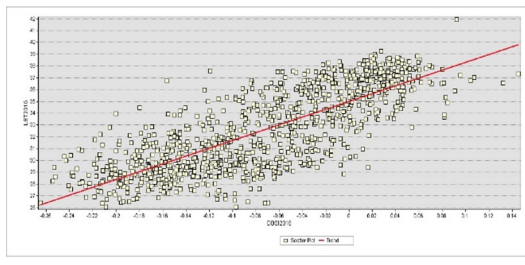
رابطه میان شاخص DBI و دمای سطح زمین (LST) تحلیل چهار نمودار پراکنش در شکل ۲۰ نشان می‌دهد رابطه میان شاخص ساخت‌وساز خشک (Dry Built-up Index) و دمای سطح زمین (LST) در تمامی دوره‌های زمانی مورد بررسی مثبت است؛ به این معنا که با افزایش DBI که از نظر مفهومی بیانگر کاهش رطوبت سطحی و پوشش گیاهی و افزایش سهم سطوح ساخته شده یا نفوذناپذیر است، دمای سطح زمین نیز افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۰۰، شیب رگرسیون مثبت اما نسبتاً ملایم است و داده‌ها پراکندگی قابل توجهی دارند. وجود مقادیر منفی یا نزدیک به صفر DBI (مرتبط با تالاب‌ها، شالیزارها و لکه‌های پوشش گیاهی) با مقادیر پایین‌تر LST مطابقت دارد و نقش خنک‌کنندگی نواحی مرطوب و سبز پیرامونی شهر را برجسته می‌سازد. این امر نشان می‌دهد در ابتدای دوره، پیوند میان خشکی سطح و گرمایش سطحی هنوز ضعیف و محدود بوده است. در سال ۲۰۰۸، شیب رابطه افزایش یافته و پراکندگی داده‌ها کاهش یافته است؛ تعداد نقاط با مقادیر پایین DBI کمتر و در مقابل، مقادیر متوسط تا مثبت DBI همراه با دماهای بالاتر بیشتر شده‌اند. این روند با افزایش پیوستگی بافت‌های ساخته شده در اطراف هسته مرکزی و کاهش لکه‌های



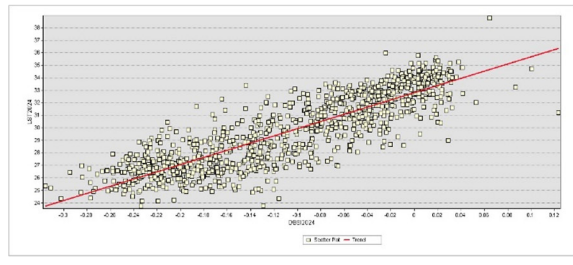
الف : ۲۰۰۰



ب : ۲۰۰۸



پ : ۲۰۱۶



ت : ۲۰۲۴

شکل ۲۰. روابط رگرسیونی میان شاخص ساخت‌وساز خشک (DBI) و دمای سطح زمین (LST) در شهر رشت برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴

به ۲/۶۷ در سال ۲۰۱۶ افزایش یافته و در سال ۲۰۲۴ به ۲/۴۷ کاهش یافته است؛ همچنین میانگین از ۰/۵۵ در سال ۲۰۰۰ به ۰/۷۱ در ۲۰۱۶ و حدود ۰/۷۲ در ۲۰۲۴ رسیده است. نقشه‌های سال ۲۰۲۴ نشان می‌دهند ساختار حرارتی شهر با الگوی کاربری زمین منطبق است: مرکز شهر با مقادیر حدود مثبت ۱/۸ تا مثبت ۲/۳ و بخش‌های شمالی با حدود مثبت ۱/۲ تا مثبت ۱/۸، گرم‌ترین نواحی هستند؛ در مقابل، شرق شهر گرمایی متوسط مثبت (۰/۸) تا مثبت (۱/۵) و جنوب و غرب خنک‌ترین شرایط از منفی ۰/۶ تا مثبت ۰/۳۳ را ثبت کرده‌اند. این یافته‌ها به طور کلی بیانگر رابطه مستقیم توسعه شهری، از بین رفتن اراضی سبز و مرطوب، و افزایش گرمایش سطحی در رشت طی دو دهه اخیر است.

#### ۴. بحث

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد افزایش سهم اراضی شهری از حدود ۴۱ درصد به حدود ۶۳ درصد، همراه با کاهش اراضی کشاورزی و باغی از حدود ۴۶ درصد به حدود ۲۱ درصد در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، الگوی گرمایش سطحی شهر رشت را به طور ملموسی دگرگون کرده است. بیشینه شدت گرمایش در سال ۲۰۱۶ مشاهده شده و پس از آن، در ۲۰۲۴ کاهش نسبی رخ داده است؛ با این حال، دمای زمینه‌ای (background temperature) در سطح شهر در مقیاس کلان تغییر محسوسی نشان نمی‌دهد و بیشتر نوسانات در قله‌های حرارتی و شدت نسبی جزیره گرمایی سطحی شهری (SUHI) بروز یافته است. طی کل دوره مطالعه، رابطه NDVI-LST در تمامی سال‌ها منفی و از نظر آماری معنادار باقی مانده است، اما شدت این همبستگی در زمان‌های مختلف دچار نوسان شده است. ضریب همبستگی از حدود منفی ۰/۷۵ در سال ۲۰۰۰ به منفی ۰/۸۰ در سال ۲۰۰۸ تقویت شده، در سال ۲۰۱۶ تا حدود منفی ۰/۶۵ تضعیف شده و در ۲۰۲۴ دوباره تا حدود منفی ۰/۷۸ بهبود یافته است. این الگو با تغییرات مشاهده شده در نقشه‌های NDVI و LULC هم‌خوان است: در سال ۲۰۰۸، توزیع پوشش گیاهی

نتایج نشان می‌دهد رابطه میان کاربری زمین / پوشش گیاهی و دمای سطح زمین (LST) در شهر رشت قابل اندازه‌گیری و از نظر آماری معنادار است. بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، سهم اراضی شهری از ۴۱ درصد به حدود ۶۳ درصد افزایش یافته است؛ در مقابل، اراضی کشاورزی و باغی از ۴۶ درصد به حدود ۲۱ درصد کاهش یافته‌اند. پوشش گیاهی طبیعی از ۹/۴ درصد در سال ۲۰۰۰ به ۲/۷ درصد در سال ۲۰۰۸ کاهش یافته، سپس در ۲۰۱۶ تا ۱۶/۷ درصد افزایش یافته و در ۲۰۲۴ به ۱۵/۲ درصد رسیده است. در همین بازه، اراضی برهنه که در سال ۲۰۰۰ حدود ۳/۸ درصد بودند، حذف شده‌اند. این تغییرات عمدتاً در نواحی جنوبی و شرقی شهر رخ داده و با از بین رفتن سطوح سبز و مرطوب دارای اثر خنک‌کنندگی (شامل شالیزارها، باغ‌ها، پوشش گیاهی طبیعی و اراضی مرطوب یا خاک‌های اشباع از آب) همراه بوده است. رابطه (NDVI-LST) در تمام سال‌ها منفی و معنادار باقی مانده است. حدود منفی ۰/۷۲ در سال ۲۰۰۰، منفی ۰/۸۵ در سال ۲۰۰۸، منفی ۰/۶۰ در سال ۲۰۱۶ و منفی ۰/۷۸ در سال ۲۰۲۴ و دامنه‌های NDVI نیز این الگو را تأیید می‌کنند؛ کاهش‌های موضعی NDVI در جنوب غرب شهر با دماهای بالاتر و افزایش نسبی آن در شرق شهر با کاهش گرما همراه بوده است. در مقابل، شاخص‌های مرتبط با سطوح ساخته‌شده رابطه‌ای مثبت و معنادار با LST نشان می‌دهند و این همبستگی در کل دوره پایدار مانده است. شاخص EBBI لکه‌های بسیار گرم شهری را از نواحی کشاورزی خنک‌تر تفکیک می‌کند و رفتار میان‌مناطق مختلط (mixed-use) را به خوبی کمی‌سازی می‌کند. در این میان، شاخص DBI (در بازه تقریبی منفی ۲ تا مثبت ۲) بیشترین انطباق را با تغییرات LST و شدت جزیره حرارتی شهری (UHI) دارد؛ در مدل چندمتغیره، ترکیب (NDVI) پایین همراه با NDBI و DBI بالا دقیقاً با شدیدترین لکه‌های حرارتی شهری مطابقت دارد. شاخص جزیره حرارتی شهری (UHI) که به صورت تفاوت دمای هر پیکسل با میانگین دمای پس‌زمینه روستایی تعریف شده است، از ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ روندی افزایشی و سپس تا ۲۰۲۴ تعدیل نسبی را نشان می‌دهد: مقدار بیشینه از حدود ۲/۲۳ در سال ۲۰۰۰

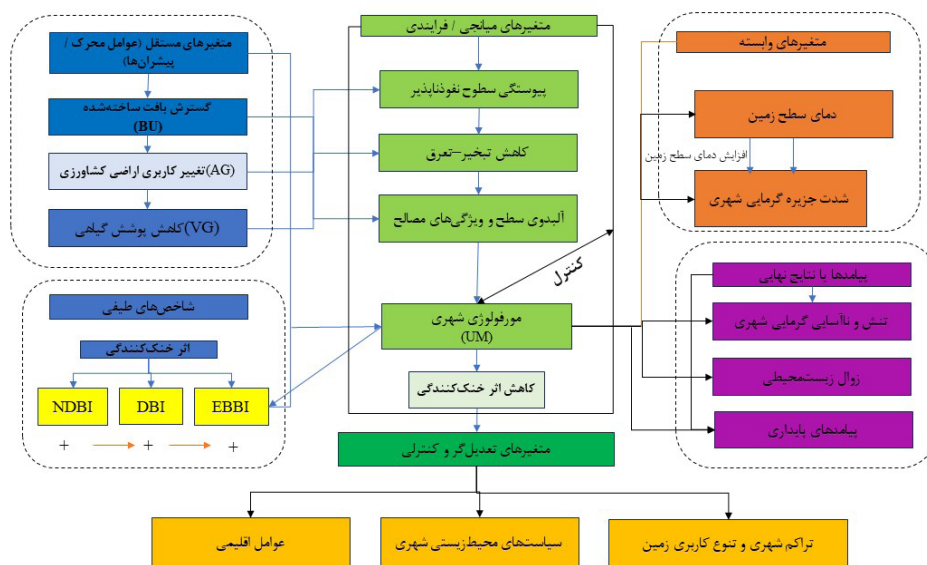
و کمربندهای کشاورزی - سبزی پیرامونی نسبت به ۲۰۰۰ پیوسته‌تر و گسترده‌تر بوده است، در حالی که در سال ۲۰۱۶ کاهش و گسستگی بیشتری در لکه‌های سبزی درون‌شهری و حاشیه‌ای مشاهده می‌شود. در سال ۲۰۲۴، هرچند سطح کلی پوشش گیاهی نسبت به ۲۰۰۰ پایین‌تر است، اما در برخی زیرحوضه‌ها و کمربندهای پیرامونی، بهبود نسبی NDVI و بازپدیداری لکه‌های مترکم‌تر پوشش سبزی دیده می‌شود که با تقویت نسبی همبستگی منفی NDVI-LST سازگار است. در این چارچوب، تغییرات همبستگی NDVI-LST فقط در پیوند با مقدار و پیکربندی فضایی پوشش گیاهی و الگوی گسترش شهر تفسیر شده و به مداخلات یا سیاست‌های مشخصی که داده مستقیمی از آن‌ها در این پژوهش در دسترس نبوده است، نسبت داده نمی‌شود. از نظر فضایی، الگوی حرارتی در چهار مقطع مورد بررسی نسبتاً پایدار است؛ به گونه‌ای که هسته مرکزی و محورهای شمال شرقی به عنوان داغ‌ترین نواحی و کمربندهای سبزی - مرطوب جنوبی و غربی به عنوان خنک‌ترین مناطق ظاهر می‌شوند. شاخص‌های طیفی این تفسیر را تقویت می‌کنند: الف) شاخص‌های NDBI و EBI با LST همبستگی مثبت دارند و نواحی با ترکیب غالب سطوح ساخته‌شده و خاک‌های برهنه، به‌ویژه در مناطق مختلط (mixed-use)، معمولاً در طبقات دمایی بالاتر یا میانی قرار می‌گیرند. با توجه به حضور مؤلفه حرارتی در تعریف EBI، همبستگی این شاخص با LST در این پژوهش به عنوان هم‌خوانی طیفی - فضایی تفسیر شده است، نه یک رابطه مستقل علی. ب) در مقابل، DBI بالاترین قدرت تفکیک خوشه‌های حرارتی را نشان می‌دهد و ترکیب مقادیر بالای DBI با مقادیر پایین NDVI، دقیقاً با مناطق دارای بیشترین شدت حرارتی هم‌پوشانی دارد. در مدل‌های چندمتغیره، هم‌زمانی NDVI با NDBI و DBI بالا به‌خوبی محدوده‌های داغ را مشخص می‌کند و نشان می‌دهد کاهش پوشش سبزی و افزایش پیوستگی سطوح نفوذناپذیر، محرک‌های اصلی تشدید SUHI در مقیاس درون‌شهری هستند. تعریف عملی جزیره حرارتی شهری (UHI) در این پژوهش به صورت اختلاف دمای هر پیکسل نسبت به میانگین پس‌زمینه پیرامونی، نشان می‌دهد شدت پدیده از ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ به صورت تدریجی افزایش یافته و در ۲۰۲۴ تعدیل نسبی پیدا کرده است. این الگو بیانگر آن است که افزایش پیوستگی و گسترش سطوح ساخته‌شده (به‌ویژه در هسته مرکزی و محورهای شرقی - شمال شرقی) و تضعیف شبکه‌های سبزی در دوره نخست، موجب تشدید SUHI شده و کاهش نسبی شدت در دوره اخیر بیشتر به کاهش دماهای حداکثری و تغییر توزیع موضعی لکه‌های داغ مربوط است تا تغییر مبنای حرارتی کل شهر. از منظر تنوع کاربری زمین و ساختار پوشش گیاهی، شواهد نشان می‌دهد در هر جا پیوستگی و کفایت پوشش سبزی - مرطوب حفظ یا بازسازی شده است، شدت SUHI کاهش یافته و تضاد دمایی میان هسته شهری و پیرامون آن تضعیف شده است. این یافته با مطالعات جهانی درباره نقش خنک‌کنندگی زیرساخت‌های سبزی و آبی (green-blue infrastructure) هم‌خوان است (Esposito et al., 2024; Yang et al., 2017) و نشان می‌دهد کمربندهای کشاورزی - تالابی جنوب و غرب رشت نقش مهمی در تعدیل پیک‌های حرارتی دارند. در مقایسه با شهرهایی در اقلیم‌ها و مقیاس‌های متفاوت، الگوی مشاهده‌شده در رشت قابل تبیین است: در وهله اول، گسترش پیوسته سطوح نفوذناپذیر و توسعه خطی در امتداد کریدورهای حمل‌ونقل با افزایش SUHI همراه بوده است؛ الگویی مشابه ساختار حلقوی -

محوری که از سال ۲۰۱۶ در رشت نیز شکل گرفته است (Tian et al., 2025). در تهران، کاهش پوشش گیاهی و تراکم بالای شهری باعث تقویت قله‌های حرارتی مرکزی و افزایش وابستگی فضایی SUHI به مراکز فعالیت شده است؛ نتیجه‌ای مشابه تمرکز گرمایی در هسته رشت (Zargari et al., 2024). در سمارانگ، روندهای بلندمدت شهرنشینی موجب تقویت SUHI و تأیید نقش خنک‌کنندگی کمربندهای سبزی پیرامونی شده‌اند؛ مشابه عملکرد کمربندهای کشاورزی-تالابی در جنوب و غرب شهر رشت (Sejati et al., 2019). شواهد بخارست نیز نشان می‌دهد دگرگونی کاربری زمین و مورفولوژی شهری تعیین‌کننده شدت و گستره SUHI است؛ مشابه گذار شهر رشت از الگوی تک‌مرکزی به ساختار حلقوی و نسبتاً چندمرکزی (Sejati et al., 2019). به طور کلی، این الگوها حاکی از آن‌اند که کاهش تبخیر - تعرق، ظرفیت بالای ذخیره حرارتی سطوح و تداوم سطوح با آلودگی پایین، مکانیسم‌های فیزیکی مشترک در شکل‌گیری گرمایش سطحی هستند؛ با این تفاوت که شرایط مرطوب و جلگه‌ای رشت، تضاد حرارتی میان بافت شهری و نواحی سبزی - مرطوب پیرامونی را برجسته‌تر می‌کند. تبیین علی یافته‌ها در این پژوهش بر سه مکانیسم اصلی استوار است: الف) پوشش گیاهی بار حرارتی سطح را کاهش می‌دهد؛ رابطه منفی پایدار NDVI-LST در سراسر دوره با فرایندهای تبخیر - تعرق و سایه‌اندازی مطابقت دارد و بازتابی از «اثر سبزی - آبی پارک» در اقلیم‌های گوناگون است (Yang et al., 2017) ب) پیوستگی سطوح ساخته‌شده، به‌ویژه در هسته‌های مترکم و محورهای ترافیکی، ذخیره گرما و شار محسوس (sensible heat fluxes) را افزایش می‌دهد؛ رابطه‌ای که در تحلیل‌های مورفولوژیک و شواهد تجربی در سایر شهرها نیز تأیید شده است. پ) شاخص‌های ترکیبی که هم‌زمان خشکی طیفی و سیگنال حرارتی را در نظر می‌گیرند. مانند: DBI و EBI در شناسایی لکه‌های حرارتی در محیط‌های مرطوب عملکرد بهتری نسبت به شاخص‌های صرفاً بازتابی نشان می‌دهند؛ هرچند در تفسیر همبستگی این شاخص‌ها با LST باید به حضور مؤلفه حرارتی مشترک توجه شود و نقش آن‌ها عمدتاً به عنوان شاخص‌های تفکیک فضایی سطوح نفوذناپذیر و خاک‌های برهنه در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، پویایی SUHI در رشت روندی افزایشی تا سال ۲۰۱۶ و سپس کاهش نسبی در ۲۰۲۴ را نشان می‌دهد؛ تغییری که با افزایش پیوستگی بافت‌های ساخته‌شده و تضعیف شبکه‌های سبزی در دوره نخست، و نیز ترکیب تغییرات LULC با نوسانات شرایط اقلیمی در دوره اخیر قابل تبیین است. با این حال، نتایج نشان می‌دهد این تغییرات هنوز برای تغییر مبنای حرارتی شهر کافی نبوده و زمینه حرارتی کلی شهر همچنان تحت سلطه گسترش سطوح نفوذناپذیر باقی مانده است (Esposito et al., 2024; Sobrino & Irakulis, 2020). از منظر علمی و کاربردی، این پژوهش سه مشارکت اصلی دارد که شامل: از منظر علمی و کاربردی، این مطالعه سه مشارکت اصلی برای ادبیات جزیره حرارتی شهری در شهرهای مرطوب جلگه‌ای ارائه می‌کند. الف) چارچوبی داده‌محور مبتنی بر RS-GIS چندزمانه برای شهر رشت به کار گرفته شده است که در آن شاخص‌های NDVI، NDBI، DBI، EBI در کنار نقشه‌های LULC و دمای سطح زمین (LST) در بازه بلندمدت ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ به صورت یکپارچه تحلیل می‌شوند. این رویکرد اگرچه از نظر روش‌شناختی بر تکنیک‌های شناخته‌شده استوار است، اما با تمرکز بر یک شهر مرطوب جلگه‌ای و پوشش زمانی ممتد، شکاف پژوهشی موجود در

شناسایی کرده‌اند و ترکیب شاخص‌های مواجهه، آسیب‌پذیری و ظرفیت‌سازی، چارچوبی کارآمد برای اولویت‌بندی سیاست‌های کاهش خطر فراهم کرده است (Sarker & Adnan, 2024). بهره‌گیری از رویکردهای مشابه در رشت می‌تواند اقدامات کاهش گرما (مانند حفاظت از کمربندهای سبز و استفاده از مصالح بازتابنده) را با راهبردهای تاب‌آوری چندخطه - از جمله مدیریت رواناب و کنترل کاربری زمین - هم‌راستا سازد و به شکل‌گیری سیاست شهری تطبیقی و مقاوم‌تر کمک کند؛ هرچند ارزیابی تجربی این ابعاد فراتر از دامنه مطالعه حاضر است. مدل مفهومی پویایی جزیره حرارتی شهری در رشت بر اساس متغیرهای زیر تبیین می‌شود: متغیرهای مستقل شامل گسترش ساخت‌وساز شهری (BU)، تبدیل اراضی کشاورزی (AG) و کاهش پوشش گیاهی (VG)؛ متغیرهای میانجی شامل افزایش پیوستگی سطوح نفوذناپذیر (IC)، کاهش تبخیر-تعرق (ETR) و تغییر در آلودگی و ویژگی‌های مصالح سطحی (ALB)؛ این عوامل در تعامل با مورفولوژی شهری (UM)، موجب تضعیف اثر خنک‌کنندگی پوشش سبز و تشدید ذخیره حرارتی می‌شوند. در نهایت، این فرایندها منجر به افزایش دمای سطح زمین (LST) و تقویت شدت جزیره حرارتی شهری (UHI) می‌گردند. پیامد نهایی این پویایی شامل افزایش تنش حرارتی شهری، کاهش کیفیت زیست‌محیطی و فشار بر پایداری شهری است. کل این سامانه تحت تأثیر عوامل تعدیل‌گر مانند ویژگی‌های اقلیمی، سیاست‌های زیست‌محیطی شهری و تراکم و تنوع کاربری زمین قرار دارد. شاخص‌های طیفی نظیر NDVI، NDBI، DBI و EBBI نیز در این چارچوب، ابزارهای کلیدی برای پایش کمی تغییرات سطحی و اثرات خنک‌کنندگی یا گرم‌کنندگی در سامانه شهری محسوب می‌شوند. مدل مفهومی این پویایی‌ها در شکل ۲۱ نمایش داده شده است.

خصوص پویایی SUHI در چنین محیط‌هایی را در مقیاس محلی پر می‌کند. ب) این پژوهش با مستندسازی الگوی پایدار تمرکز لکه‌های داغ حرارتی بر هسته ساخته‌شده و محورهای شرقی-شمال شرقی شهر، و نیز نمایش هم‌پوشانی فضایی قوی میان پیوستگی سطوح نفوذناپذیر، کاهش NDVI و افزایش SUHI، شواهدی منسجم از پیوند میان گسترش بافت‌های فشرده شهری و تشدید گرمایش سطحی ارائه می‌دهد. این روابط در سطح هم‌بستگی آماری و هم‌مکانی فضایی تبیین شده‌اند و نه به عنوان علیت قطعی؛ بلکه به‌عنوان الگوهای سازگار که می‌توانند مبنای تحلیل‌های علی دقیق‌تر در پژوهش‌های آینده قرار گیرند. پ)، بر پایه الگوهای فضایی - زمانی به‌دست‌آمده، مجموعه‌ای از پیامدهای سیاستی برای مدیریت SUHI در رشت استخراج شده است؛ از جمله ضرورت حفاظت از کمربندهای سبز و کشاورزی جنوبی و غربی، تقویت کریدورهای سبز پیوسته درون‌شهری و ارتقای آلودگی و نفوذپذیری سطوح در بافت‌های متراکم. این پیشنهادها به‌عنوان ترجمه محلی شواهد جهانی به بافت اقلیمی و مورفولوژیک رشت صورت‌بندی شده‌اند و ادعای ارائه راهکارهای کاملاً جدید در ادبیات بین‌المللی ندارند، بلکه به دنبال انطباق اصول شناخته‌شده سازگاری حرارتی با شرایط خاص یک شهر مرطوب جلگه‌ای هستند (Esposito et al., 2024). این روایت فضایی - زمانی، شکاف پژوهشی موجود درباره شهرهای مرطوب جلگه‌ای ایران را پوشش می‌دهد و نشان می‌دهد حفظ کمربندهای خنک‌کننده پیرامونی در این شهرها می‌تواند اثر تعدیل حرارتی قوی‌تری نسبت به شهرهای خشک داشته باشد؛ نکته‌ای که برای تدوین سیاست‌های محلی در رشت اهمیت دار. همچنین، مطالعه (Sarker et al. 2023) اهمیت ارزیابی یکپارچه چندخطه را در برنامه‌ریزی سازگاری اقلیمی نشان می‌دهد. آن‌ها با استفاده از مدل GIS مبتنی بر Fuzzy-AHP، بیش از نیمی از نواحی ساحلی بنگلادش را دارای خطر هم‌زمان (توفان، سیلاب و ...)

### مدل مفهومی پویایی جزیره گرمایی شهری در شهر رشت، ایران



شکل ۲۱. مدل مفهومی پویایی جزیره حرارتی شهری (UHI) در شهر رشت

## ۵. نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد گسترش و پیوستگی سطوح نفوذناپذیر در شهر رشت به‌ویژه در هسته مرکزی و در امتداد کریدور شرقی - شمال شرقی/شرقی - جنوب شرقی با تشدید جزیره گرمایی سطحی شهری (SUHI) هم‌زمان بوده است، در حالی که گسستگی تدریجی کریدورهای سبز درون‌شهری و کمربندهای کشاورزی پیرامونی، ظرفیت خنک‌کنندگی آن‌ها را تضعیف کرده است. نتایج مدل‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) در تحلیل‌های فضایی نشان می‌دهند شاخص‌های محیطی مانند NDVI و NDBI تأثیرات زیادی بر LST دارند. کاهش NDVI در مناطق شهری، با افزایش LST و تشدید جزیره حرارتی همراه است، در حالی که افزایش NDBI و DBI باعث افزایش دمای سطح زمین در نواحی شهری می‌شود. این تغییرات به وضوح نشان‌دهنده تأثیر توسعه شهری بر گرمایش سطحی است. در چهار مقطع زمانی مورد بررسی (۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴)، میانگین و دامنه دمای سطح زمین (LST) نوسان داشته است؛ به‌گونه‌ای که پس از کاهش موقت در سال ۲۰۰۸، در سال ۲۰۱۶ به اوج رسیده و در ۲۰۲۴ تعدیل نسبی را تجربه کرده است. با این حال، کانون‌های حرارتی مرکزی و محورهای اصلی توسعه در تمام سال‌ها پایدار باقی مانده‌اند و الگوی فضایی SUHI تغییرات خود را بیشتر در شدت و گستره نشان داده تا در مکان. در طول دوره مطالعه، رابطه NDVI با LST در همه سال‌ها منفی و از نظر آماری معنادار بوده است، در حالی که شاخص‌های NDBI و DBI و تا حدی EBBI همبستگی مثبت با دمای سطحی داشته‌اند. این الگو نشان می‌دهد کاهش سبزینگی و افزایش پیوستگی سطوح ساخته‌شده، با افزایش LST و تقویت SUHI همراه است؛ هرچند این روابط در سطح همبستگی و هم‌مکانی فضایی تفسیر شده و نه به عنوان علیت قطعی. از منظر مورفولوژیک، ساختار حرارتی رشت از یک الگوی تک‌مرکزی متراکم به الگویی با حلقه میانی گرم و نشانه‌هایی از چندمرکزی شدن تغییر یافته است که با فشردگی کالبدی و گسترش حلقوی بافت‌های ساخته‌شده هم‌خوان است. در نواحی دارای کاربری متوازن تر و پوشش سبز-مرطوب کافی، شدت SUHI به طور معناداری پایین تر است و تضاد دمایی مرکز - پیرامون تضعیف می‌شود. این نتایج از یک سو با ادبیات جهانی درباره نقش خنک‌کنندگی زیرساخت‌های سبز و آبی و اثر گرم‌زای سطوح نفوذناپذیر هم‌خوان است (Esposito et al., 2024; Yang et al., 2024; Tian et al., 2025) و از سوی دیگر نشان می‌دهد در شهر مرطوب جلگه‌ای مانند رشت، کمربندهای کشاورزی - تالابی جنوبی و غربی نقش سپر حرارتی (thermal buffer) را ایفا می‌کنند و حفظ پیوستگی آن‌ها برای تعدیل تضاد حرارتی میان هسته شهری و پیرامون سبز-مرطوب حیاتی است. بر این اساس، پیامدهای سیاستی پژوهش را می‌توان در سه محور خلاصه کرد: الف) حفاظت و بازپیوند کمربندهای سبز-کشاورزی پیرامونی و اتصال آن‌ها به لکه‌های سبز درون‌شهری به‌منظور تقویت شبکه پیوسته سبز-مرطوب؛ ب) مداخله هدفمند در هسته مرکزی و محورهای شرقی - شمال شرقی/شرقی-جنوب شرقی از طریق افزایش سایه‌بان درختی خیابانی، توسعه پارک‌های خطی، با‌ها و نماهای سبز و استفاده از مصالح با آلودگی بالا و نفوذپذیر در کف‌سازی‌ها و پوسته‌های ساختمانی برای کاهش ذخیره حرارت روز و گرمایش شبانه؛ پ)

استقرار نظام پایش دوره‌ای شاخص‌های NDVI، NDBI، LST در نواحی بحرانی، به منظور ارزیابی تطبیقی اثر سیاست‌ها و به‌روزرسانی مستمر ابزارهای برنامه‌ریزی. در کنار این مداخلات کالبدی، شواهد شهرهای آسیب‌پذیر نسبت به گرما (Shahrujman et al., 2025) بر ضرورت ادغام ملاحظات اجتماعی تأکید می‌کند؛ در رشت نیز گروه‌های کم‌درآمد و شاغلان غیررسمی بیشترین مواجهه با گرمای شدید را در نواحی دارای (LST) بالا دارند، بنابراین سامانه‌های هشدار زودهنگام گرما، طراحی مسکن فراگیر و دسترسی به فضاهای سرمايش عمومی باید هم‌زمان با مداخلات فضایی مورد توجه قرار گیرند تا تاب‌آوری حرارتی عادلانه تحقق یابد. از منظر روش‌شناختی و کاربردی، این مطالعه سه مشارکت اصلی برای ادبیات SUHI در شهرهای مرطوب جلگه‌ای ارائه می‌کند. نخست، یک چارچوب داده‌محور RS-GIS چندزمانه برای رشت به کار گرفته شده است که شاخص‌های NDVI، NDBI، EBBI، DBI را در کنار نقشه‌های LULC و LST در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ به‌صورت یکپارچه تحلیل می‌کند. این رویکرد، هرچند بر روش‌های شناخته‌شده تکیه دارد، شکاف مکانی-اقلیمی موجود درباره پویایی SUHI در شهرهای مرطوب جلگه‌ای ایران را در مقیاس محلی پوشش می‌دهد. دوم، الگوی پایدار تمرکز لکه‌های داغ بر هسته ساخته‌شده و محورهای شرقی شهر و هم‌پوشانی قوی آن‌ها با پیوستگی سطوح نفوذناپذیر و کاهش NDVI مستندسازی شده است؛ الگویی که شواهد سازگاری از پیوند میان گسترش بافت‌های فشرده شهری و تشدید گرمایش سطحی فراهم می‌کند و می‌تواند مبنای تحلیل‌های علی دقیق‌تر در پژوهش‌های آینده قرار گیرد. سوم، بر اساس این الگوهای فضایی-زمانی، مجموعه‌ای از پیشنهادها سیاستی برای مدیریت SUHI در رشت ارائه شده است که اصول شناخته‌شده کاهش گرما (حفاظت کمربندهای سبز، افزایش آلودگی، بهبود نفوذپذیری سطوح) را با شرایط خاص مورفولوژیک و اقلیمی شهر انطباق می‌دهد. در عین حال، این پژوهش با دو محدودیت مهم مواجه است: نخست، اتکا به تصاویر ماهواره‌ای تابستانی که به دلیل پوشش ابری در سایر فصول، تعمیم نتایج به مقیاس سالانه و فصلی را محدود می‌کند؛ دوم، اتکا به شاخص‌های طیفی و دمای سطحی که جایگزین اندازه‌گیری‌های میدانی دما، رطوبت و ویژگی‌های حرارتی مصالح نمی‌شوند. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بازپیکربندی الگوهای فضایی - از طریق کاهش پیوستگی سطوح نفوذناپذیر و بازسازی شبکه پیوسته سبز-مرطوب - همراه با ادغام ملاحظات اجتماعی و چندخطره در سیاست‌گذاری شهری، مسیر واقع‌بینانه‌ای برای کاهش دماهای حداکثری سطح، تعدیل مبنای حرارتی و تقویت تاب‌آوری حرارتی پایدار در شهر رشت فراهم می‌کند. از این رو پژوهش‌های آتی باید شامل اعتبارسنجی میدانی با شبکه‌های سنجش دما و رطوبت، تحلیل ترکیب و ساختار پوشش گیاهی، رطوبت خاک و خواص تابشی-حرارتی مصالح در نواحی پرتراکم، و به‌کارگیری مدل‌های یادگیری ماشینی فضایی-زمانی برای پیش‌بینی رشد شهری و ارزیابی سناریوهای سیاستی باشد. همچنین، بهره‌گیری از چارچوب‌های ارزیابی چندخطره مانند مدل‌های Fuzzy-AHP می‌تواند امکان هم‌راستاسازی کاهش SUHI با مدیریت ریسک‌های هم‌زمان (سیلاب، رواناب، تغییر کاربری) را فراهم آورد (Sarker & Adnan, 2024).

## مشارکت نویسندگان

نویسنده اول و نویسنده دوم سهم برابری را در نگارش این مقاله داشته اند.

## تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از پایان نامه کارشناسی ارشد با عنوان «بررسی تأثیر تنوع کاربری اراضی و ساختار پوشش گیاهی بر شدت جزایر گرمایی در محدوده شهری رشت» است که توسط «شهرداری رضایی» در گروه شهرسازی، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه گیلان و با راهنمایی «دکتر علی اکبر سالاری پور» انجام شده است. مقاله حامی مادی و معنوی ندارد.

## تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

## منابع

- (2019). Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings. *Energy*, Volume 174, Pages 407-419. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.183>
- P. Rao, P., Tassinari, P., & Torreggiani, D. (2023). Exploring the land-use urban heat island nexus under climate change conditions using a machine learning approach: A spatio-temporal analysis of remotely sensed data. *Heliyon*, 9(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18423>
- Ramsay, Emma E., Grant A. Duffy, Kerrie Burge, Ruzka R. Taruc, Genie M. Fleming, Peter A. Faber, Steven L. Chown (2023). Spatio-temporal development of the urban heat island in a socioeconomically diverse tropical city. *Environmental Pollution*, Volume 316, Part 1, 120443. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120443>
- Rundong Feng, Fuyuan Wang, Kaiyong Wang, Hongjie Wang, Li Li (2021). Urban ecological land and natural-anthropogenic environment interactively drive surface urban heat island: An urban agglomeration-level study in China. *Environment International*, Volume 157, 106857. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106857>
- Sarker, Sajib, Mohammed Sarfaraz Gani Adnan (2024). Evaluating multi-hazard risk associated with tropical cyclones using the fuzzy analytic hierarchy process model. *Natural Hazards Research*, Volume 4, Issue 1, Pages 97-109. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.11.007>
- Sejati, Anang Wahyu, Imam Buchori, Iwan Rudiarto (2019). The spatio-temporal trends of urban growth and surface urban heat islands over two decades in the Semarang Metropolitan Region. *Sustainable Cities and Society*, Volume 46, 101432. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101432>
- Shahfahad, Talukdar, S., Rihan, M. et al. (2022). Modelling urban heat island (UHI) and thermal field variation and their relationship with land use indices over Delhi and Mumbai metro cities. *Environ Dev Sustain*, 24, 3762–3790. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01587-7>
- Sharma, A., Vashishtha, D. (2023). Spatio-temporal Assessment of Land Use Land Cover Changes and Their Impact on Variations of Land Surface Temperature in Aligarh Municipality. *J. Indian Soc. Remote Sens.*, 51, 799–827. <https://doi.org/10.1007/s12524-022-01652-2>
- Sharmin, Tania, Adrian Chappell (2025). Detecting the changing impact of urbanization on urban heat islands in a tropical megacity using local climate zones. *Energy and Built Environment*, ISSN 2666-1233. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2025.02.002>
- Sheikh Mohiuddin Shahrujman, Bivuti Bhushan Sikder, Dilara Zahid, Bikash Pal (2025). Heat wave adaptation strategies among informal workers in an urban setting: A study in Dhaka City, Bangladesh. *Natural Hazards Research*, Volume 5, Issue 3, Pages 509-522. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2025.01.006>
- Siswanto, Siswanto, Danang Eko Nuryanto, Muhammad Rezza Ferdiansyah, Ova Candra Dewi, Ahmad Gamal, Muhammad Dimiyati (2023). Spatio-temporal characteristics of the urban heat Island of Jakarta metropolitan. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, Volume 32, 101062. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101062>
- Sobrino, J. A., & Irakulis, I. (2020). A methodology for comparing the surface urban heat island in selected urban agglomerations around the world from Sentinel-3 SLSTR data. *Remote Sensing*, 12(12), 2052. <https://doi.org/10.3390/rs12122052>
- Tanoori, Ghazaleh, Ali Soltani, Atoosa Modiri (2024). Machine Learning for Urban Heat Island (UHI) Analysis: Predicting Land Surface Temperature (LST) in Urban Environments. *Urban Climate*, Volume 55, 101962. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101962>
- Tan, J.K.N., R.N. Belcher, H.T.W. Tan, S. Menz, T. Schroepfer (2021). The urban heat island mitigation potential of vegetation depends on
- Alhazmi, Mansour, David J. Sailor, Jyothis Anand (2022). A new perspective for understanding actual anthropogenic heat emissions from buildings. *Energy and Buildings*, Volume 258, 111860. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111860>
- Benayad, Mohamed, Mohamed Rabii Simou, Abdelilah Rochd, Nou-riddine Houran, Mehdi Maanan, Hassan Rhinane (2025). Using Deep Learning to create an Enhanced Basemap from RGB Satellite Images for Urban Planning. *Natural Hazards Research*, ISSN 2666-5921. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2025.09.006>
- Eposito, A., Pappacogli, G., Donateo, A., Salizzoni, P., Maffei, G., Semeraro, T., ... & Buccolieri, R. (2024). Urban morphology and surface urban heat island relationship during heat waves: A study of Milan and Lecce (Italy). *Remote Sensing*, 16(23), 4496. <https://doi.org/10.3390/rs16234496>
- Feng, Rundong, Fuyuan Wang, Kaiyong Wang, Hongjie Wang, Li Li (2021). Urban ecological land and natural-anthropogenic environment interactively drive surface urban heat island: An urban agglomeration-level study in China. *Environment International*, Volume 157, 106857. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106857>
- Gazi, M.Y., Rahman, M.Z., Uddin, M.M. et al. (2021). Spatio-temporal dynamic land cover changes and their impacts on the urban thermal environment in the Chittagong metropolitan area, Bangladesh. *GeoJournal*, 86, 2119–2134. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10178-6>
- Jang, Seonju, Jinhyun Bae, YouJoung Kim (2024). Street-level urban heat island mitigation: Assessing the cooling effect of green infrastructure using urban IoT sensor big data. *Sustainable Cities and Society*, Volume 100, 105007. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105007>
- Karimi, Bashir Ahmad, Mohammad Aslam Haziq, Athiullah Hayat (2025). Specific impacts of climate change on the hydrological patterns and land use dynamics in the Arghandab River Basin, Kandahar, Afghanistan. *Natural Hazards Research*, Volume 5, Issue 2, Pages 380-390. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.12.007>
- Koko, A. F., Yue, W., Abubakar, G. A., Alabsi, A. A. N., & Hamed, R. (2021). Spatiotemporal Influence of Land Use/Land Cover Change Dynamics on Surface Urban Heat Island: A Case Study of Abuja Metropolis, Nigeria. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5), 272. <https://doi.org/10.3390/ijgi10050272>
- Li, Xiaoma, Yuyu Zhou, Sha Yu, Gensuo Jia, Huidong Li, Wenliang Li

- the local surface type and the amount of shade it receives. *Urban Forestry & Urban Greening*, Volume 62, 127128. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127128>
- Tang, J., Di, L., Xiao, J., Lu, D., & Zhou, Y. (2017). Impacts of Land Use and Socioeconomic Patterns on Urban Heat Islands. *International Journal of Remote Sensing*, 38(11), 3445–3465. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1295485>
- Tian, J., Chen, Y., Yang, L., Li, D., Liu, L., Li, J., & Tang, X. (2025). Enhancing Urban Flood Susceptibility Assessment by Capturing the Features of the Urban Environment. *Remote Sensing*, 17(8), 1347. <https://doi.org/10.3390/rs17081347>
- Wang, Aijia, Chen Ren, Junqi Wang, Zhuangbo Feng, Prashant Kumar, Fariborz Haghighat, Shi-Jie Cao (2024). Health assessment and mitigation solutions to heat pollution induced by urban traffic. *Journal of Cleaner Production*, Volume 434, 140097. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140097>
- Wang, C., Myint, S. W., Wang, Z., & Song, J. (2016). Spatio-Temporal Modeling of the Urban Heat Island in the Phoenix Metropolitan Area: Land Use Change Implications. *Remote Sensing*, 8(3), 185. <https://doi.org/10.3390/rs8030185>
- Wei, Yufei, Rémi Lemoy, Geoffrey Caruso (2024). The effect of population size on urban heat island and NO<sub>2</sub> air pollution: Review and meta-analysis. *City and Environment Interactions*, Volume 24, 100161. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2024.100161>
- Xiang, Xiaoyang, Zhihong Zhai, Chengliang Fan, Yunfei Ding, Lifei Ye, Jiangbo Li (2024). Modelling future land use and land cover changes and their impacts on urban heat island intensity in Guangzhou, China. *Journal of Environmental Management*, Volume 366, 121787. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121787>
- Yang, C., He, X., Yan, F., Yu, L., Bu, K., Yang, J., Chang, L., & Zhang, S. (2017). Mapping the Influence of Land Use/Land Cover Changes on the Urban Heat Island Effect—A Case Study of Changchun, China. *Sustainability*, 9(2), 312. <https://doi.org/10.3390/su9020312>
- Yao, Y., Chang, C., Ndayisaba, F., & Wang, S. (2020). A new approach for surface urban heat island monitoring based on a machine learning algorithm and a spatiotemporal fusion model. *IEEE Access*, 8, 164268-164281. [doi: [10.1109/ACCESS.2020.3022047](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3022047)]
- Zafar, Z., Zha, Y., Fahd, S. et al. (2024). The interplay between urbanization, vegetation loss, and surface heat islands in cities: Two decadal empirical evidences from Pakistan. *Theor. Appl. Climatol.*, 155, 9911–9928. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05214-z>
- Zargari, M., Mofidi, A., Entezari, A. et al. (2024). Climatic comparison of surface urban heat island using satellite remote sensing in Tehran and its suburbs. *Sci Rep*, 14, 643. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50757-2>

