



فصلنامه علوم محیطی، دوره بیست و یکم، شماره ۳، پائیز ۱۴۰۲

۸۹-۱۱۲

مقاله پژوهشی

تجزیه و تحلیل آماری و پیش‌بینی تغییرات زمانی - مکانی جزایر حرارتی شهری با استفاده از داده‌های سنجش از دور

کیوان عزی مند، حسین عقیقی*^{id}، داود عاشورلو و علیرضا شکیبا

گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، مرکز سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۶

عزی‌مند، ک، ح. عقیقی، د. عاشورلو و ع. شکیبا. ۱۴۰۲. تجزیه و تحلیل آماری و پیش‌بینی تغییرات زمانی - مکانی جزایر حرارتی شهری با استفاده از داده‌های سنجش از دور. فصلنامه علوم محیطی. ۱۱۲-۸۹: (۳)۲۱.

سابقه و هدف: جزیره گرمایی شهری به‌عنوان یکی از اثرات توسعه شهرنشینی می‌تواند بر روی گیاهان و جانوران درگیر در اکوسیستم شهری و حومه‌ای، غلظت آلاینده‌ها، کیفیت هوا، مصرف انرژی و آب و همچنین سلامت و اقتصاد انسان تأثیر منفی بگذارد. بنابراین، تجزیه و تحلیل مکانی-زمانی تغییرات جزیره گرمایی شهری به‌عنوان رویکردی موثر برای درک تأثیر شهرنشینی بر اکوسیستم شهری و حومه‌ای در نظر گرفته شده است که می‌تواند از توسعه و برنامه‌ریزی شهری پایدار نیز حمایت کند. بر این اساس، این مطالعه یک رویکرد جدید برای شناسایی روند و پیش‌بینی الگوی تغییرات جزایر حرارتی شهری با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری، آنتروپی شانون و آمار کای اسکور ارائه می‌کند.

مواد و روش‌ها: منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شامل شهر رشت و اطراف آن است که در شمال کشور ایران واقع است. این مطالعه با استفاده از تصاویر سنجش از دور از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۱ که توسط ماهواره لندست ۵ و ۸ با فاصله زمانی ثابت ۱۰ سال جمع‌آوری شده است، اجرا شد. تمامی تصاویر مربوط به فصل تابستان است. برای انجام این مطالعه ابتدا پیش‌پردازش‌های مورد نیاز همچون تصحیحات اتمسفری و رادیومتریکی بر روی تصاویر اعمال شده است سپس در گام دوم شاخص‌های بیوفیزیکی سطح منطقه از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شده است. در گام سوم دمای سطح زمین نیز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در سال ۲۰۲۱ محاسبه شد. در گام چهارم، رگرسیون خطی چند متغیره خصوصیات بیوفیزیکی سطح و دمای سطح زمین در سال ۲۰۲۱ اعمال شد و سپس از مدل سلول‌های خودکار - زنجیره مارکوف برای پیش‌بینی دمای سطح زمین برای سال ۲۰۳۱ استفاده شد. در نهایت الگوی تغییرات جزایر حرارتی شهر رشت با استفاده از تحلیل‌های آماری در جهات جغرافیایی مختلف و دوره‌های زمانی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت.

* Corresponding Author: *Email Address*. h_aghghi@sbu.ac.ir

<http://dx.doi.org/10.48308/envs.2023.1254>

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.17351324.1402.21.3.4.4>



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

نتایج و بحث: نتایج این مطالعه نشان داد که بیشترین همبستگی مثبت ($R=0.89$) بین شاخص NDBI و دمای سطح زمین بوده است. همچنین بیشترین همبستگی منفی ($R = -0.81$) بین شاخص سبزی‌نگی و دمای سطح زمین و در نهایت کمترین همبستگی ($R = 0.42$) بین شاخص درخشندگی با دمای سطح زمین بود. پیش‌بینی دمای سطح زمین با استفاده از مدل رگرسیون چند متغیره و شاخص‌های بیوفیزیکی سطح حاکی از خطای پایین این مدل ($RMSE=1.33K$) برای پیش‌بینی دمای سطح زمین در سال ۲۰۲۱ است. این بدان معناست که مقادیر پیش‌بینی شده در سال ۲۰۲۱ به مقادیر واقعی نزدیک است و بنابراین می‌توان به این مدل برای پیش‌بینی دمای سطح زمین در سال ۲۰۳۱ اعتماد کرد. تجزیه و تحلیل آماری درباره الگوی تغییرات جزایر حرارتی مشاهده شده و مورد انتظار نشان می‌دهد که میزان نرخ تغییرات برحسب زمان و مکان متفاوت بوده است و همچنین به صورت پیوسته از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۳۱ رو به افزایش است. علاوه بر این این تجزیه و تحلیل‌ها همچنین نشان داد که جزایر حرارتی شهر رشت از درجه آزادی بالا و درجه پراکندگی بالایی برخوردار است. بنابراین درجه خوب بودن آن منفی است.

نتیجه‌گیری: الگوی تغییرات جزایر حرارتی از گذشته تا به زمان حال و پیش‌بینی آن در آینده نشان می‌دهد که وابستگی بالایی با الگوی تغییرات اراضی ساخته شده دارد. در نتیجه با نظارت و کنترل مستقیم الگوی اراضی ساخته شده (همچون توسعه عمودی از طریق بام و دیوارهای سبز و مصالح ساختمانی با توان بازتابی بالا) و جلوگیری از ساخت و سازها در زمین‌های کشاورزی حاشیه شهر الگوی تغییرات جزایر حرارتی را کنترل نمود.

واژه‌های کلیدی: داده‌های سنجش‌ازدور، سلول‌های خودکار - مارکوف، تحلیل‌های آماری، جزایر حرارتی شهری.

مقدمه

۲۰۰۰ به ۲۳۹ هزار کیلومتر مربع (Kuang et al., 2021)، در سال ۲۰۱۴ به حدود ۴۰۰ هزار کیلومتر مربع (Jaeger and Schwick, 2014) و در سال ۲۰۲۰ به حدود ۵۲۰ هزار کیلومتر مربع رسیده است (Kuang et al., 2021). طبق این نرخ گسترش اراضی ساخته شده شهری، پیش‌بینی می‌شود که مقدار آن تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۱ میلیون و ۲۰۰ هزار کیلومتر مربع افزایش یابد (Seto et al., 2012). روند سریع شهرنشینی همچنین باعث تغییرات کاربری و پوشش زمین (Zhou and Chen, 2018; Liu et al., 2019; Patra et al., 2018; Liu et al., 2020)، تخریب و اثرات منفی بر محیط زیست (Zhou et al., 2017) و مهم‌ترین اثر آن افزایش دمای سطح شهر یا بروز پدیده جزیره حرارتی (Ezimand et al., 2021b; Bek et al., 2018; Kohler et al., 2017; Ezimand et al., 2018) است.

جزیره حرارتی شهری^۱ پدیده‌ای است که به‌موجب آن محیط‌های شهری دمای بالاتری از محیط‌های روستایی اطراف خود دارند (Liu and Zhang, 2011). در سال ۱۸۳۳، لوک هاوارد برای اولین بار مفهوم جزیره گرمایی

جهان به سرعت به سمت شهرنشینی پیش می‌رود (Wang and Upreti, 2019; Echendu and Okafor, 2021)؛ طبق نظر سازمان ملل متحد، در سال ۲۰۱۵ حدود ۵۴ درصد جمعیت جهان در شهرها زندگی می‌کرده‌اند و در سال ۲۰۲۰ این مقدار به بیش از ۵۶ درصد رسیده است و پیش‌بینی می‌شود که این مقدار در سال ۲۰۵۰ به حدود ۷۰ درصد جمعیت خواهد رسید (UN, 2018; Habitat, 2020). از این مقدار جمعیت، حدود ۶۴ درصد از جمعیت کشورهای درحال توسعه و ۸۶ درصد از جمعیت کشورهای توسعه‌یافته، در سال ۲۰۵۰ شهرنشین خواهند بود (Zhou and Chen, 2018; Yuan, 2020). از جمله مشکلاتی که در نتیجه شهرنشینی سریع به وجود می‌آید می‌توان به افزایش اراضی ساخته‌شده شهری اشاره کرد که جایگزین مناظر طبیعی شده‌اند (Shen et al., 2016; Goldblatt et al., 2018). مطالعات نشان می‌دهد در پی تغییرات جهانی پوشش‌های سطح زمین، اراضی ساخته شده شهری از سال ۱۹۸۵ بطور میانگین ۹۶۸۷ کیلومتر مربع در سال افزایش داشته (Liu et al., 2020) و در سال

عوارض پیچیده شهری و استخراج جزایر حرارتی شهری استفاده کرد (Kloog *et al.*, 2012; Chakraborty *et al.*, 2015; Alexander, 2020) این گروه از روش‌ها نسبت به روش‌های سنتی که بر مبنای استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی است ارجحیت دارد زیرا این ایستگاه‌ها معمولاً به صورت پراکنده و نقطه‌ای در شهرها و حومه شهرها قرار داشته و لذا به خاطر پیچیدگی‌های محیط شهری، این ایستگاه‌ها نمی‌تواند معرف خوب و دقیقی برای درجه حرارت محیط شهری و تغییرات مکانی آن باشند (Ezimand *et al.*, 2021a).

تحقیقات انجام شده در زمینه افزایش دمای سطح زمین^۲ و رشد جزایر حرارتی شهری در بازه‌های زمانی مختلف متعدد بوده است. همچنین در مطالعات متفاوتی رابطه بین دمای سطح زمین را با کاربری و پوشش زمین (Amiri *et al.*, 2009; Grigoraş and Urişescu, 2019; Sultana and Satyanarayana, 2020) اراضی ساخته شده شهری، پوشش گیاهی، سایر خصوصیات بیوفیزیکی سطح (Haashemi *et al.*, 2016; Ezimand *et al.*, 2018; Firozjaei *et al.*, 2020) و سنجه‌های سیمای سرزمین (Li *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2018) مورد بررسی قرار گرفته است اما نکته قابل توجه در بیشتر این مطالعات این است روند کوتاه یا طولانی مدت دمای سطح زمین و جزایر حرارتی را تا زمان حال مورد بررسی قرار داده‌اند (Shen *et al.*, 2016; Yao *et al.*, 2017; Meng *et al.*, 2019; Sejati *et al.*, 2019; Weng *et al.*, 2018). این مطالعه با استفاده از داده‌های سنجش‌زدور، مدل‌های پیش‌بینی و مدل‌های آماری، الگوی رشد جزایر حرارتی را از گذشته تا حال و همچنین الگوی آن در آینده را با یک سری بسیار طولانی مورد بررسی قرار داده که در مطالعات گذشته کمتر به آن توجه شده است.

شهر رشت از جمله مراکز استانی است که در طی دهه‌های اخیر با افزایش جمعیت مواجه بوده است (Alavi Moghadam *et al.*, 2009) و لذا بخش‌های زیادی از

شهری را تعریف کرد (Howard, 1833). از اواسط قرن بیستم، پدیده جزایر حرارتی به طور چشمگیری در شهرهای بزرگ و در نتیجه شهرنشینی رشد کرده است (Akbari *et al.*, 2001). با توسعه شهرنشینی، تغییرات دما در مناطق مختلف شهری افزایش یافته است که در نتیجه احتراق سوخت (Lilly Rose and Devadas, 2009)، نبود پوشش گیاهی کافی و شرایط آرام هوا (Oke, 1973)، هندسه شهری (Kleerekoper *et al.*, 2012; Nakata-Osaki *et al.*, 2018; Duan *et al.*, 2019; Ezimand *et al.*, 2021a; Oukawa *et al.*, 2022) افزایش تراکم جمعیت (Ramakreshnan *et al.*, 2018) بوده است. از اثرات نامطلوب ایجاد جزایر حرارتی در شهرها می‌توان به افزایش مصرف انرژی (Akbari and Matthews, 2012; Santamouris and Kolokotsa, 2015) افزایش مصرف آب در ایام گرم سال (Gober, 2007; Santamouris and Kolokotsa, 2015) افزایش ناراحتی‌های حرارتی (Almusaed, 2011)، افزایش آلودگی هوا (Li *et al.*, 2018) و اثرات سوء بر سلامت انسان، شرایط زندگی شهری (O'Lenick *et al.*, 2019; Zullo *et al.*, 2019) و محیط‌زیست طبیعی (زندگی جانوران و گیاهان) (Santamouris, 2020) اشاره کرد. انتظار می‌رود که شدت جزایر حرارتی در آینده بیشتر شده و در نتیجه پیامدهای قابل توجهی بر شرایط زندگی انسان بیش از پیش خواهد بود (Zullo *et al.*, 2019).

با توجه به مطالب فوق‌الذکر، ما نیاز به داده‌ها و سنجنده‌هایی داریم که فعالیت‌های انسانی و اثرات متقابل آن با محیط را به صورت پیوسته به نمایش بگذارد، که در این بین داده‌های سنجش‌زدوری به عنوان روشی معتبر برای ارزیابی تغییر و تحولات چشم‌اندازهای شهری و نمایش پیامدهای آن در محیط‌زیست شهری محسوب می‌شود (Mushore *et al.*, 2017a). بعلاوه، نتایج تحقیقات بسیار زیادی حاکی از آن است که از داده‌های سنجش‌زدوری می‌توان به عنوان روشی مؤثر در اندازه‌گیری دمای سطحی

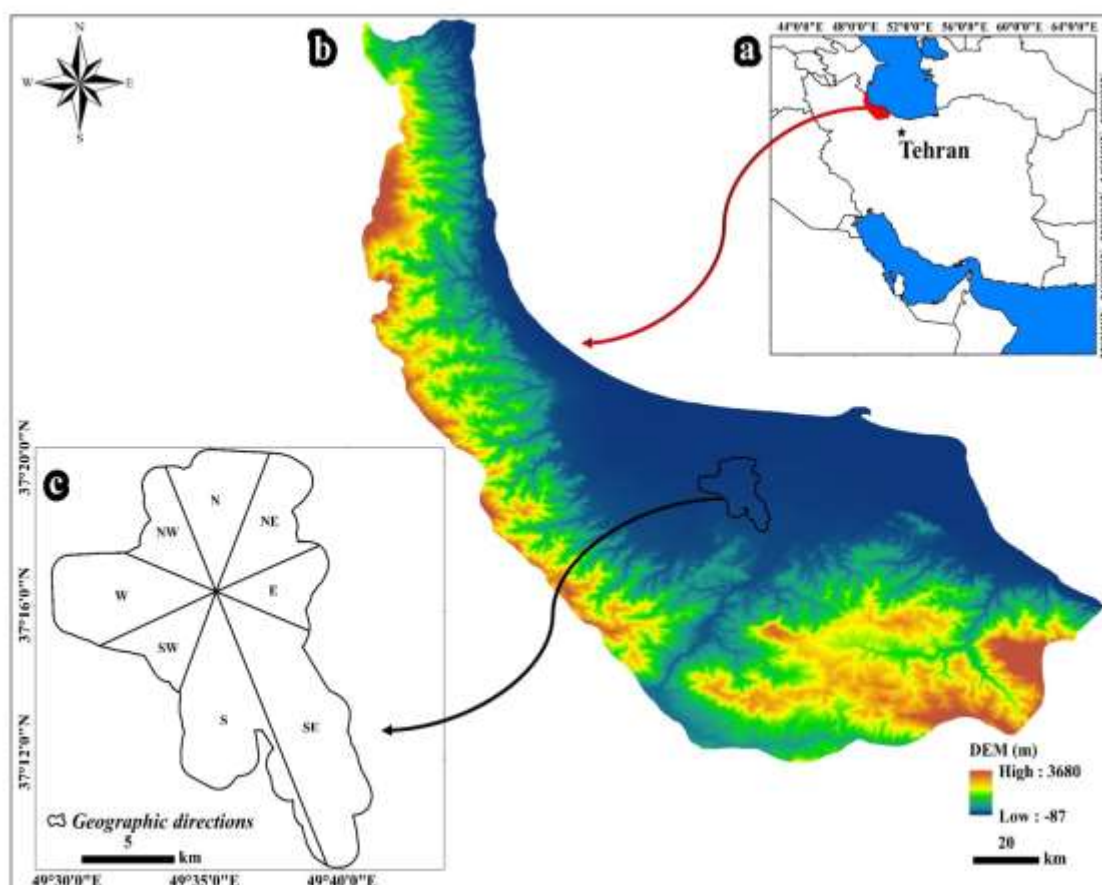
اطراف آن است. این منطقه در زون ۳۹ شمالی و به لحاظ موقعیت نسبی در شمال ایران و جنوب غرب دریای خزر قرار دارد (شکل ۱). رشت به‌عنوان بزرگ‌ترین منطقه شهری در حاشیه جنوبی دریای خزر، مرکز سیاسی - اداری استان گیلان محسوب می‌شود. آب و هوای این شهر بر اساس تقسیم بندی کوپن نسبتاً معتدل و مرطوب با بارندگی سالانه حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر است (Beck *et al.*, 2018). میانگین دمای سالانه ۱۵/۸ درجه سانتی‌گراد، ارتفاع متوسط این شهر از سطح دریا ۵ متر و نرخ افزایش جمعیت در شهر رشت نیز متفاوت بوده، به طوری که از سال ۱۳۴۵ تا سال ۱۳۸۵ جمعیت آن از ۱۴۳۰۰۰ به ۵۲۰۰۰۰ نفر رسیده است (Alavi Moghadam *et al.*, 2009)، و از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ نیز جمعیت آن به ۸۵۶۹۷۱ نفر ثابت و جمعیت شناور آن نیز به ۱۲۰۰۰۰۰ نفر رسیده است (CI, 2016).

فضاهای باز داخل شهری و پیرامون آن با ساخت و سازهای بدون نظارت روبرو شده که خود موجب تغییر در الگوی جزایر حرارتی در شهر رشت شده است (Shafizadeh-Moghadam *et al.*, 2017). به‌طور مثال تبدیل کاربری زمین‌های کشاورزی حاشیه شهر به کاربری‌های مسکونی، تجاری، صنعتی و ... باعث افزایش پیچیدگی و آشفتگی محیط شهری و در نتیجه باعث آشفتگی در الگوی حرارتی شهر شده است. لذا شناخت الگوی جزیره حرارتی را باید برای برنامه‌ریزی و انجام اقدامات مؤثر مدیریتی مورد بررسی قرار داد.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شامل شهر رشت و حومه



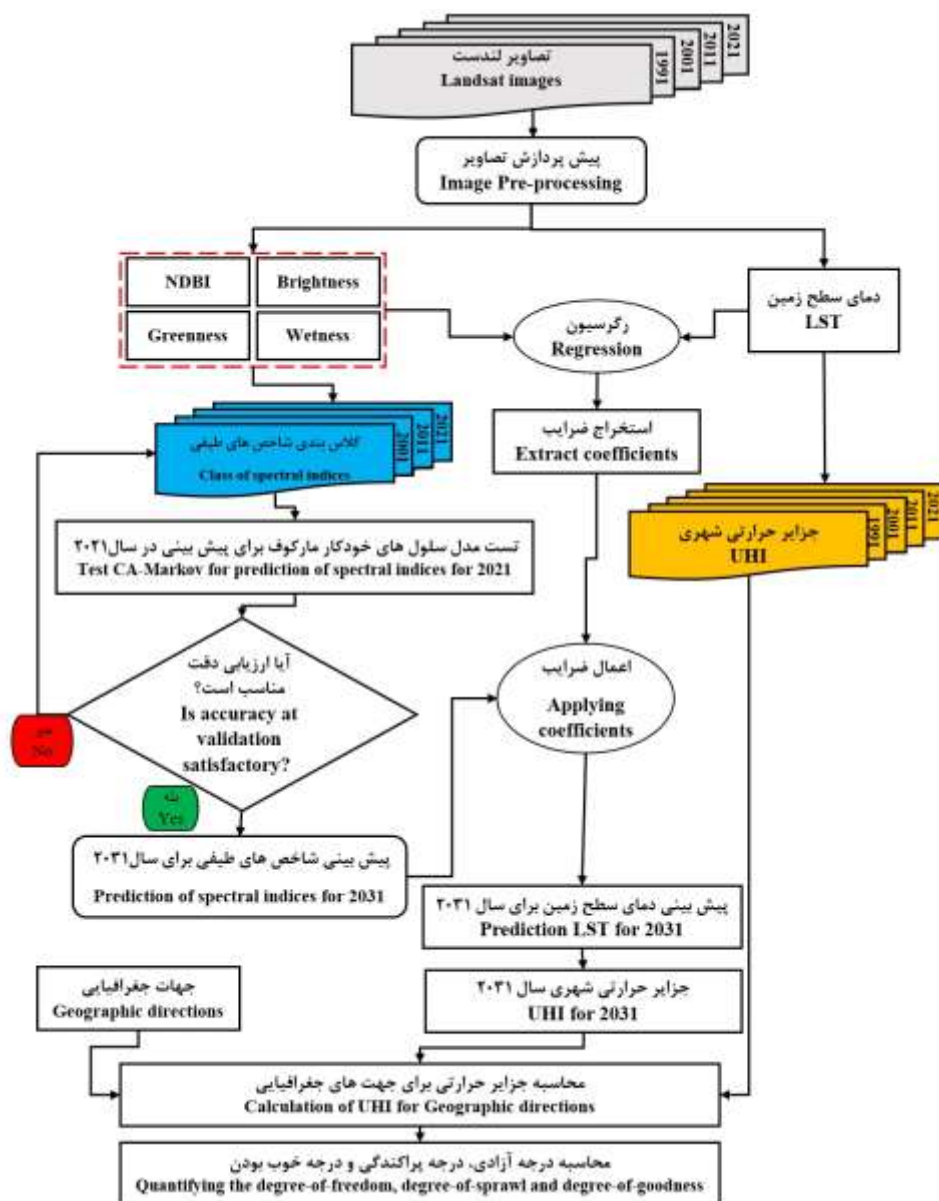
شکل ۱- محدوده مورد مطالعه. a) موقعیت استان گیلان نسبت به کشور ایران، b) نقشه ارتفاعی استان گیلان و c) جهت‌های جغرافیایی
Fig. 1- The study area. a) Location of Gilan Province in Iran, b) elevation map of the study area (ASTER DEM), and c) geographic directions

به تاریخ ۲۰۲۱/۰۷/۱۸ است. تمامی این تصاویر مربوط به فصل تابستان و در مسیر ۱۶۶ و ردیف ۳۵ از سیستم مرجع جهانی^۳ قرار دارند. بازه زمانی برای نمایش تغییرات جزایر حرارتی در چهار دوره ۱۹۹۱ - ۲۰۰۱، ۲۰۰۱ - ۲۰۱۱، ۲۰۱۱ - ۲۰۲۱ و ۲۰۲۱ - ۲۰۳۱ در نظر گرفته شده است.

روش کار

روش انجام کار به صورت خلاصه در شکل ۲ نشان داده شده است که در ادامه هر یک از این بخش‌ها تشریح می‌گردد.

در این پژوهش برای نمایش الگوی تغییرات جزایر حرارتی از تصاویر لندست ۵ و ۸ استفاده شده است. این تصاویر با سطح تولید LIT از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا (<https://earthexplorer.usgs.gov>) تهیه شده‌اند. تصاویر لندست مورد استفاده در این مطالعه به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که فاصله زمانی آن‌ها ثابت (۱۰ سال) و میزان پوشش ابری در آن‌ها کمتر از ۱۰ درصد باشد. تصاویر لندست ۵ مربوط به تاریخ ۱۹۹۱/۰۸/۰۱، ۲۰۰۱/۰۷/۲۷، ۲۰۱۱/۰۷/۰۷ و ۲۰۲۱/۰۷/۲۷ تصاویر لندست ۸ مربوط



شکل ۲- فلوچارت انجام کار

Fig. 2- Workflow of the current study

پیش‌پردازش تصاویر

محاسبه شد.

$$TB = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (3)$$

TB دمای روشنایی سنجنده^۷ برحسب کلونین، K_1 و K_2 ضرایب ثابت کالیبراسیون دمای روشنایی سنجنده که به ترتیب برحسب کلونین و $(w/m^2 * sr * \mu m)$ هستند و در متادیتای تصاویر موجود است (Chander et al., 2009; Li and Meng, 2018).

بازیابی دمای سطح زمین و استخراج جزایر حرارتی

برای استخراج دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر لندست الگوریتم‌های متعددی از جمله الگوریتم تک پنجره، الگوریتم تک کانال و الگوریتم معادله انتقال توسعه یافته است (Qin et al., 2001; Jiménez-Muñoz and Sobrino, 2003; Sobrino et al., 2004). بالاین‌حال، به دست آوردن پارامترهای جوی در زمان عبور ماهواره (Shen et al., 2016) و ضرایب خاص هر منطقه (Moghaddam et al., 2015) از مشکلات استفاده از این الگوریتم‌ها است. بنابراین، مانند بسیاری از دیگر مطالعات برای بازیابی دمای سطح زمین (Weng and Yang, 2004; Shen et al., 2016; Ezimand et al., 2021a) از روشی که در آن تنها رادینانس طیفی بالای جو و NDVI لازم است، استفاده شده است (رابطه ۴).

$$LST = \frac{TB}{1 + \left(\frac{\lambda \times TB}{\alpha}\right) \ln(\varepsilon)} \quad (4)$$

در معادله فوق LST بیانگر دما سطح زمین برحسب درجه کلونین و TB دمای روشنایی در سنجنده برحسب کلونین است (معادله ۱). λ مرکز طول موج برحسب متر بوده و مقدار پارامتر α برابر با $1.438 \times 10^{-2} m$ است. مقادیر TB به‌دست‌آمده مربوط به جسم سیاه است که با خواص اشیاء واقعی کاملاً متفاوت است، بنابراین برای اصلاح آن از گلسیلمندی (رابطه ۵) استفاده می‌شود (Artis and Carnahan, 1982).

$$= \begin{cases} NDVI(0 = 0.9925 \\ 0 \leq NDVI(0.15 = 0.923 \\ NDVI(0.727 = 0.986 \\ 1.0094 + 0.047 \ln(NDVI) \end{cases} \quad (5)$$

ماهواره لندست، در اخذ تصاویر توسط سنجنده‌های مختلف، از قدرت تفکیک‌های مکانی مختلف استفاده می‌کند، بنابراین با استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایه تصاویر باندهای حرارتی لندست ۵ (۱۲۰ متر) (Li et al., 2017) و لندست ۸ (۱۰۰ متر) به قدرت تفکیک ۳۰ متر نمونه برداری مجدد^۴ شده و همچنین با باندهای مالتی اسپکترال سنجنده هم مرجع شده‌اند (Roy et al., 2014). برای تصحیح رادیومتریکی باندهای لندست، ابتدا مقادیر خام DN های تمامی باندهای لندست ۵ و ۸ با معادلات ۱ و ۲ به رادینانس طیفی بالای اتمسفر^۵ تبدیل شد (Markham and Helder, 2012; Avdan and Jovanovska, 2016).

$$L_\lambda(Landsat - 5) = \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{Qcalmin_{max}} (Qcal - Qcal\lambda_{min}) \right) \quad (1)$$

L_λ رادینانس طیفی دریافت شده توسط سنجنده برحسب $\mu m/w/m^2 * sr * \mu m$ مقدار پیکسل $Qcal$ ($DN = 0$) حداقل مقدار پیکسل کوانتیزه شده ($DN = 0$) حداکثر مقدار پیکسل کوانتیزه شده ($DN = 255$)، $LMAX_\lambda$ و $LMIM_\lambda$ به ترتیب حداکثر و حداقل رادینانس طیفی سنجنده برحسب $w/m^2 * sr * \mu m$ است (Markham and Helder, 2012). داده‌های موردنیاز از متادیتای تصاویر استخراج شده است.

$$L_\lambda(landsat_8) = M_L * Qcal + A_L \quad (2)$$

M_L و A_L به ترتیب فاکتور تبدیل ضربی و ضرب تبدیل جمعی است که از متادیتای تصاویر به‌دست می‌آید و $Qcal$ مقادیر پیکسل محصول استاندارد کوانتیزه شده و کالیبره شده (DN) است. پس از محاسبه رادینانس طیفی بالای اتمسفر باندهای مالتی اسپکترال، تصحیح اتمسفری با روش FLAASH^۶ انجام شد و لذا با این روش، نتایج به بازه ۰ - ۱ تغییر داده شدند (ENVI, 2009). درنهایت نتایج در عدد ۴۰۰ برای تولید تصاویر ۸ بیتی (۰ - ۲۵۵) ضرب شدند (Xu, 2010). پس از محاسبه رادینانس طیفی برای باندهای حرارتی لندست ۵ (باند ۶) و لندست ۸ (باند ۱۰) دمای روشنایی از رابطه (۳)

با قرار دادن هر یک از شاخص‌ها در مدل MLR، ضرایب تأثیر هر یک از پارامترها با دمای سطح محاسبه می‌گردد. در مرحله بعد هر یک از شاخص‌ها به ۱۰ کلاس یکسان تقسیم می‌شود (Rahman et al., 2017) و بر اساس مقدار شاخص در سال ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱، مقدار هر یک از کلاس‌ها برای سال ۲۰۳۱ با استفاده از روش سلول‌های خودکار مارکوف پیش‌بینی می‌شود. در نهایت با اعمال ضرایب رگرسیون بر روی شاخص‌های پیش‌بینی شده دمای سطح زمین برای سال ۲۰۳۱ پیش‌بینی می‌شود. ارزیابی دقت مدل مذکور بدین صورت بوده است که ابتدا تمامی مراحل فوق با استفاده از ضرایب استخراج شده از شاخص‌ها در سال ۲۰۰۱ و ۲۰۱۱ و پیش‌بینی آن‌ها با استفاده از زنجیره مارکف و در نهایت اعمال ضرایب برای پیش‌بینی دمای سطح در سال ۲۰۲۱ صورت گرفته است. در نهایت خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) دمای پیش‌بینی شده در ۳۰۰ نقطه با دمای سطح محاسبه شده از تصاویر لندست در سال ۲۰۲۱ با استفاده از معادله ۷

محاسبه شده است (Willmott et al., 2012).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,t} - X_{mod et,t})^2}{n}} \quad (7)$$

پس از محاسبه دمای سطح زمین، اقدام به استخراج جزایر حرارتی شهری شد. جزایر حرارتی شهری به عنوان تفاوت دمای سطح زمین بین مناطق شهری و مناطق روستایی و یا منطقه مرزی حومه آن تعریف می‌شود (Clinton and Gong, 2013; Meng et al., 2018) برای استخراج جزایر حرارتی شهری از معادله ۶ استفاده شده است (El-Hattab et al., 2018).

$$\begin{cases} LST > T_{mean} + 0.5 \times std \text{ referred to UHI area} \\ LST \leq T_{mean} + 0.5 \times std \text{ referred to non-UHI area} \end{cases} \quad (6)$$

با استفاده از معادله فوق جزایر حرارتی و مناطق فاقد جزایر حرارتی از هم تفکیک می‌شوند و در واقع مناطقی جزایر حرارتی محسوب می‌شوند که از دمای بالا و بسیار بالا برخوردار باشند.

استخراج شاخص‌های بیوفیزیکی سطح با استفاده از داده‌های سنجنش از دور

شاخص‌های متفاوتی که توانایی پیش‌بینی دمای سطح زمین را دارند در جدول ۱ شرح داده شده‌اند. این شاخص‌ها بیان‌کننده خصوصیات پوشش گیاهی، اراضی ساخته‌شده، آب‌و خاک می‌باشند. در این تحقیق، ارتباط تمامی شاخص‌های فوق با دمای سطح زمین مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت

جدول ۱- شاخص‌های بیوفیزیکی سطح و نحوه محاسبه آن‌ها

Table 1. Surface biophysical parameters and how to calculate them

شاخص Index	نحوه محاسبه Formulation	منبع References
شاخص نرمال شده اراضی (NDBI ساخته شده)	$NDBI = \frac{SWIR_1 - NIR}{SWIR_1 + NIR}$	(Zha et al., 2003)
درخشندگی Brightness (TM)	$(0.2909^* + B1) + (0.2493^* B2) + (0.4806^* B3) + (0.5568^* B4) + (0.4438^* B5) + (0.1706^* B6)$	
Brightness (OLI)	$(0.3029^* B1) + (0.2786^* B2) + (0.4733^* B3) + (0.5599^* B4) + (0.508^* B5) + (0.1872^* B6)$	
سبزینگی Greenness (TM)	$(0.7221^* B4) + (0.0733^* B5) - (0.2728^* B1) - (0.2174^* B2) - (0.5508^* B3) - (0.1648^* B6)$	(Liu et al., 2014; Huang et al., 2002; Healey et al., 2005; Baig et al., 2014)
Greenness (OLI)	$(0.7276^* B4) + (0.0713^* B5) - (0.2941^* B1) - (0.243^* B2) - (0.5424^* B3) - (0.1608^* B6)$	
نمناکی Wetness (TM)	$(0.1446^* B1) + (0.1761^* B2) + (0.3322^* B3) + (0.3396^* B4) - (0.6210^* B5) - (0.4186^* B6)$	
Wetness (OLI)	$(0.1511^* B1) + (0.1973^* B2) + (0.3283^* B3) + (0.3407^* B4) - (0.7117^* B5) - (0.4559^* B6)$	

** در جدول فوق B1 باند آبی، B2 باند سبز، B3 باند قرمز، B4 باند مادون قرمز نزدیک، B5 باند مادون قرمز موج کوتاه (۱) و B6 باند مادون قرمز موج کوتاه (۲) است.

In the above table, B1 is blue band, B2 is green band, B3 is red band, B4 is near infrared band, B5 is shortwave infrared (1) and B6 is shortwave infrared (2).

مدل سلول‌های خودکار - مارکوف

در این پژوهش از مدل سلول‌های خودکار - مارکوف^۸ برای پیش‌بینی شاخص‌های طیفی استفاده شده است (Yang et al., 2012). مدل زنجیره‌ی مارکوف و مدل سلول‌های خودکار دو بخش اصلی این مدل هستند. این مدل برای تعیین احتمال تغییر، حداقل به دو نقشه کلاس نیاز دارد (Mitsova et al., 2011) که در این پژوهش خروجی کلاس‌بندی شاخص‌های بیوفیزیکی به‌عنوان ورودی این روش در نظر گرفته شده است. بر اساس احتمال شرطی قانون بیز، پیش‌بینی تغییر کلاس‌ها در مدل مارکوف با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود (Rajitha et al., 2010).

$$s(t+1) = p_{ij} \times s(t) \quad (8)$$

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & \dots & p_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$0 \leq p_{ij} \leq 1 \text{ and } \sum_{j=1}^n p_{ij} = 1, (i, j=1, 2, \dots, n)$$

خروجی مدل نیز شامل احتمالات تبدیل وضعیت، ماتریس مساحت‌های تبدیل‌شده هر کلاس و درنهایت تصاویر احتمال شرطی برای تبدیل کلاس‌های مختلف است (Yang et al., 2012). به دلیل عدم وجود اطلاعات وابستگی مکانی در مدل زنجیره مارکوف (Pontius, 2000)، از مدل شبکه خودکار برای اضافه کردن مشخصه مکانی به مدل استفاده می‌شود. بنابراین در مدل سلول‌های خودکار - مارکوف با استفاده از ماتریس انتقال مساحت، نقشه شبیه‌سازی‌شده کلاس‌ها برای آینده به دست خواهد آمد (Fan et al., 2008; Pontius, 2000). در این پژوهش با استفاده از نقشه‌های کلاس‌بندی شده شاخص‌های بیوفیزیکی در سال ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ به پیش‌بینی شاخص‌های بیوفیزیکی در سال ۲۰۳۱ اقدام می‌شود.

اختلاف بین تغییرات جزایر حرارتی مشاهده شده و مورد انتظار

در این مطالعه برای نمایش تغییرات جزایر حرارتی، ابتدا

مرکز هندسی شهر رشت به دست آمد و سپس در مرحله بعد، منطقه شهری با زوایای ۴۵ درجه به ۸ قسمت تقسیم شد (شکل ۱) (Dadras et al., 2015). سپس میزان تغییرات جزایر حرارتی شهری در جهت‌های مختلف محاسبه شد. تغییرات مورد انتظار جزایر حرارتی (M_{ij}^E) (با توجه به تغییرات مشاهده‌شده آن محاسبه می‌شود و به این منظور از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود (Bhatta et al., 2010).

$$M_{ij}^E = \frac{M_i^S \times M_j^S}{M_g} \quad (10)$$

اگر جدول مربوط به تغییرات جزایر حرارتی مشاهده‌شده را به‌عنوان ماتریس M با درایه‌های M_{ij} ، در نظر می‌گیریم، به‌طوری‌که $i = 1, 2, 3, \dots, n$ (سطرهای ماتریس) و $j = 1, 2, 3, \dots, m$ (ستون‌های ماتریس) است. M_i^S مجموع سطرهای i ، M_j^S مجموع ستون j و $M_g = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij}$ است (Bhatta et al., 2010; Dadras et al., 2015).

بررسی درجه آزادی^۹

تفاوت بین تغییرات مشاهده شده و مورد انتظار جزایر حرارتی، درجه انحراف آن را نشان می‌دهد. اگر درجه انحراف بالا باشد می‌توان نتیجه گرفت که این متغیر از دیگر متغیرهای کلاس خود مستقل است (Bhatta et al., 2010). آماره کای اسکور پیرسون، از آزادی میان جفت متغیرها برای توصیف تغییر در همان کلاس استفاده می‌کند (Almeida et al., 2005). بنابراین آماره کای اسکور^۱، برای تعیین درجه آزادی با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه می‌گردد (Bhatta et al., 2010).

$$\chi_i^2 = \sum_{j=1}^m \frac{(M_j - M_j^E)^2}{M_j^E} \quad (11)$$

در رابطه فوق χ_i^2 درجه آزادی برای دوره زمانی i ام، M_j تغییرات جزایر حرارتی شهری مشاهده‌شده در ستون j ام برای سطر مشخص، M_j^E تغییرات جزایر حرارتی شهری مورد انتظار در ستون j ام برای سطر مشخص است.

$$H_j = - \sum_{i=1}^n p_i \log_e(p_i) \quad (15)$$

که در آن p_i سهم متغیر در سطر i ام (نسبت نرخ تغییرات جزایر سطحی شهری در بازه زمانی i ام) و n تعداد دوره‌های زمانی است که در این پژوهش برابر ۴ (۱۹۹۱ - ۲۰۰۱، ۲۰۰۱ - ۲۰۱۱، ۲۰۱۱ - ۲۰۲۱ و ۲۰۲۱ - ۲۰۳۱) است. در نهایت پراکندگی کلی (H) نیز با استفاده از رابطه ۱۶ محاسبه می‌گردد (Bhatta et al., 2010).

$$H = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} \log_e(p_{ij}) \quad (16)$$

که در آن p_{ij} سهم متغیر در سطر i ام و ستون j ام بوده که عبارت از نسبت نرخ تغییرات جزایر حرارتی شهری در بازه زمانی i ام و جهت j ام است (Bhatta et al., 2010).

درجه خوب بودن^{۱۲}

از آنجاییکه کای اسکور (درجه آزادی) و آنتروپی (درجه پراکندگی) اندازه‌های متفاوتی هستند و ممکن است در برخی از موارد با هم تناقض داشته باشند، لذا تعیین درجه خوب بودن تغییرات جزایر حرارتی شهری ضرورت می‌یابد. درجه خوب بودن برای هر دوره زمانی (G_i) به صورت رابطه (۱۷) محاسبه شود (Bhatta et al., 2010).

$$G_i = \log_e \left[\frac{1}{\chi_i^2 (\log_e(m))} \right] \quad (17)$$

در معادله فوق G_i درجه خوب بودن برای دوره زمانی i ام، χ_i^2 درجه آزادی برای دوره زمانی i ام، H_i مقدار آنتروپی برای دوره زمانی i ام و m تعداد جهت‌های جغرافیایی (هشت جهت) است.

حال اگر j (ستون) را به جای i (سطر) و n (تعداد سطر) را به جای m (تعداد ستون) در رابطه ۱۷ جایگزین کنیم می‌توانیم درجه خوب بودن را برای هر جهت جغرافیایی (G_j) محاسبه کنیم (رابطه ۱۸). در نهایت درجه کلی خوب بودن (G) با استفاده از رابطه ۱۹ محاسبه می‌شود (Bhatta et al., 2010).

حال اگر i (سطر) را به جای j (ستون) و n (تعداد سطر) را به جای m (تعداد ستون) در رابطه ۱۱ جایگزین کنیم می‌توانیم درجه آزادی را برای هر جهت جغرافیایی (χ_j^2) محاسبه کنیم (معادله ۱۲). درجه آزادی کلی (χ^2) نیز با استفاده از رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود (Bhatta et al., 2010).

$$\chi_i^2 = \sum_{j=1}^m \frac{(M_i - M_i^E)^2}{M_i^E} \quad (12)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{(M_{ij} - M_{ij}^E)^2}{M_{ij}^E} \quad (13)$$

کای اسکور دارای حد پایین صفر است و زمانی به دست می‌آید که ارزش مشاهده شده دقیقاً با ارزش مورد انتظار برابر باشد (Bhatta et al., 2010).

آنتروپی شانون^{۱۱}

مدل آنتروپی شانون پراکندگی جزایر حرارتی شهری را اندازه‌گیری می‌کند (Mohamed and Worku, 2018) از این مدل برای تجزیه و تحلیل مقدار بی‌قوارگی استفاده می‌شود (Kumar et al., 2007; Ramachandra et al., 2014). در این پژوهش مقدار آنتروپی شانون برای هر دوره زمانی (H_i) با استفاده از رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود (Bhatta et al., 2010).

$$H_i = - \sum_{j=1}^m p_j \log_e(p_j) \quad (14)$$

که در آن p_j سهم متغیر در ستون j ام (نسبت نرخ تغییرات جزایر حرارتی شهری در جهت j ام) و m تعداد جهت‌های جغرافیایی است که در این پژوهش برابر هشت است (شکل ۱). درجه پراکندگی بین ۰ تا $\log_e(m)$ قرار دارد. بدین صورت که هر چه مقدار عددی محاسبه شده برای درجه پراکندگی به صفر نزدیک‌تر باشد، جزایر حرارتی شهری فشرده‌تر توزیع یافته‌اند و هرچه مقدار آنتروپی به $\log_e(m)$ نزدیک‌تر باشد، نشان دهند جزایر حرارتی شهری پراکنده‌تر است. برای تعیین درجه آنتروپی هر جهت جغرافیایی (H_j) از رابطه ۱۵ استفاده می‌شود (Bhatta et al., 2010).

ضریب مربوط به شاخص نمناکی و کمترین ضریب مربوط به شاخص درخشندگی است. با توجه به نتایج به دست آمده از میزان همبستگی و ضرایب رگرسیون، دو عامل NDBI و نمناکی از مهم‌ترین پارامترهای کنترل‌کننده تغییرات دمای سطح زمین در منطقه مطالعاتی هستند. از مهم‌ترین علت‌های وجود بیشترین همبستگی مثبت بین شاخص NDBI و دمای سطح زمین می‌توان به این نکته اشاره کرد که شاخص NDBI اشباع نمی‌شود و همچنین با افزایش نامحدود دما به افزایش خود ادامه می‌دهد (Mushore *et al.*, 2017b).

$$ST = 303.66 + 21.15 \times NDBI - 4.66 \times Greenness + 35.41 \times Wetness + 9.34 \times Brightness \quad (20)$$

ارزیابی دقت دمای سطح زمین استخراج شده با استفاده از شاخص‌های بیوفیزیکی سطح

همان‌طور که در بخش قبلی اشاره شد، در نتیجه برقراری MLR ضرایب تأثیر هریک از پارامترهای بیوفیزیکی سطح با دمای سطح زمین برای سال ۲۰۲۱ استخراج گردید. علت انتخاب روش رگرسیون خطی ساده نیز همانند مطالعه (Ahmed *et al.*, 2013) به این دلیل بوده است که شاخص‌های انتخاب شده دارای یک رابطه خطی و مستقیم با دمای سطح زمین هستند (Mushore *et al.*, 2017b). به منظور ارزیابی صحت مدل مذکور، دمای سطحی مشاهده شده در سال ۲۰۲۱ با دمای سطحی پیش‌بینی شده با استفاده از شاخص‌های بیوفیزیکی سطح در ۳۰۰ نقطه مقایسه شد (شکل ۳) (Mushore *et al.*, 2017b). نتایج این شکل نشان می‌دهد که روند کلی مقدار پیش‌بینی شده دمای سطح زمین بسیار مشابه با دمای واقعی سطح زمین است و ارزیابی کمی (RMSE=1.33) نیز حاکی از پیش‌بینی خوب دمای سطح زمین برای سال ۲۰۲۱ است. در نتیجه شاخص‌های بیوفیزیکی و MLR دقت مناسب برای پیش‌بینی دمای سطح زمین در سال ۲۰۳۱ را دارا می‌باشند.

$$G_i = \log_e \left[\frac{1}{\chi_i^2 (\log_e(n))} \right] \quad (18)$$

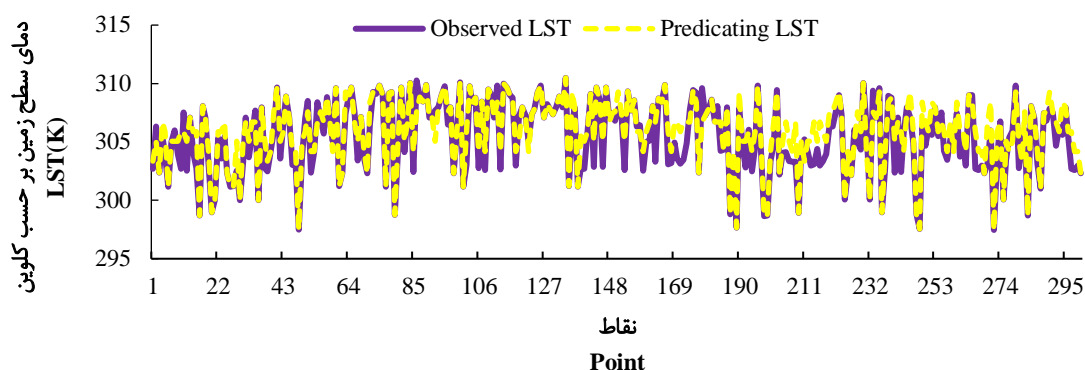
$$G_i = \log_e \left[\frac{1}{\chi^2 (\log_e(n \times m))} \right] \quad (19)$$

که در رابطه فوق H آنتروپی کلی و χ^2 درجه آزادی کلی است (Dadras *et al.*, 2015). درجه خوب بودن بدین صورت بیان می‌شود که مقادیر مثبت، خوب بودن تغییرات جزایر حرارتی شهری و مقادیر منفی حاکی از بد بودن آن است (Bhatta *et al.*, 2010; Mohamed and Worku, 2018).

نتایج و بحث

ارتباط بین شاخص‌های بیوفیزیکی سطح و دمای سطح زمین

میزان همبستگی شاخص‌های طیفی و دمای سطح زمین برای سال ۲۰۲۱ در ابتدا با استفاده از همبستگی پیرسون مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این همبستگی نشان داده است دمای سطح زمین و NDBI دارای یک رابطه مستقیم بوده و در نتیجه همبستگی مثبت ($R = 0.89$) بین این دو پارامتر همانند سایر مطالعات مشاهده می‌شود (Ezimand *et al.*, 2021b; Mushore *et al.*, 2017b; Jamei *et al.*, 2019). دو شاخص سبزی‌نگی و نمناکی یک رابطه غیرمستقیم و نسبتاً قوی ($R = -0.68$ and $R = -0.81$) با دمای سطح زمین همانند سایر مطالعات گذشته داشته‌اند (Firozjaei *et al.*, 2020; Ezimand *et al.*, 2021b; Firozjaei *et al.*, 2022). همبستگی بین شاخص درخشندگی و دمای سطح زمین نیز مثبت ($R = 0.42$) بوده اما مقدار آن نسبت به سایر شاخص‌ها کمتر است. تمامی این همبستگی‌ها در سطح $P \leq 0.01$ معنی‌دار بوده‌اند. در نهایت رابطه رگرسیونی برای استخراج ضرایب تأثیر هر یک از پارامترها در پیش‌بینی دمای سطح زمین برقرار گردید (رابطه ۲۰). نتایج آن بدین صورت بوده است که بیشترین

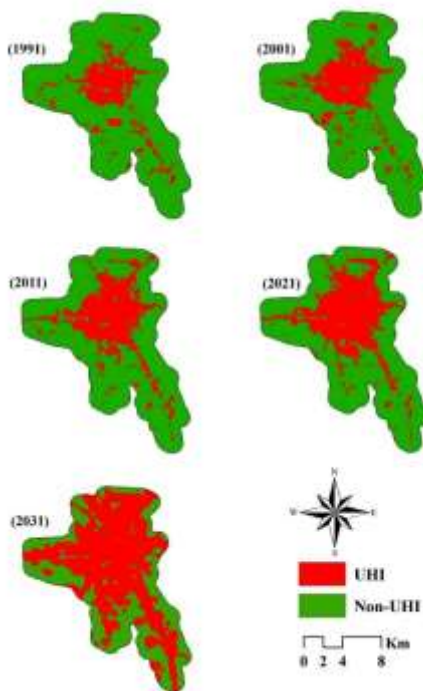


شکل ۳- ارزیابی و مقایسه دمای سطح به‌دست‌آمده از باندهای حرارتی و دمای سطح به‌دست‌آمده از شاخص‌های بیوفیزیکی سطح
 Fig. 3- Comparison of LST derived from thermal band with LST derived from the surface biophysical parameters

کیلومترمربع افزایش یابد. تغییرات جزایر حرارتی حاکی از آن است که این پدیده در حاشیه‌های شهری با نسبت بیشتری از مرکز شهر افزایش یافته است. همان‌طور که روند تغییرات جزایر حرارتی نشان می‌دهد، جزایر حرارتی محدوده‌های وسیع‌تری از شهر را فراگرفته و این جزایر به سمت حاشیه‌های شهری گسترش پیدا کرده‌اند. همچنین تغییرات نشان می‌دهد که جزایر حرارتی شهر رشت از حالت مجمع‌الجزایر (Ziter *et al.*, 2019) خارج شده و حالت تجمیعی و یکپارچه به خود گرفته است.

تغییرات زمانی مکانی جزایر حرارتی شهری

نقشه جزایر حرارتی برای سال‌های ۱۹۹۱، ۲۰۰۱، ۲۰۱۱، ۲۰۲۱ و ۲۰۳۱ در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین تغییرات مربوط به هر دوره زمانی و جهت جغرافیایی (شکل ۱) در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود مساحت محدوده جزایر حرارتی از مقدار ۲۹/۰۲ کیلومترمربع در سال ۱۹۹۱ به ۵۹/۰۳ کیلومترمربع در سال ۲۰۲۱ رسیده است و پیش‌بینی می‌شود که در سال ۲۰۳۱ به مقدار ۱۰۸/۵۶



شکل ۴- تغییرات جزایر حرارتی شهری از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۳۱
 Fig. 4- Changes in UHI from 1991 to 2031

جدول ۲- تغییرات مساحت جزایر حرارتی شهری در دوره‌های زمانی و جهت‌های جغرافیایی برحسب کیلومتر مربع

Table 2. UHI area and their changes in periods and geographic directions (in km²)

	شمال N	شمال شرق NE	شرق E	جنوب شرق SE	جنوب S	جنوب غرب SW	غرب W	شمال غرب NW	
مساحت جزایر حرارتی									
UHI area									
1991	3.32	4.51	2.87	6.21	4.03	2.73	3.01	2.34	The city 29.02
2001	5.38	5.73	4.03	6.32	4.41	4.01	5.77	2.90	38.55
2011	7.21	7.92	5.25	8.33	5.75	4.09	7.10	3.34	48.98
2021	9.37	9.59	6.16	9.45	7.20	4.43	8.49	4.34	59.03
2031	16.08	13.84	9.20	23.83	16.04	7.02	14.74	7.81	108.56
تغییرات جزایر حرارتی مشاهده شده									
Observed Changes in UHI area									
1991-2001	2.06	1.22	1.16	0.11	0.38	1.27	2.76	0.56	Row total 9.53
2001-2011	1.83	2.20	1.21	2.01	1.33	0.08	1.33	0.43	10.43
2011-2021	2.16	1.67	0.92	1.12	1.45	0.34	1.39	1.00	10.05
2021-2031	6.71	4.24	3.04	14.38	8.85	2.60	6.25	3.47	49.53
Column total	12.75	9.33	6.33	17.62	12.01	4.29	11.73	5.47	79.54

بین چهار بازه زمانی، بازه زمانی ۲۰۲۱ - ۲۰۳۱ از بیشترین نرخ تغییرات مورد انتظار برخوردار است و بازه زمانی ۱۹۹۱ - ۲۰۰۱ کمترین نرخ تغییرات مورد انتظار را دارد. همچنین بیش‌بینی می‌شود که در آینده جنوب شرق با توجه به این که از زمین‌های مستعد برای ساخت و سازهای بیشتر (یکی از عوامل اصلی ایجاد جزایر حرارتی) برخوردار است، از تغییرات بیشتری برخوردار خواهد بود.

اختلاف بین تغییرات جزایر حرارتی مشاهده شده و مورد انتظار

جدول شماره ۲ نرخ تغییرات جزایر حرارتی مشاهده شده برحسب کیلومتر مربع را برای هر دوره زمانی و همچنین در هر جهت جغرافیایی نشان می‌دهد و همچنین تغییرات مورد انتظار برای هر دوره زمانی و هر جهت جغرافیایی نیز محاسبه شده است (جدول ۳). نتایج نشان می‌دهد که از

جدول ۳- تغییرات مورد انتظار جزایر حرارتی شهری برحسب کیلومتر مربع

Table 3. Expected UHI variations (in km²)

	شمال N	شمال شرق NE	شرق E	جنوب شرق SE	جنوب S	جنوب غرب SW	غرب W	شمال غرب NW
1991-2001	1.53	1.12	0.76	2.11	1.44	0.51	1.40	0.65
2001-2011	1.67	1.22	0.83	2.31	1.57	0.56	1.54	0.72
2011-2021	1.61	1.18	0.80	2.23	1.52	0.54	1.48	0.69
2021-2031	7.94	5.81	3.94	10.98	7.48	2.67	7.30	3.41

می‌دهد که میزان انحراف تغییرات جزایر حرارتی برحسب زمان و مکان متفاوت بوده است. بدین صورت مناطقی که منفی هستند تغییرات کمتر و مناطقی که مثبت هستند تغییرات بیشتر از حد انتظار را دارا می‌باشند.

برای درک میزان درجه انحراف تغییرات جزایر حرارتی، باید اقدام به مقایسه تغییرات مکانی و زمانی مشاهده شده و مورد انتظار شود. تفاوت بین تغییرات مورد انتظار و مشاهده شده در جدول ۴ نشان داده شده است. این جدول نشان

جدول ۴- اختلاف بین جزایر حرارتی شهری مشاهده شده و مورد انتظار برحسب کیلومتر مربع

Table 4. Difference between observed and expected UHI variations (in km²)

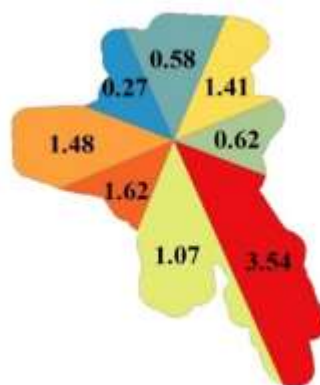
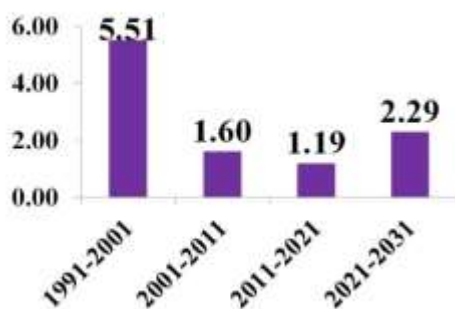
	شمال N	شمال شرق NE	شرق E	جنوب شرق SE	جنوب S	جنوب غرب SW	غرب W	شمال غرب NW
1991-2001	0.53	0.10	0.40	-2.00	-1.06	0.76	1.35	-0.09
2001-2011	0.16	0.97	0.38	-0.30	-0.24	-0.48	-0.21	-0.28
2011-2021	0.55	0.49	0.12	-1.11	-0.07	-0.20	-0.09	0.31
2021-2031	-1.24	-1.57	-0.90	3.41	1.37	-0.08	-1.06	0.06

جهت‌های جغرافیایی مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج آزمون کای اسکور نشان داده شده است، مقدار کای اسکور در هیچ جهت و دوره‌ای صفر نیست بنابراین تغییرات مشاهده شده و مورد انتظار با یکدیگر اختلاف دارند.

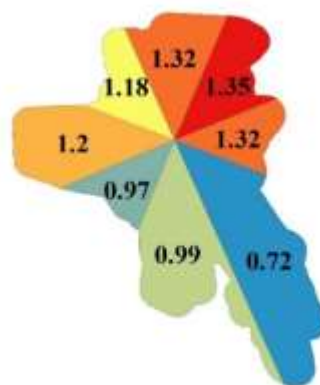
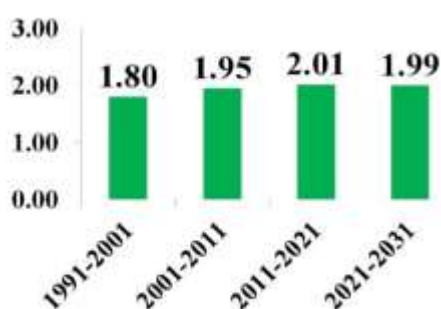
آماره کای اسکور پیرسون

برای تعیین درجه آزادی، از معادله کای اسکور پیرسون استفاده شده است که میزان درجه آزادی یا درجه انحراف تغییرات جزایر حرارتی مشاهده را از مورد انتظار آشکار می‌سازد. نتایج این آزمون برای دوره‌های زمانی و

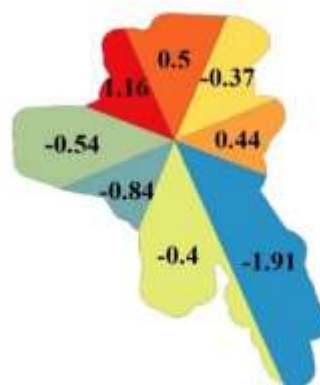
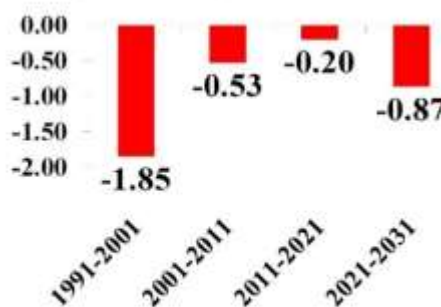
a: Degree-of-freedom



b: Shannon's entropy



c: Degree-of-goodness



شکل ۵- a) درجه آزادی جزایر حرارتی شهری برحسب دوره‌های زمانی و جهت‌های جغرافیایی، b) آنتروپی شانون جزایر حرارتی شهری برحسب دوره‌های زمانی و جهت‌های جغرافیایی، c) درجه خوب بودن جزایر حرارتی شهری برحسب دوره‌های زمانی و جهت‌های جغرافیایی

Fig. 5- a) the degree-of-freedom of UHI in different time periods and geographic directions; b) The Shannon's entropy of UHI in different time periods and geographic directions; c) The degree-of-goodness of UHI in different time periods and geographic directions

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود بیشترین درجه آزادی برای دوره زمانی ۱۹۹۱ - ۲۰۰۱ محاسبه شده است و کمترین درجه آزادی در دوره زمانی ۲۰۱۱ - ۲۰۲۱ اتفاق افتاده است. همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد که بیشترین درجه آزادی مربوط به منطقه جنوب شرق و بالعکس کمترین درجه آزادی در مناطق شمال غرب شهر رشت رخ داده است. نتایج درجه آزادی (شکل ۵) در نهایت روند نسبتاً یکسانی برای جزایر حرارتی نشان می‌دهد. درجه آزادی کلی محاسبه شده برای جزایر حرارتی نیز برابر با $10/58$ است. همان‌طور که مشخص است درجه آزادی کلی به شدت بالاست (Bhatta et al., 2010). این درجه آزادی بالا برای شهر رشت، بیانگر توسعه و گسترش بی‌ثبات جزایر حرارتی شهری با تغییر زمان است.

آنتروپی شانون

تغییرات مکانی و زمانی تغییرات جزایر حرارتی برای هر دوره زمانی و جهت‌های مختلف با استفاده از آنتروپی شانون مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، میزان آنتروپی در هر چهار دوره زمانی به صورت کلی بالا بوده و بیانگر یک الگوی پراکنده جزایر حرارتی است.

حد نهایی آنتروپی $\log_e(m)$ برابر با $2/08$ است و نصف آنتروپی برابر با $1/04$ است. همان‌طور که اشاره شد هرچه مقدار عددی محاسبه شده برای آنتروپی به صفر نزدیک‌تر باشد، جزایر حرارتی شهری فشرده‌تر توزیع یافته‌اند و هرچه مقدار آنتروپی به $\log_e(m)$ نزدیک‌تر باشد، نشان دهند جزایر حرارتی شهری پراکنده‌تر است. در تمامی سال‌ها، مقدار آنتروپی از نصف بیشتر بوده و به حد نهایی نزدیک است؛ بنابراین شهر رشت یک الگوی پراکنده در جزایر حرارتی را شاهد بوده است و پیش‌بینی می‌شود که در ۱۰ سال آینده نیز چنین روندی را ادامه دهد. نتایج آنتروپی برای هر یک از جهات جغرافیایی نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده

می‌شود، مقدار آنتروپی برای هر یک از جهات نیز به صورت کلی بالا است و مقدار آنتروپی تمامی مناطق از نصف آنتروپی ($0/69$) بیشتر بوده و به حد نهایی $\log_e(n)$ که مقدار $1/39$ است، نزدیک‌تر است. نتایج آنتروپی برای دوره‌های زمانی مختلف و جهت‌های جغرافیایی هشت‌گانه برای جزایر حرارتی محاسبه شد که حاکی از بیشترین آنتروپی برای دوره زمانی ۲۰۱۱ - ۲۰۲۱ و برای جهت شمال شرق بوده و کمترین مقدار آنتروپی نیز برای دوره ۱۹۹۱ - ۲۰۰۱ و جهت جغرافیایی جنوب شرق است. آنتروپی کلی محاسبه شده برای جزایر حرارتی برابر با $3/18$ است و به حد نهایی آنتروپی $\log_e(n \times m)$ که مقدار $3/46$ است نزدیک است. این آنتروپی بالا بیان می‌کند که شهر رشت یک الگوی پراکنده در جزایر حرارتی را شاهد بوده است.

درجه خوب بودن تغییرات جزایر حرارتی شهری

نتایج حاصل از درجه خوب بودن جزایر حرارتی شهر رشت در چهار دوره زمانی و در جهت‌های جغرافیایی محاسبه شده است و نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار کلی درجه خوب بودن برای جزایر حرارتی با مقدار $2/45$ - رخ داده است که بیان‌کننده عدم خوب بودن جزایر حرارتی در شهر رشت است. در بین چهار دوره زمانی، دوره زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ از بیشترین درجه خوب بودن، هم به لحاظ جزایر حرارتی، برخوردار بوده است و از بین هشت جهت جغرافیایی نیز جهت جغرافیایی شمال غرب بهترین درجه خوب بودن جزایر حرارتی را تجربه کرده است.

تحلیل الگوی تغییرات جزایر حرارتی شهری

تغییرات مکانی و زمانی جزایر حرارتی در شهر رشت نشان می‌دهد که تغییرات آن همانند سایر مطالعات (Ghosh et al., 2022; Moazzam et al., 2022)، بسیار متأثر از اثر دوبعدی اراضی ساخته شده شهری است. با این حال نتایج به دست آمده نشان داده است که تنها عامل کنترل‌کننده تغییرات جزایر حرارتی مربوط به اثر دوبعدی اراضی

نتیجه‌گیری

این مطالعه با استفاده از داده‌های سنسج‌ازدور، شاخص‌های بیوفیزیکی و بررسی‌های آماری الگوی تغییرات جزایر حرارتی از گذشته تا زمان آینده را مورد بررسی قرار داده که در مطالعات گذشته کمتر به آن توجه شده است. پیش‌بینی دمای سطح زمین با استفاده از مدل رگرسیون چند متغیره و شاخص‌های بیوفیزیکی سطح انجام‌گرفته است که نتایج آن حاکی از خطای پایین این مدل ($RMSE = 1.33K$) برای پیش‌بینی دمای سطح زمین در سال ۲۰۲۱ و در نتیجه تأیید نتایج این مدل برای پیش‌بینی دمای سطح زمین در سال ۲۰۳۱ است. نتایج درجه آزادی، آنتروپی شانون و درجه خوب بودن الگوی تغییرات در شهر رشت حاکی از توسعه و گسترش بی‌ثبات، الگوی پراکنده شدید و در نهایت عدم خوب بودن الگوی تغییرات جزایر حرارتی شهری با تغییر زمان است. پیش‌بینی می‌شود که چنانچه اقدامات مدیریتی اتخاذ نشود الگوی تغییرات به‌مرور شرایط بدتری نیز خواهد داشت. نتایج این مطالعه جهت راهنمایی مدیران شهری در برنامه‌ریزی‌های آبی و تصمیم‌گیری آن‌ها مفید خواهد بود. از جمله پیشنهادها مرتبط با نتایج این مطالعه می‌توان به جلوگیری از تغییرات کاربری اراضی و زمین‌های کشاورزی حاشیه شهر از طریق توسعه عمودی و بلندمرتبه‌سازی در جهاتی که بیشترین پراکندگی در آن اتفاق افتاده اشاره نمود. به‌منظور کاهش جزایر حرارتی نیز با توجه به پیشنهاد توسعه عمودی که خود یکی از عوامل ایجاد جزایر حرارتی است استفاده بام‌ها و دیوارهای سبز و همچنین استفاده از مواد با توان بازتابی بالا پیشنهاد می‌گردد.

سپاسگزاری

از کلیه کسانی که ما را در انجام این تحقیق یاری نمودند تشکر می‌نماییم.

ساخته‌شده نیست بلکه باید به هندسه شهری نیز توجه کرد. بدین‌صورت اراضی ساخته‌شده علاوه بر اثر دو بعدی که باعث افزایش دمای سطح زمین می‌شوند دارای اثر سه بعدی نیز می‌باشند که باعث حبس انرژی و افزایش دما در مناطق مجاور شده و در نتیجه باعث ایجاد UHI شوند (Ezimand *et al.*, 2021a). در برخی از مناطق شهر نیز اراضی بایر وجود داشته است که از میانگین دمایی نسبتاً بالایی برخوردار بوده‌اند و در نتیجه باعث ایجاد خوشه‌های حرارتی در شهر بوده‌اند. از سایر دلایل افزایش UHI در محدوده شهر رشت می‌توان به جهت و نوع تقاطع‌ها و خیابان‌های شهری نیز اشاره کرده که باعث افزایش UHI در شهر رشت بوده‌اند (Azimi, 2005). رشد جمعیت و افزایش مهاجرت‌های شهری - روستایی، علاوه بر اینکه یکی از عوامل افزایش اراضی ساخته‌شده بوده است، باعث افزایش تراکم جمعیت شهری در دوره‌های اخیر در شهر رشت (CI, 2016) شده‌اند و همچنین باعث تشدید و افزایش جزایر حرارتی شده است (Azimi, 2005). تشدید و افزایش جزیره حرارتی را می‌توان ناشی از تغییر نوع مصالح ساختمان‌ها نیز دانست؛ بدین‌صورت که در گذشته غالب مصالح ساختمانی شهر رشت از نوع چوب بوده است ولی در سال‌های اخیر این مصالح بیشتر با آجر، آهن و بتن جایگزین شده است و در نتیجه باعث افزایش دمای سطحی و حبس شدن انرژی و افزایش جزایر حرارتی شده‌اند (Azimi, 2005; Wonorahardjo *et al.*, 2020). تبدیل در ساختمان‌های یک طبقه به چندین طبقه و تغییر مورفولوژی نیز از عوامل دیگر در افزایش جزایر حرارتی در شهر رشت بوده است (Azimi, 2005; Nakata-Osaki *et al.*, 2018). در نهایت می‌توان گفت که افزایش نسبی گرد و غبار (Negah, 2016) همراه با افزایش سایر آلودگی‌ها در سال‌های اخیر نیز از دلایل افزایش تشدید UHI در شهر رشت بوده است (Ezimand *et al.*, 2021b).

پی‌نوشت‌ها

⁶Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH)

⁷At-sensor Brightness Temperature

⁸Cellular automata-Markov chain modelling

⁹Degree-of-freedom

¹⁰Chi-square

¹¹Shannon's entropy

¹²Degree-of-goodness

¹Urban heat island (UHI)

²Land surface temperature (LST)

³Worldwide Reference System (WRS)

⁴Resampling

⁵Top of Atmosphere (ToA)

منابع

Ahmed, B., Kamruzzaman, M., Zhu, X., Rahman, M. and Choi, K., 2013. Simulating land cover changes and their impacts on land surface temperature in Dhaka, Bangladesh. *Remote Sensing*, 5, 5969-5998.

Akbari, H. and Matthews, H.D, 2012. Global cooling updates: Reflective roofs and pavements. *Energy and Buildings*, 55, 2-6.

Akbari, H., Pomerantz, M. and Taha, H., 2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70, 295-310.

Alavi Moghadam, M.R., Mokhtarani N. and Mokhtarani, B., 2009. Municipal solid waste management in Rasht City, Iran. *Waste Management*, 29, 485-489.

Alexander, C., 2020. Normalised difference spectral indices and urban land cover as indicators of land surface temperature (LST). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 86, 102013.

Almeida, C.M.D., Monteiro, A.M.V., Câmara, G., Soares-Filho, B.S., Cerqueira, G.C., Pennachin, C.L. and Batty, M., 2005. GIS and remote sensing as tools for the simulation of urban land-use change. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 759-774.

Almusaed., A., 2011. The urban heat island phenomenon upon urban components. *Biophilic and Bioclimatic Architecture*. Springer.

Amiri, R., Weng, Q., Alimohammadi, A. and Alavipanah, S.K., 2009. Spatial-temporal dynamics of land surface temperature in relation to fractional vegetation cover and land use/cover in the Tabriz urban area, Iran. *Remote sensing of environment*, 113, 2606-2617.

Artis, D.A. and Carnahan, W. H., 1982. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 12, 313-329.

Avdan, U. and Jovanovska, G., 2016. Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data. *Journal of Sensors*, 2016, 1480307.

Azimi, N., 2005. Restructuring Urban Morphology: A Case study of Rasht, Iran.

Baig, M.H.A., Zhang, L., Shuai, T. and Tong, Q., 2014. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters*, 5, 423-431.

Beck, H.E., Zimmermann, N.E., McVicar, T.R., Vergopolan, N., Berg, A. and Wood, E.F., 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific data*, 5, 180214.

Bek, M.A., Azmy, N. and Elkafrawy, S., 2018. The effect of unplanned growth of urban areas on heat island phenomena. *Ain Shams Engineering Journal*.

Bhatta, B., Saraswati, S. and Bandyopadhyay, D.,

2010. Quantifying the degree-of-freedom, degree-of-sprawl, and degree-of-goodness of urban growth from remote sensing data. *Applied Geography*. 30, 96-111.
- Chakraborty, S.D., Kant, Y. and Mitra, D., 2015. Assessment of land surface temperature and heat fluxes over Delhi using remote sensing data. *Journal of environmental management*. 148, 143-152.
- Chander, G., Markham, B.L. and Helder, D. L., 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*. 113, 893-903.
- CI, 2016. Census information, rasht: the statistical centre of iran. <https://www.amar.org.ir/english>.
- Clinton, N. and Gong, P., 2013. MODIS detected surface urban heat islands and sinks: Global locations and controls. *Remote Sensing of Environment*. 134, 294-304.
- Dadras, M., Shafri, H.Z.M., Ahmad, N., Pradhan, B. and Safarpour, S., 2015. Spatio-temporal analysis of urban growth from remote sensing data in Bandar Abbas city, Iran. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 18, 35-52.
- Duan, S., Luo, Z., Yang, X. and Li, Y., 2019. The impact of building operations on urban heat/cool islands under urban densification: A comparison between naturally-ventilated and air-conditioned buildings. *Applied Energy*. 235, 129-138.
- Echendu, A.J. and Okafor, P.C.C., 2021. Smart city technology: a potential solution to Africa's growing population and rapid urbanization?. *Development Studies Research*. 8, 82-93.
- El-Hattab, M., Amany, S. and Lamia, G., 2018. Monitoring and assessment of urban heat islands over the Southern region of Cairo Governorate, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 21, 311-323.
- ENVI, 2009. Atmospheric correction module: quac and flaash user's guide. Accessed 19 december 2014. [Www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/flaash](http://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/flaash).
- Ezimand, K., Azadbakht, M. and Aghighi, H., 2021a. Analyzing the effects of 2D and 3D urban structures on LST changes using remotely sensed data. *Sustainable Cities and Society*. 103216.
- Ezimand, K., Chahardoli, M., Azadbakht, M. and Matkan, A.A., 2021b. Spatiotemporal analysis of land surface temperature using multi-temporal and multi-sensor image fusion techniques. *Sustainable Cities and Society*. 64, 102508.
- Ezimand, K., Kakroodi, A.A. and Kiavarz, M., 2018. The development of spectral indices for detecting built-up land areas and their relationship with land-surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*. 39, 8428-8449.
- Fan, F., Wang, Y. and Wang, Z., 2008. Temporal and spatial change detecting (1998–2003) and predicting of land use and land cover in Core corridor of Pearl River Delta (China) by using TM and ETM+ images. *Environmental Monitoring and Assessment*. 137, 127-147.
- Firozjaei, M.K., Fatholouloumi, S., Kiavarz, M., Arsanjani, J.J. and Alavipanah, S.K., 2020. Modelling surface heat island intensity according to differences of biophysical characteristics: A case study of Amol city ,Iran. *Ecological Indicators*. 109, 105816.
- Firozjaei, M.K., Kiavarz, M. and Alavipanah, S.K., 2022. Impact of surface characteristics and their adjacency effects on urban land surface temperature in different seasonal conditions and

- latitudes. *Building and Environment*. 219, 109145.
- Ghosh, M.S., Kumar, D. and Kumari, R., 2022. Assessing spatiotemporal variations in land surface temperature and SUHI intensity with a cloud based computational system over five major cities of India. *Sustainable Cities and Society*. 104060.
- Gober, P., 2007. The Impact of the Phoenix Urban Heat Island on Residential Water Use AU - Guhathakurta, Subhrajit. *Journal of the American Planning Association*. 73, 317-329.
- Goldblatt, R., Deininger, K. and Hanson, G., 2018. Utilizing publicly available satellite data for urban research: Mapping built-up land cover and land use in Ho Chi Minh City, Vietnam. *Development Engineering*. 3, 83-99.
- Grigoraş, G. and Urişescu, B., 2019. Land Use/Land Cover changes dynamics and their effects on Surface Urban Heat Island in Bucharest, Romania. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 80, 115-126.
- Haashemi, S., Weng, Q., Darvishi, A. and Alavipanah, S.K., 2016. Seasonal variations of the surface urban heat island in a semi-arid city. *Remote Sensing*. 8, 352.
- Habitat, U., 2020. *WORLD CITIES REPORT 2020: The value of sustainable urbanization*. United Nations.
- Healey, S.P., Cohen, W.B., Zhiqiang, Y. and Krankina, O.N., 2005. Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection. *Remote Sensing of Environment*. 97, 301-310.
- Howard, L., 1833. The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it, Harvey and Darton, J. and A. Arch, Longman, Hatchard, S. Highley and R. Hunter.
- Huang, C., Wylie, B., Yang, L., Homer, C. and Zylstra, G., 2002. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. *International Journal of Remote Sensing*. 23, 1741-1748.
- Jaeger, J.A. and Schwick, C., 2014. Improving the measurement of urban sprawl: Weighted Urban Proliferation (WUP) and its application to Switzerland. *Ecological Indicators*. 38, 294-308.
- Jamei, Y., Rajagopalan, P. and Sun, Q., 2019. Spatial structure of surface urban heat island and its relationship with vegetation and built-up areas in Melbourne, Australia. *Science of The Total Environment*. 659, 1335-1351.
- Jiménez-Muñoz, J.C. and Sobrino, J.A., 2003. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 108.
- Kleerekoper, L., Van Esch, M. and Salcedo, T.B., 2012. How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *Resources, Conservation and Recycling*. 64, 30-38.
- Kloog, I., Chudnovsky, A., Koutrakis, P. and Schwartz, J., 2012. Temporal and spatial assessments of minimum air temperature using satellite surface temperature measurements in Massachusetts, USA. *Science of the total environment*. 432, 85-92.
- Kohler, M., Tannier, C., Blond, N., Aguejdad, R. and Clappier, A., 2017. Impacts of several urban-sprawl countermeasures on building (space heating) energy demands and urban heat island intensities. A case study. *Urban Climate*. 19, 92-121.

- Kuang, W., Du, G., Lu, D., Dou, Y., Li, X., Zhang, S., Chi, W., Dong, J., Chen, G. and Yin, Z., 2021. Global observation of urban expansion and land-cover dynamics using satellite big-data. *Science Bulletin*. 66, 297-300.
- Kumar, J.A.V., Pathan, S. and Bhanderi, R., 2007. Spatio-temporal analysis for monitoring urban growth—a case study of Indore city. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 35, 11-20.
- Li, H., Meier, F., Lee, X., Chakraborty, T., Liu, J., Schaap, M. and Sodoudi, S., 2018. Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin. *Science of The Total Environment*. 636, 818-828.
- Li, J., Song, C., Cao, L., Zhu, F., Meng, X. and Wu, J., 2011. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China. *Remote Sensing of Environment*. 115, 3249-3263.
- Li, T. and Meng, Q., 2018. A mixture emissivity analysis method for urban land surface temperature retrieval from Landsat 8 data. *Landscape and Urban Planning*. 179, 63-71.
- Li, Z., Goldstein, R. H. and Franseen, E. K., 2017. Meteoric calcite cementation: diagenetic response to relative fall in sea-level and effect on porosity and permeability, Las Negras area, southeastern Spain. *Sedimentary Geology*. 348, 1-18.
- Lilly Rose, A. and Devadas, M.D., 2009. analysis of land surface temperature and land use/land cover types using remote sensing imagery—a case in chennai city, india. The seventh International Conference on Urban Clim held on.
- Liu, Q., Liu, G., Huang, C., Liu, S. and Zhao, J., 2014. A tasseled cap transformation for Landsat 8 OLI TOA reflectance images. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE International*. 541-544.
- Liu, W., Zhan, J., Zhao, F., Yan, H., Zhang, F. and Wei, X., 2019. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: A case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China. *Ecological Indicators*. 98, 228-238.
- Liu, X., Huang, Y., Xu, X., Li, X., Li, X., Ciais, P., Lin, P., Gong, K., Ziegler, A.D. and Chen, A., 2020. High-spatiotemporal-resolution mapping of global urban change from 1985 to 2015. *Nature Sustainability*. 3, 564-570.
- Markham, B.L. and Helder, D.L., 2012. Forty-year calibrated record of earth-reflected radiance from Landsat: A review. *Remote Sensing of Environment*. 122, 30-40.
- Meng, Q., Zhang, L., Sun, Z., Meng, F., Wang, L. and Sun, Y., 2018. Characterizing spatial and temporal trends of surface urban heat island effect in an urban main built-up area: A 12-year case study in Beijing, China. *Remote Sensing of Environment*. 204, 826-837.
- Mitsova, D., Shuster, W. and Wang, X., 2011. A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation. *Landscape and Urban Planning*. 99, 141-153.
- Moazzam, M.F.U., Doh, Y.H. and Lee, B.G., 2022. Impact of urbanization on land surface temperature and surface urban heat Island using optical remote sensing data: A case study of Jeju Island, Republic of Korea. *Building and Environment*. 109368.
- Moghaddam, Y.J., Akhoondzadeh, M. and Saradjian, M., 2015. A split-window algorithm for estimating l_{st} from landsat-8 satellite images. *Journal of Geomatics Science and Technology*. 5, 215-226.

- Mohamed, A. and Worku, H., 2018. Quantification of the land use/land cover dynamics and the degree of urban growth goodness for sustainable urban land use planning in Addis Ababa and the surrounding Oromia special zone. *Journal of Urban Management*.
- Mushore, T.D., Odindi, J., Dube, T., Matongera, T.N. and Mutanga, O., 2017a. Remote sensing applications in monitoring urban growth impacts on in-and-out door thermal conditions: A review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 8, 83-93.
- Mushore, T.D., Odindi, J., Dube, T. and Mutanga, O., 2017b. Prediction of future urban surface temperatures using medium resolution satellite data in Harare metropolitan city, Zimbabwe. *Building and Environment*. 122, 397-410.
- Nakata-Osaki, C.M., Souza, L.C.L. and Rodrigues, D.S., 2018. THIS-Tool for Heat Island Simulation: A GIS extension model to calculate urban heat island intensity based on urban geometry. *Computers, Environment and Urban Systems*. 67, 157-168.
- Negah, S., 2016. Investigation of the PM10 and PM2.5 concentrations and meteorological parameters in dust emission hazard to the south west region of the Caspian Sea (Rasht city). *Caspian Journal of Applied Sciences Research*. 5.
- O'Lenick, C.R., Wilhelmi, O.V., Michael, R., Hayden, M.H., Baniassadi, A., Wiedinmyer, C., Monaghan, A. J., Crank, P.J. and Sailor, D.J., 2019. Urban heat and air pollution: A framework for integrating population vulnerability and indoor exposure in health risk analyses. *Science of The Total Environment*. 660, 715-723.
- Oke, T.R., 1973. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*. 7, 769-779.
- Oukawa, G.Y., Krecl, P. and Targino, A.C., 2022. Fine-scale modeling of the urban heat island: a comparison of multiple linear regression and random forest approaches. *Science of the total environment*. 815, 152836.
- Patra, S., Sahoo, S., Mishra, P. and Mahapatra, S.C., 2018. Impacts of urbanization on land use /cover changes and its probable implications on local climate and groundwater level. *Journal of Urban Management*. 7, 70-84.
- Pontius, R.G., 2000. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric engineering and remote sensing*. 66, 1011-1016.
- Qin, Z., Karnieli, A. and Berliner, P., 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International journal of remote sensing*. 22, 3719-3746.
- Rahman, M.T., Aldosary, A.S. and Mortoja, M., 2017. Modeling future land cover changes and their effects on the land surface temperatures in the Saudi Arabian eastern coastal city of Dammam. *Land*. 6, 36.
- Rajitha, K., Mukherjee, C., Vinu Chandran, R. and Prakash Mohan, M., 2010. Land-cover change dynamics and coastal aquaculture development: a case study in the East Godavari delta, Andhra Pradesh, India using multi-temporal satellite data. *International Journal of Remote Sensing*. 31, 4423-4442.
- Ramachandra, T., Bharath, H. and Sowmyashree, M., 2014. Urban Footprint of Mumbai-The Commercial Capital of India. *Journal of Urban and Regional Analysis*. 6, 71.
- Ramakreshnan, L., Aghamohammadi, N., Fong,

- C.S., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Wong, L.P., Hassan, N. and Sulaiman, N.M., 2018. A critical review of Urban Heat Island phenomenon in the context of Greater Kuala Lumpur, Malaysia. *Sustainable Cities and Society*. 39, 99-113.
- Roy, D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.R., Woodcock, C.E., Allen, R.G., Anderson, M.C., Helder, D., Irons, J.R., Johnson, D.M., Kennedy, R., Scambos, T.A., Schaaf, C.B., Schott, J.R., Sheng, Y., Vermote, E.F., Belward, A.S., Bindschadler, R., Cohen, W.B., Gao, F., Hipple, J.D., Hostert, P., Huntington, J., Justice, C.O., Kilic, A., Kovalskyy, V., Lee, Z.P., Lymburner, L., Masek, J.G., McCorkel, J., Shuai, Y., Trezza, R., Vogelmann, J., Wynne, R.H. and Zhu, Z., 2014. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*. 145, 154-172.
- Santamouris, M., 2020. Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings*. 207, 109482.
- Santamouris, M. and Kolokotsa, D., 2015. On the impact of urban overheating and extreme climatic conditions on housing, energy, comfort and environmental quality of vulnerable population in Europe. *Energy and Buildings*. 98, 125-133.
- Sejati, A.W., Buchori, I. and Rudiarto, I., 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*. 46, 101432.
- Seto, K.C., Güneralp, B. and Hutyra, L.R., 2012. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 109, 16083-16088.
- Shafizadeh-Moghadam, H., Tayyebi, A., Ahmadlou, M., Delavar, M.R. and Hasanlou, M., 2017. Integration of genetic algorithm and multiple kernel support vector regression for modeling urban growth. *Computers, Environment and Urban Systems*. 65, 28-40.
- Shen, H., Huang, L., Zhang, L., Wu, P. and Zeng, C., 2016. Long-term and fine-scale satellite monitoring of the urban heat island effect by the fusion of multi-temporal and multi-sensor remote sensed data: A 26-year case study of the city of Wuhan in China. *Remote Sensing of Environment*. 172, 109-125.
- Sobrino, J.A., Jimenez-Munoz, J.C. and Paolini, L., 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*. 90, 434-440.
- Sultana, S. and Satyanarayana, A.N.V., 2020. Assessment of urbanisation and urban heat island intensities using landsat imageries during 2000 – 2018 over a sub-tropical Indian City. *Sustainable Cities and Society*. 52, 101846.
- Sun, Y., Gao, C., Li, J., Li, W. and Ma, R., 2018. Examining urban thermal environment dynamics and relations to biophysical composition and configuration and socio-economic factors: A case study of the Shanghai metropolitan region. *Sustainable Cities and Society*. 40, 284-295.
- UN, 2018. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. United Nations New York.
- Wang, Z.-H. and Upreti, R., 2019. A scenario analysis of thermal environmental changes induced by urban growth in Colorado River Basin, USA. *Landscape and Urban Planning*. 181, 125-138.

- Weng, Q., Firozjaei, M.K., Sedighi, A., Kiavarz, M. and Alavipanah, S.K., 2019. Statistical analysis of surface urban heat island intensity variations: A case study of babol city, iran. *GIScience and remote sensing*. 56, 576-604.
- Weng, Q. and Yang, S., 2004. Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city. *Journal of Environmental Management*. 70, 145-156.
- Willmott, C.J., Robeson, S. M. and Matsuura, K., 2012. A refined index of model performance. *International Journal of climatology*. 32, 2088-2094.
- Wonorahardjo, S., Sutjahja, I.M., Mardiyati, Y., Andoni, H., Thomas, D., Achsani, R.A. and Steven, S., 2020. Characterising thermal behaviour of buildings and its effect on urban heat island in tropical areas. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 11, 129-142.
- Xu, H., 2010. Analysis of impervious surface and its impact on urban heat environment using the normalized difference impervious surface index (NDISI). *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 76, 557-565.
- Yang, X., Zheng, X.Q. and Lv, L.N., 2012. A spatiotemporal model of land use change based on ant colony optimization, Markov chain and cellular automata. *Ecological Modelling*. 233, 11-19.
- Yao, R., Wang, L., Huang, X., Niu, Z., Liu, F. and Wang, Q., 2017. Temporal trends of surface urban heat islands and associated determinants in major Chinese cities. *Science of The Total Environment*. 609, 742-754.
- Yuan, J., 2020. Investigation of Spatial and Temporal Changes in the Land Surface Albedo for the Entire Chinese Territory. *Geosciences*. 10, 362.
- Zha, Y., Gao, J. and Ni, S., 2003. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International journal of remote sensing*. 24, 583-594.
- Zhou, W., Jiao, M., Yu, W. and Wang, J., 2017. Urban sprawl in a megaregion: a multiple spatial and temporal perspective. *Ecological Indicators*.
- Zhou, X. and Chen, H., 2018. Impact of urbanization-related land use land cover changes and urban morphology changes on the urban heat island phenomenon. *Science of The Total Environment*. 635, 1467-1476.
- Ziter, C.D., Pedersen, E.J., Kucharik, C.J. and Turner, M.G., 2019. Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 116, 7575.
- Zullo, F., Fazio, G., Romano, B., Marucci, A. and Fiorini, L., 2019. Effects of urban growth spatial pattern (UGSP) on the land surface temperature (LST): A study in the Po Valley (Italy). *Science of The Total Environment*. 650, 1740-1751.





Environmental Sciences Vol.21 / No 3 / Autumn 2023

89-112

Original Article

Statistical analysis and predicting spatio-temporal variations of urban heat islands using remote sensing data

Keyvan Ezimand, Hossein Aghighi,*^{ORCID} Davod Ashourloo and Alireza Shakiba

Department of Remote Sensing and GIS, Remote Sensing and GIS Center, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

Received: 2022.12.11 Accepted: 2023.05.27

Ezimand, K., Aghighi, H., Ashourloo, D. and Shakiba, A., 2023. Statistical analysis and predicting spatio-temporal variations of urban heat islands using remote sensing data. *Environmental Sciences*. 21(3): 89-112.

Introduction: The urban heat island (UHI) as a climatic effect of urbanization can negatively impact the flora and fauna involved in urban and suburban ecosystems, the presence of pollutants, air quality, energy and water consumption, as well as human health and economy. Therefore, spatiotemporal analysis of the urban heat island changes has been considered an effective approach to understanding the impact of urbanization on the urban and suburban ecosystem, which also can support sustainable urban development and planning. Accordingly, this study contributes a novel approach to identifying the trend and predicting the pattern of UHI changes using statistical analysis, Shannon's entropy and chi-score statistics.

Material and methods: The study area of this research is the city of Rasht and its surroundings, a region located in the north of Iran. This research was implemented using remote sensing images from 1991 to 2021 that were collected by LANDSAT 5 and 8 with a fixed time interval of 10 years. All images were captured in the summer. In order to conduct this research in the pre-foresight stage, first, the required preprocessing, including atmospheric and radiometric corrections applied to the satellite images. Then, the surface biophysical characteristics of the study area were extracted from the satellite images. In the third step, the land surface

* Corresponding Author: *Email Address.* h_aghghi@sbu.ac.ir

<http://dx.doi.org/10.48308/envs.2023.1254>

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.17351324.1402.21.3.4.4>



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

temperature was computed using satellite images in 2021. In the fourth step, Multivariate linear regression between surface biophysical characteristics and the land surface temperature in 2021 was applied and then the cellular automata-Markov chain model was utilized to predict the land surface temperature for 2031. Finally, the pattern of changes in the urban heat island of Rasht city was investigated using statistical analysis in different geographic directions and different time periods.

Results and discussion: The results of this study indicate that the highest positive correlation ($R=0.89$) was between NDBI and LST. Moreover, the highest negative correlation ($R=-0.81$) was between the greenness and LST. Our results also showed that the lowest correlation ($R=0.42$) was between the brightness and LST. The predicted LST corresponding to surface biophysical characteristics using a multivariate linear regression model illustrates the low error of this approach ($RMSE=1.33K$) in 2021. This means that the predicted values in 2021 are close to the real values, and therefore, this model can be trusted to predict LST in 2031. Statistical analysis of the patterns of observed and expected changes in UHI clearly illustrated that Rasht urban expansion and the UHI expansion will consistently continue to increase from 1991 to 2031. However, the expansion rate changes over time and space. Moreover, these analyses also showed that the UHI of Rasht city has a high degree of freedom and a high degree of sprawl. Thus, and as a result, its degree of goodness is negative.

Conclusion: The pattern of UHI changes is highly dependent on the pattern of built-up land changes: as a result, sustainable development, resilience and environmental protection of Rasht requires direct monitoring and control of the pattern of urban growth, such as preventing changes in built-up areas and agricultural lands in suburban areas by incorporating a vertical form of development as well as constructing green roofs and walls and using high-reflectance building materials.

Keywords: Remote sensing data, Cellular automata-Markov chain modeling, Statistical analysis, Urban heat island (UHI).