

بررسی جزایر حرارتی تبریز با رویکرد زیست پذیری شهری

محمد آزادی مبارکی^۱، محمود احمدی^{*}

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۵

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۹/۴/۲۹

چکیده

یکی از مهم‌ترین جنبه‌های رشد سریع و بدون برنامه‌ریزی شهری، کاهش سطح پوشش گیاهی است که اغلب با سطوح غیرمجاز مانند ساختمان‌ها و سایر سطوح نفوذ ناپذیر جایگزین می‌شود. کلانشهر تبریز، یکی از مناطق شهری مهم است که با رشد سریع در شمال غرب ایران واقع شده است. در این مطالعه، تغییرات زمانی- مکانی دمای سطح زمین (LST) با استفاده از داده‌های ماهواره LANDSAT7 سنجنده ETM⁺ برای یک دوره ۱۵ ساله (۲۰۱۳-۱۹۹۹) با هدف زیست‌پذیری شهر تبریز و دسته‌بندی جزایر حرارتی شهری مطالعه شد. برای محاسبه UHI از رویکرد تکاملی فرکتال ویژه (FNEA) و همچنین برای وضعیت زیست محیطی شهری از روش قیاسی وضع بحرانی زیست محیطی (ECI) براساس LST و NDVI استفاده شد. نتایج نشان داد متوسط LST در کلان‌شهر تبریز بین ۳۰ تا ۴۳ درجه سلسیوس است و از سال ۲۰۱۰ به بعد بر مقدار انحراف معیار دمای سطح زمین افزوده شد؛ به طوری که مقدار بیش از ۴ درجه سلسیوس نیز برای LST مشاهده شد. تحلیل منطقه‌ای دما و پارامترهای موثر آن در کلان‌شهر تبریز نشان از همبستگی معنی داری بین LST با NDVI (منفی) و مناطق ساخته شده شهری (مثبت) وجود دارد. مهم‌ترین جزایر حرارتی شهری تبریز که با استفاده از روش FNEA آشکار شدند در فرودگاه تبریز، مناطق مسکونی پر تراکم همچون ملازینال، مناطق صنعتی جنوب غربی و پایانه‌های شهری تبریز دیده می‌شوند. شاخص ECI نشان داد سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۹ بیش‌ترین مناطق طاقت‌فرسا را دارند؛ مقادیر SUHI و ECI در کلان‌شهر تبریز دارای تطابق مکانی هستند؛ لذا فضاهای سبز می‌توانند به بهبود پایداری محیطی کلان‌شهر تبریز برای زیست‌پذیری شهری کمک شایان توجهی کنند.

واژه‌های کلیدی: جزایر حرارتی شهری، دمای سطح زمین، روش FNEA، زیست‌پذیری شهری، کلان‌شهر تبریز.

مقدمه

جزایر حرارتی شهری^۱ (UHI) یک مسئله جهانی است و عملکرد سکونت در شهرها و محیط‌های شهری را تهدید می‌کند. در سال‌های اخیر به دلیل تمرکز بیش‌تر شهرنشینی از یک طرف و گرمایش جهانی از سوی دیگر شاهد تغییرات گسترده‌ای در محیط زیست شهری هستیم و به عبارت دیگر زیست‌پذیری شهری در کلان‌شهرها مورد تهدید واقع شده است (Mohajerani et al, 2017). مطالعات اولیه که توسط سازمان هواشناسی جهانی (۱۹۸۴) و اوکی (Oke, 1982) انجام شد نشان داد که جزایر حرارتی شهری می‌تواند دمای هوا را در یک محیط شهری بین ۲ تا ۸ درجه سلسیوس افزایش دهد. برخی از این مطالعات نیز دامنه افزایش دما را بین ۵ تا ۱۵ درجه سلسیوس عنوان کردند (Santamouris, 2013). فرایند شهرنشینی، پوشش طبیعی زمین را در مقیاس وسیع به سطوح غیرقابل نفوذ تغییر می‌دهد. سطوح غیرقابل نفوذ افزایش یافته با ظرفیت‌های حرارتی مختلف تغییرات گسترده‌ای را بر محیط شهری اعمال می‌کنند (Lo et al, 1997). این امر باعث ایجاد یک سری عواقب زیست محیطی مانند تشکیل هوای مه آلود، بدتر شدن کیفیت هوا و مصرف انرژی اضافی در شهر می‌شود (Coseo and Larsen, 2014; Debbage et al, 2015). بر این اساس اثرات سوء جزایر حرارتی شهری بر زیست‌پذیری شهری تاثیر دارند را به این شرح می‌توان طبقه‌بندی کرد: ۱) افزایش قابل توجه تقاضای انرژی؛ ۲) تشکیل مقادیر زیادی از آلاینده‌ها و در نتیجه افزایش آزون تروپوسفری؛ ۳) افزایش تنش گرمایی بر ساکنان شهری و فشار بر اکوسیستم شهری و ۴) خطر ابتلا به مرگ و میر ناشی از گرما (Yang et al, 2015). بنابراین، کاهش جزایر حرارتی شهری به یکی از مهم‌ترین مباحث در

زمینه‌های اکولوژی شهری، محوطه سازی شهری، جغرافیای شهری و هواشناسی شهری تبدیل شده است. جزایر حرارتی شهری سطحی^۲ (SUHI) یکی از مباحث مهم در مطالعات آب و هوای شهری است؛ سطح زمین دارای ساختاری پیچیده است که می‌تواند ترکیبی از پوشش گیاهی، آب و مواد سطحی غیر قابل نفوذ و خاک باشد در نتیجه این پیچیدگی، دمای سطح زمین^۳ (LST) از نظر زمانی-مکانی دارای تغییرات زیادی است (Srivaniit and Hokao, 2012). به منظور تعیین دمای سطح از طریق تابش روش‌های گوناگونی توسعه یافته است؛ که هم‌اکنون نیز از این روش‌ها استفاده می‌شود؛ پس از آنکه وارک و همکارانش (Wark et al, 1962) از داده‌های ماهواره‌ای برای اندازه‌گیری دمای سطح زمین استفاده کردند و دریافتند که برآورد LST در مناطق بدون ابر و خشک امکان پذیر است این روش‌ها در سطح گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. در اصل LST و SUHI برای نخستین بار از داده‌های از AVHRR ماهواره NOAA مشتق شدند. پس از آن سنجنده‌های TM و ETM₊ به‌طور گسترده‌ای برای LST و SUHI مورد استفاده قرار گرفتند (Rasul et al, 2017). در این تحقیق نیز داده‌های چند زمانه LANSAT7 سنجنده ETM⁺ برای برآورد جزایر حرارتی شهری و شاخص بحران زیست محیطی منتج از LST و NDVI استفاده خواهد شد؛ علت استفاده از داده‌های این سنجنده طول دوره و پیوستگی آن است. اهمیت جزایر حرارتی شهری در سال‌های اخیر باعث شده است تا مطالعات بسیاری به ارزیابی این پدیده از جنبه‌های گوناگون بپردازند در ادامه به برخی از این مطالعات پرداخته خواهد شد. سینگ و گروور (Singh and Grover, 2015) همبستگی مکانی تغییرات کاربری اراضی و شاخص (NDVI) را در

ذخیره انرژی خورشیدی اثر گرمایشی دارند، در حالی که پوشش گیاهی از طریق ایجاد توازن گرمایی به وسیله تبخیر و تعرق و تولید سایه، دارای اثر خنک کننده هستند. صادقی نیا (۱۳۹۱) تغییرات فضایی - زمانی جزیره حرارتی تهران را از سال ۱۹۸۶ الی ۲۰۱۰، با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی تحلیل نمود. آن‌ها برای استخراج دما از باند حرارتی سنجنده TM استفاده کردند. نتایج تحلیل خودهمبستگی فضایی نشان داد، داده‌های دمای سطحی تهران دارای ساختار فضایی بوده و متغیر دما تمایل بیشتری به متمرکز شدن و خوشه‌ای شدن در فضا پیدا کرده است و در نتیجه تغییرات رخ داده در الگوی کاربری اراضی و پوشش زمین، شدت جزیره حرارتی تهران افزایش یافته است. احمدی و داداشی‌رودباری (۱۳۹۶) برای شناسایی جزایر حرارتی شهری مبتنی بر رویکرد زیست محیطی در کلان شهر اصفهان از داده‌های ماهواره لندست ۸ طی دوره ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد بیشترین حساسیت زیست محیطی در مناطق جنوبی شهر (منطقه ۶ شهری) و کمترین حساسیت زیست محیطی نیز در مرکز شهر (مناطق ۱ تا ۳ شهری) بود. احمدی و همکاران (۱۳۹۸) به پایش جزایر حرارتی شهری با رویکرد تکاملی فرکتال ویژه (FNEA) در کلان شهر تهران پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد جزایر حرارتی کلان شهر تهران با رویکرد FNEA به ۵ دسته جزایر حرارتی سرد، سرد درجه دوم، مناطق حرارتی متوسط، جزایر حرارتی گرم درجه دوم و جزایر حرارتی گرم دسته بندی شدند که به طور متوسط جزایر حرارتی گرم، ۹۵ کیلومترمربع و جزایر حرارتی سرد ۷۳ کیلومترمربع از کل مساحت کلان شهر تهران را به

ارتباط با دمای سطح زمین در دهلی نو، با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۷ طی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ بررسی نمودند و نشان دادند که مناطق ساخته شده شهری باعث افزایش دمای سطح زمین و مناطقی با پوشش گیاهی و درختی در مرکز شهر دهلی، کاهش دمای سطح زمین را به همراه داشته‌اند. مولانر (Molnár, 2016) برای بررسی توزیع فضایی دمای سطح زمین (LST) و ارتباط آن با شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در شهر بوداپست، از الگوریتم تک باندی استفاده نمود. نتایج تحقیق وی نشان داد که وجود پوشش گیاهی منجر به کاهش قابل توجه دمای سطح زمین گردیده است. کیکون و همکاران (Kikon et al, 2016) به ارزیابی جزایر حرارتی شهری Noida در هند با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای چند زمانه لندست ۷ طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ پرداختند؛ نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد مساحت شهری طی دوره مطالعه ۸۸/۳۵ کیلومتر مربع افزایش داشته است همچنین نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد تغییرات دما عمدتاً ناشی از توسعه غیر برنامه ریزی محیط شهر بوده است. ارزیابی توسعه شهری و جزایر حرارتی شهری در شهر Ho Chi Minh ویتنام با استفاده از داده‌های ماهواره لندست پژوهشی است که سون و همکاران (son et al, 2017) برای دوره زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۶ آن را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها حاکی از افزایش دما در این شهر بوده و همبستگی قوی (۰/۷۱) بین مناطق ساخته شده شهری و دمای سطح زمین دیده شد. در ایران نیز شکیبا و همکاران (۱۳۸۸) جزایر حرارتی شهر تهران را با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و با اثر نوع پوشش و کاربری زمین بر دمای سطح زمین استخراج نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد سطوح نفوذناپذیر از طریق جذب و

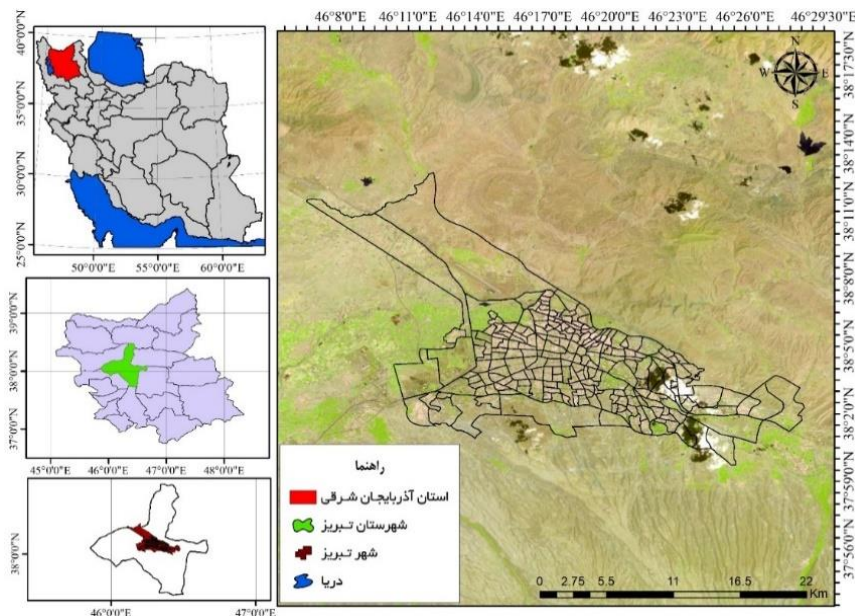
صحیح از جزایر حرارتی شهری و شاخص‌های زیست محیطی منتج از آن امری ضروری است. لذا در این تحقیق جزایر حرارتی شهری با رویکردی زیست‌پذیری در شهر تبریز مورد مطالعه قرار می‌گیرد؛ نتایج این تحقیق می‌تواند برای مطالعات مربوط به زیست‌پذیری شهری و برنامه‌ریزی شهری در کلان‌شهر تبریز مفید باشد.

منطقه مورد مطالعه

الف: موقعیت ریاضی منطقه مورد مطالعه

کلانشهر تبریز در استان آذربایجان شرقی با مختصات $38^{\circ}08'$ شمالی $46^{\circ}30'$ شرقی قرار گرفته است. این شهر، بزرگ‌ترین قطب اقتصادی در شمال‌غرب ایران است. در سال ۱۳۹۵ خورشیدی، جمعیت تبریز بالغ بر ۱۵۵۸۶۹۳ نفر بوده است. مساحت این شهر $250/590$ کیلومتر مربع و ارتفاع آن از سطح دریا بین ۱۳۴۸ تا ۱۵۶۱ متر است (Amiri et al, 2009) (شکل ۱).

خود اختصاص داده‌اند. جمع‌بندی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که تاکنون پژوهشی در شهر تبریز به مطالعه جزایر حرارتی شهری با رویکرد زیست محیطی انجام نشده است؛ لذا این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چند زمانه لندست ۷ سنجنده ETM⁺ طی یک دوره بلند مدت ۱۵ ساله (۲۰۱۳-۱۹۹۹) جزایر حرارتی شهر تبریز را با رویکرد زیست محیطی مطالعه می‌کند. تبریز یکی از مناطق شهری و در عین حال یکی از توسعه یافته‌ترین شهرهای ایران است. در سال‌های اخیر و در کنار شهرنشینی سریع، مشکل تنش حرارتی نیز در این شهر به یک مسئله جدی تبدیل شده است. متوسط دما در این شهر همانند سایر مناطق کشور به‌طور مداوم در حال افزایش است. جزایر حرارتی شهری همراه با هوای آلوده و درجه حرارت بالا، زیست‌پذیری شهری را در تبریز تهدید می‌کند. بهبود محیط حرارتی شهری موضوعی مشترک است که نگرانی دولت و شهروندان را به دنبال دارد. تحقق این امر با بهینه‌سازی برنامه‌ریزی شهری با توجه شناخت



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه (کلان‌شهر تبریز)

مواد و روش‌ها

در این پژوهش داده‌های ماهواره‌ای لندست ۷ (۱۹۹۹-۲۰۱۳) از پایگاه مربوط به آن دانلود شد (اطلاعات کامل در جدول ۱ آمده است) (ماهواره لندست ۷ در ۱۵ آوریل ۱۹۹۹ پرتاب شد و تا پرتاب ماهواره لندست ۸ در ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ به ارائه اطلاعات پرداخت که در پایگاه earthexplorer از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۳ برای این ماهواره داده موجود است؛ لذا بازه زمانی برای ماهواره لندست ۷ از پرتاب این ماهواره تا پرتاب ماهواره لندست ۸ در نظر گرفته شد)؛ سپس دمای سطح زمین با استفاده معادله دمای روشنایی محاسبه و جزایر حرارتی شهری با استفاده از روش FNEA استخراج شدند؛ همچنین از شاخص ECI نیز برای وضعیت زیست‌پذیری شهری استفاده شد که شرح هر یک در ادامه آمده است.

ب: (۱) پیش پردازش تصاویر

تصاویر منتخب دانلود شده (جدول ۱) از پایگاه earthexplorer از نظر هندسی هم‌مختصات (Co-register) هستند که بر این اساس از جهت رادیومتریکی تصحیح شده هستند. از آنجایی که تصاویر ماهواره LANDSAT7 براساس مقادیر رقومی پیکسل ارائه می‌شوند برای محاسبه مقادیر بازتابندگی و بازتابش از روی این تصاویر از فایل فراداده همراه تصاویر استفاده شد. مقادیر توابع اتمسفری Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 که از معادلات $\Psi_1 = \frac{1}{\tau}$ ، $\Psi_2 = -L_d - \frac{L_u}{\tau}$ و $\Psi_3 = L_d$ که به ترتیب نماینده τ ضریب عبور اتمسفری، L_d و L_u به ترتیب تابش اتمسفری رو به پایین و بالا هستند با استفاده از نرم‌افزار Atmospheric Correction Parameter محاسبه شدند. مقادیر محاسبه شده برای شهر تبریز در جدول ۱ ارائه گردید.

جدول ۱: پارامترهای محاسبه شده تصحیح اتمسفری شهر تبریز برای تصاویر منتخب

تاریخ	ساعت	τ	$L_u (W / m^2 / sr / \mu m)$	$L_d (W / m^2 / sr / \mu m)$
۱۹۹۹/۰۷/۱۲	۷:۲۵	۰/۷۸	۱/۴۹	۱/۸۹
۲۰۰۰/۰۷/۱۴	۷:۲۳	۰/۷۹	۱/۵۸	۲/۶۰
۲۰۰۱/۰۷/۰۲	۷:۲۱	۰/۸۵	۱/۱۲	۱/۹۱
۲۰۰۲/۰۷/۲۰	۷:۲۰	۰/۷۳	۱/۹۸	۳/۲۲
۲۰۰۳/۰۷/۰۴	۷:۲۱	۰/۹۵	۰/۳۴	۰/۵۹
۲۰۰۴/۰۷/۲۳	۷:۲۱	۰/۸۱	۱/۴۴	۲/۳۷
۲۰۰۵/۰۷/۱۲	۷:۲۱	۰/۶۹	۲/۴۰	۳/۷۹
۲۰۰۶/۰۷/۱۵	۷:۲۲	۰/۸۵	۱/۱۶	۱/۹۴
۲۰۰۷/۰۷/۱۶	۷:۲۲	۰/۸۰	۱/۵۸	۲/۵۷
۲۰۰۸/۰۷/۰۴	۷:۲۱	۰/۸۰	۱/۵۳	۲/۵۱
۲۰۰۹/۰۷/۰۷	۷:۲۲	۰/۷۳	۱/۹۰	۳/۱۰
۲۰۱۰/۰۷/۱۰	۷:۲۴	۰/۹۲	۰/۶۹	۱/۱۷
۲۰۱۱/۰۷/۱۳	۷:۲۵	۰/۷۶	۱/۹۳	۳/۲۱
۲۰۱۲/۰۷/۱۵	۷:۲۷	۰/۶۸	۲/۴۵	۳/۹۸
۲۰۱۳/۰۷/۱۶	۷:۲۸	۰/۸۱	۱/۶۱	۲/۶۹

ثابت h ، $h \times c / \sigma = 1/438 * 10^{-2} (mk)$ پلانک با مقدار $6.626 * 10^{-34} (j.sec)$ ، C معادل سرعت نور یعنی $2.998 * 10^8 (m/s)$ ، σ ثابت بولتزمن با مقدار $1/38 * 10^{-23} (j/k)$ و ε گسیل‌مندی است (Farina, 2012). میزان گسیل‌مندی در هر پیکسل مطابق رابطه ۳ محاسبه می‌گردد:

رابطه ۳)

$$\varepsilon = \varepsilon_v p_v + \varepsilon_s (1 - p_v) + d\varepsilon$$

که در رابطه فوق ε_v نشان‌دهنده میزان گسیل‌مندی پوشش گیاهی، ε_s نشان‌دهنده میزان گسیل‌مندی خاک و p_v نشان‌دهنده نسبت پوشش گیاهی می‌باشد.

ب: ۳) محاسبه جزایر حرارتی شهری (UHI)

پس از محاسبه LST از باند حرارتی سنجنده ETM^+ ماهواره لندست ۷، در مرحله بعد از رویکرد تکاملی فرکتال ویژه $(FNEA)^4$ برای تقسیم‌بندی LST استفاده شده است. این روش، بر پایه تقسیم‌بندی شی‌گرا تصویر، استوار است که از مجموعه فازی برای استخراج عارضه‌ها در مقیاس‌های خرد و کلان استفاده می‌کند. رویکرد FNEA، اطلاعات تصاویر را همانند فرکتال در طبیعت در نظر می‌گیرد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۸). در رویکرد FNEA پیکسل‌ها دوبه‌دو در به‌حداقل رساندن عدم هماهنگی مکانی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

ترکیب کلی که با f تعریف می‌شود براساس عدم تجانس طیفی (h_{color}) و عدم تجانس شکل (h_{shape}) به شرح رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

رابطه ۴)

$$f = p.h_{color} + (1 - p).h_{shape}$$

در رابطه ۴، p وزن تعریف شده طیف است (در برابر شکل) که بین $0 \leq p \leq 1$ قرار دارد. h_{color} معیار رنگ است که میانگین وزنی از تمام

ب: ۲) محاسبه دمای سطح زمین (LST)

پردازش‌هایی که برای محاسبه LST در این پژوهش دنبال شد به شرح زیر می‌باشد:

۱) تبدیل ارزش‌های رقومی تصویر به رادیانس طیفی (Chander and Groeneveld, 2009).

۲) تبدیل رادیانس طیفی به دمای روشنایی.

۳) تبدیل دمای روشنایی به دمای جنبشی (Chander and Markhan, 2003; Chander et

al, 2009) رابطه ۱ معادله دمای روشنایی را نشان می‌دهد.

$$TB = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{k_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

که در آن TB دمای درخشندگی به کلوین، $k_1 = 774.89$ و $k_2 = 1321.08$ مقادیر ثابت کالیبراسیون‌اند که از فراداده قابل دسترسی است (احمدی و داداشی رودباری، ۱۳۹۶). دمای روشنایی محاسبه شده برحسب جسم سیاه خواهد بود. نسبت بین گسیل‌مندی از یک جسم به گسیل‌مندی جسم سیاه، در دمای ثابت گسیل‌مندی یا تابندگی نامیده می‌شود و برای تبدیل دمای روشنایی به دمای جنبشی سطح ضروری است (علی آبادی و داداشی رودباری، ۱۳۹۶). در مرحله بعد مقدار گسیل‌مندی محاسبه گردید و در پایان برای محاسبه دمای سطح زمین به کار برده شد (Zhang et al, 2013). تصحیح گسیل‌مندی دمای سطح زمین، مطابق معادله رابطه ۲ محاسبه شد.

رابطه ۲)

$$T_s = \frac{TB}{(1 + (\lambda TB / \rho) \ln \varepsilon)}$$

که در آن T_s دمای سطح زمین (به کلوین)، T_B دمای روشنایی، λ طول موج رادیانس ساطع شده $(11.5 \mu m)$ ، ρ معادل است با

زمین از داده‌های عمق ۵ سانتی‌متری خاک ایستگاه سینوپتیک تبریز با روش‌های ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای اریبی (MBE) استفاده شد. مقدار RMSE برای LST ۰/۹۸۷ و مقدار MBE ۰/۵۴۶ محاسبه شد که نشان دهنده دقت بالای LST محاسبه شده در کلان شهر تبریز است.

نتایج

تغییرات آماری دمای سطح زمین در کلان شهر تبریز با استفاده داده‌های ماهواره لندست ۷
جدول ۲، مشخصه‌های آماری را برای دوره ۱۵ ساله تصاویر ماهواره لندست ۷ سنجنده ETM⁺ برای شهر تبریز ارائه داده است. همان‌گونه که در جدول نیز آمده است میانگین دمای سطح زمین برای بر شهر تبریز طی دوره ۲۰۱۳-۱۹۹۹ بین ۳۰ تا ۴۳ درجه سلسیوس است. کمینه LST ثبت شده در شهر تبریز با ۱۳/۴۰ درجه سلسیوس در ۲۰۰۲/۷/۲۰ به دست آمده و در مقابل بیشینه دمای سطح زمین به دست آمده نیز با ۴۳/۹۴ درجه سلسیوس در ۲۰۱۰/۷/۱۰ محاسبه شد. میانگین دمای سطح زمین در بیش‌تر تصاویر منتخب بین ۳۴ تا ۳۷ درجه سلسیوس به دست آمده است همچنین متوسط انحراف نیز برای LST در این کلان‌شهر حدود ۳ درجه سلسیوس است که در تباین دمایی شهر تبریز نقش مهمی را دارا می‌باشد. نکته مهمی که از پارامترهای آماری محاسبه شده برای LST در کلان شهر تبریز دیده می‌شود تغییرات آماره انحراف معیار است؛ همان‌طور که این آماره نشان داده است از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۹ تنها در سه سال انحراف معیار به ۳ درجه رسیده است و از سال ۲۰۱۰ این مقدار حتی به ۴ درجه سلسیوس نیز رسیده است.

دگرگونی‌ها را در انحراف استاندارد برای هر کانال ارائه می‌دهد و h_{shape} معیار شکل است (Pan, 2016).

ب: ۴) شاخص وضع بحرانی زیست‌محیطی (ECI)^۵

پوشش گیاهی به‌عنوان شاخصی برای پایداری اکولوژیکی در جامعه شهری در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که فقر پوشش گیاهی و افزایش دمای سطح زمین می‌تواند تأثیری منفی بر سطح شهر اعمال نماید ضروری است تا به شناسایی مناطق حساس زیست‌محیطی از نظر دمایی پرداخته شود (احمدی و داداشی رودباری، ۱۳۹۶). مقادیر *LST* و *NDVI* به‌طور مستقیم و معکوس متناسب وضع بحرانی زیست‌محیطی شهری را ارائه می‌دهند (Senanayake et al, 2013) شاخص قیاسی ECI در رابطه ۵ ارائه شد. در این روش مقادیر *LST* و *NDVI* در دسترس با استفاده از روش هیستوگرام از ۱ تا ۲۵۵ کشیده شده‌اند.

رابطه ۵)

$$ECL_{(LST-Veg)} = \frac{LST_{(stretched\ 1-255)}}{NDVI_{(stretched\ 1-255)}}$$

به‌منظور تعریف مقادیر آستانه تقریبی برای شاخص، مقادیر کمتر از لایه اول آستانه حاصل از کسر هیستوگرامی به‌عنوان مناطق پایین یا مناطقی غیر حساس نسبت به مناطق هم‌جوار در طول دوره آماری مورد مطالعه شناسایی شدند. این روش شناسایی مبتنی بر روش طبقه‌بندی چندک در سه طبقه بحرانی (در مجموع با مقدار پایین در چهار طبقه) مبتنی بر مقدار ارزشی هیستوگرام *LST* و در دسترس بودن پوشش گیاهی (*NDVI*) است (احمدی و داداشی رودباری، ۱۳۹۶). برای صحت‌سنجی داده‌های دمای سطح

انحراف معیار بزرگ بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها می‌باشد. این افزایش قابل توجه در مقدار انحراف معیار در ۴ سال پایانی داده‌های تحقیق به روشنی نشان دهنده خوشه‌ای شدن بیش‌تر دمای

سطح زمین در کلان‌شهر تبریز است که در نتیجه آن باید شاهد رشد بیش‌تر جزایر حرارتی شهری باشیم (جدول ۲).

جدول ۲: تغییرات دمای سطح زمین در شهر تبریز براساس داده‌های ماهواره لندست ۷

سال	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
۱۹۹۹	۲۱/۸۱۶	۴۵/۲۸۲	۳۷/۲۸۰	۲/۷۰۸
۲۰۰۰	۲۲/۸۴۲	۴۲/۶۷۱	۳۵/۱۹۴	۲/۵۶۷
۲۰۰۱	۲۲/۳۳۰	۵۰/۷۸۶	۴۳/۱۴۴	۳/۰۷۰
۲۰۰۲	۴۰/۳۱۳	۴۰/۹۰۳	۳۲/۸۳۳	۳/۶۷۷
۲۰۰۳	۱۴/۳۷۵	۳۸/۲۰۹	۳۰/۱۸۲	۲/۷۶۳
۲۰۰۴	۱۶/۵۵۰	۴۲/۲۲۱	۳۴/۷۵۰	۲/۹۲۰
۲۰۰۵	۲۵/۳۶۹	۴۵/۲۸۲	۳۶/۸۸۵	۲/۵۷۷
۲۰۰۶	۲۴/۸۶۷	۴۶/۹۹۸	۳۸/۸۴۳	۲/۷۹۰
۲۰۰۷	۲۲/۸۴۲	۴۲/۶۷۱	۳۳/۷۷۹	۲/۵۰۴
۲۰۰۸	۱۸/۶۸۵	۴۱/۷۹۰	۳۲/۲۷۵	۳/۱۲۸
۲۰۰۹	۷/۵۷۸۱	۳۳/۵۹۸	۱۲/۰۶۳۱	۲/۴۹۷
۲۰۱۰	۲۳/۳۵۱	۵۴/۰۷۸	۴۳/۹۴۵	۴/۰۷۰
۲۰۱۱	۲۲/۸۴۲	۴۳/۵۴۶	۳۴/۵۳۴	۳/۵۹۳
۲۰۱۲	۲۰/۲۶۱	۴۰/۴۵۸	۳۱/۷۸۳	۳/۷۰۱
۲۰۱۳	۲۰/۷۸۲	۴۳/۱۰۹	۳۴/۵۲۸	۴/۱۵۰

توزیع زمانی - مکانی دمای سطح زمین کلان شهر تبریز

دمای سطح زمین محاسبه شده در شکل ۳ برای ۱۵ تصویر منتخب نشان داده شد. که بر این اساس شمال شهر تبریز که محدوده فرودگاه تبریز را در بر می‌گیرد در طبقه‌بندی کاربری شهری (شکل ۲) متعلق به کاربری‌های حمل و نقل و مسافرتی است که بیشینه دمای کل شهر تبریز (بیشینه سری زمانی با ۵۴/۰۷ درجه سلسیوس در سال ۲۰۱۰ و متوسط بلند مدت ۴۳ درجه سلسیوس) را در تمامی تصاویر دارا می‌باشد. همچنین زمین‌های اطراف این مناطق را اراضی بایر و متروک در بر می‌گیرند که به دلیل داشتن زمین‌های لخت با بازتاب انرژی بیشتری (متوسط

دمای زمین‌های لم‌یزرع ۴۰/۵۸ درجه سلسیوس میزان دمای ثبت شده در آن‌ها زیاد است. همچنین محدوده وسیعی از جنوب غرب شهر، صنعتی و کارگاهی (شکل ۲) (متوسط بلند مدت ۴۱/۶۵ درجه سلسیوس) است، دمای سطح زمین در آن بالاست. کاربری‌های نظامی و انتظامی (متوسط بلند مدت ۳۸/۳۶ درجه سلسیوس) نیز در نقشه‌های دمای سطح زمین ارائه شده دارای بالایی هستند که به شکل پراکنده و نواری از جنوب غرب تا جنوب تبریز کشیده شده‌اند که در قسمت جنوبی شهر به شکل یک نوار قرمز رنگ با دمای مشخص گردید. در منتهی‌الیه قسمت شمال غرب و جنوب شرق شهر تبریز، که دارای

مناطق با ترافیک بیش‌تر دمایی بالاتری را نیز نشان دهند. در غرب تبریز نقش شبکه راه‌ها با کاربری‌های مختلف را می‌توان دید؛ به‌طوری‌که جاده سنتو و راه‌آهن تبریز که موازی یکدیگر پیش می‌روند؛ راه آهن دمای به مراتب کمتری را نسبت به جاده آسفالت‌ه ارائه داده است امر به دلیل متجانس بودن دو مسیر از یک‌سو و تفاوت گسیل-مندی سطح از سوی دیگر است. نقش آب و هوای خرد شهری در تعدیل دما به خصوص در شبکه راه‌ها را می‌توان در شهرک ولیعصر تبریز مشاهده کرد. در این منطقه به دلیل سایه حاصل از ساختمان‌های مرتفع اطراف، فضای سبز مناسب کناره جاده و قرارگیری در ارتفاعی مناسب از سطح دریا در این کاهش دما نقش مهمی دارند. شبکه ارتباطی موجود در محلات شمال و شمال شرق تبریز مانند ملازنیال، مناطق اطراف خیابان انقلاب و پاسداران که جز مناطق پرتراکم محسوب می‌شوند و همچنین به دلیل نداشتن پوشش گیاهی مناسب، عدم وجود سایه و قرارگیری در دامنه‌ها رو به آفتاب دمای بالایی را دارند.

جزایر حرارتی کلان شهر تبریز رویکرد تکاملی

فرکتال ویژه

جزایر حرارتی کلان‌شهر تبریز برای ماه ژولای در دوره ۱۵ ساله ۲۰۱۵-۱۹۹۹ با رویکرد تکاملی فرکتال ویژه (FNEA) محاسبه و در شکل ۴ و درصد تغییرات هر یک از کلاس‌ها در جدول ۳ ارائه شد. جزایر حرارتی در این رویکرد به ۶ دسته جزایر حرارتی سرد، جزایر حرارتی سرد درجه دوم، جزایر حرارتی سرد درجه سوم، جزایر حرارتی گرم درجه دوم و سوم و جزایر حرارتی گرم دسته‌بندی شدند.

کاربری اراضی بایر با زمین‌های بدون پوشش گیاهی و یا پوشش گیاهی کم می‌باشند، بیشینه دمای ثبت شده مشاهده می‌شود (متوسط بلند مدت بیش از ۳۵ درجه سلسیوس). جنوب غرب شهر تبریز، محدوده شهرک اندیشه دارای پوشش گیاهی و باغات وسیعی در سطح منطقه می‌باشد دمای سطح زمین در این منطقه به نسبت کل شهر تبریز پایین بوده (بین ۱۰ تا ۱۵ درجه سلسیوس) و همان‌طور که گفته شد نقش درختان و پوشش گیاهی در این منطقه قابل بحث است. از طرف دیگر همان‌طور که در روش کار نیز آمده است تمامی تصاویر مربوط به ماه ژولای در تابستان می‌باشد لذا میزان پوشش گیاهی نیز به تکامل رسیده است. از دیگر مناطق دارای دمای کمینه که تقریباً در مرکز شهر واقع شده‌اند، منطقه هفده شهریور است. این منطقه دارای کاربری مسکونی است، اما به دلیل وجود پوشش گیاهی در این منطقه دمای سطح زمین محاسبه شده نسبت به سایر مناطق شهری تبریز کمتر است. شش‌گلان در شرق شهر تبریز به دلیل وجود خانه‌های ویلایی و پوشش گیاهی مناسب دارای دمای سطح زمینی به نسبت پایینی در مقایسه به کل شهر است. شبکه راه‌ها نیز یکی از کاربری‌های (شکل ۲) مهم در افزایش دمای سطح زمین هستند و نقش مهمی در ایجاد جزایر حرارتی شهری از نوع خطی دارند. دمای سطح زمین در شبکه راه‌ها تحت‌تاثیر مناطق اطراف خود است به طوری که اگر یک جاده یا بزرگراه از فضای سبز عبور کند دمای چندان بالایی نخواهد داشت اما در مقابل اگر همین مسیر از یک منطقه خشک و یا کاربری بایر عبور کند دمای بالایی خواهد داشت. ترافیک نیز یکی دیگر عوامل مهم در افزایش دمای سطح می‌باشد و طبیعی است که

تغییرپذیری دما در اراضی شهری بسیار کمتر از سایر کاربری‌ها می‌باشد؛ همچنین روند افزایشی دما از مقادیر کمینه به بیشینه در سطح شهر تبریز به کندی صورت می‌گیرد، ولی هر چه از مرکز به حواشی شهر پیش برویم دما با سرعت زیادی افزایش می‌یابد؛ تغییرات مکانی و شدت جزیره حرارتی در تبریز دارای تغییرپذیری بالایی است که می‌تواند منتج از کاربری‌های شهری باشد. در شهر تبریز مناطقی با کاربری پارک و فضای سبز دمای سطح زمین پایینی را ارائه داده‌اند این مناطق در سطح شهر پراکنده هستند. دانشگاه تبریز به دلیل وجود پوشش گیاهی زیادی که در آن وجود دارد دمای پایینی (با متوسط بلند مدت ۱۵/۲۳ درجه سلسیوس) را ارائه کرده است. ائل‌گلی در جنوب‌شرق تبریز به دلیل پوشش گیاهی بالا، فضای سبز قابل توجه و پهنه‌های آبی LST پایینی را نشان داد.

همچنین شهرک ولیعصر در جنوب‌شرق شهر، مناطق رخاب و سیلاب، اراضی کشاورزی جنوب-شرقی، منطقه باغشمال و زمین‌های کشاورزی قراملک نیز از مناطقی هستند که دمای پایینی را نشان دادند.

جزایر حرارتی مهم تبریز که براساس داده‌های ماهواره‌ای چند زمانه لندست ۷ سنجنده ETM⁺ شناسایی شدند عبارتند از: فرودگاه تبریز که بزرگترین جزیره حرارتی در سطح شهر است؛ مناطق صنعتی جنوب‌غرب شهر؛ ایستگاه راه آهن، بازار تبریز، مناطق مسکونی پر تراکم مانند ملا زینال و مناطق تعمیرگاهی و پایانه‌های شهری تبریز. مناطقی از شهر که دمای پایینی را ارائه دادند عبارتند از اراضی کشاورزی و باغات؛ باغ فجر، پارک ائل‌گلی و محدوده آبی آن؛ شهرک ولیعصر و پردیس دانشگاه تبریز (شکل ۴).

نتایج نشان داد جزایر حرارتی گرم به غیر از سال ۲۰۰۰ و ۲۰۱۱ در سایر تصاویر منتخب کمتر از ۱۰ درصد را مناطق شهری تبریز را در بر می‌گیرند. جزایر حرارتی سرد درجه سوم که به نوعی نشان دهنده مناطقی با دمای متوسط هستند بیش‌ترین درصد مساحت را بین جزایر حرارتی استخراج شده را به خود اختصاص داده‌اند و پس از آن جزایر حرارتی گرم درجه سوم قرار دارند. جزایر حرارتی سرد و گرم درجه سوم به نوعی نمایانگر مناطق دمایی نزدیک به نرمال بالا و پایین هستند رشد این مناطق دمایی از کانونی شدن دما در سطح شهر می‌کاهد.

جزایر حرارتی سرد و گرم درجه دوم به لحاظ مکانی بین مناطقی با دمای خیلی بالا و پایین قرار دارند. این مناطق نقش کلیدی را در کاهش یا افزایش جزایر حرارتی دارند. به طوری که اگر سیاست‌های کاهش و تعدیل دما در سطح شهر صورت نگیرد این مناطق در کوتاه مدت می‌توانند تبدیل به جزایر حرارتی گرم شوند و در مقابل نیز اگر در مناطقی که در این پژوهش به عنوان جزایر حرارتی سرد درجه دوم شناخته شدند؛ سیاست‌های مربوط به فضای سبز، بام سبز و غیره صورت گیرد؛ مناطق نامبرده نیز قابلیت تبدیل به جزایر حرارتی سرد شهری و به عبارت دیگر مناطقی با زیست‌پذیری بالا تبدیل می‌شوند. ارزیابی منطقه-ای از جزایر حرارتی شهر تبریز نشان داد؛ جزیره حرارتی براساس دمای کمینه سطح زمین نسبت به بیشینه و میانگین در شهر تبریز شدیدتر می‌باشد زیرا دماهای کمینه بیشتر تحت‌تأثیر کاربری‌های شهری قرار می‌گیرد و توسعه شهرنشینی می‌تواند روند افزایشی دماهای کمینه شهرها را تشدید کند (رنجبر سعادت آبادی و همکاران، ۱۳۸۴).

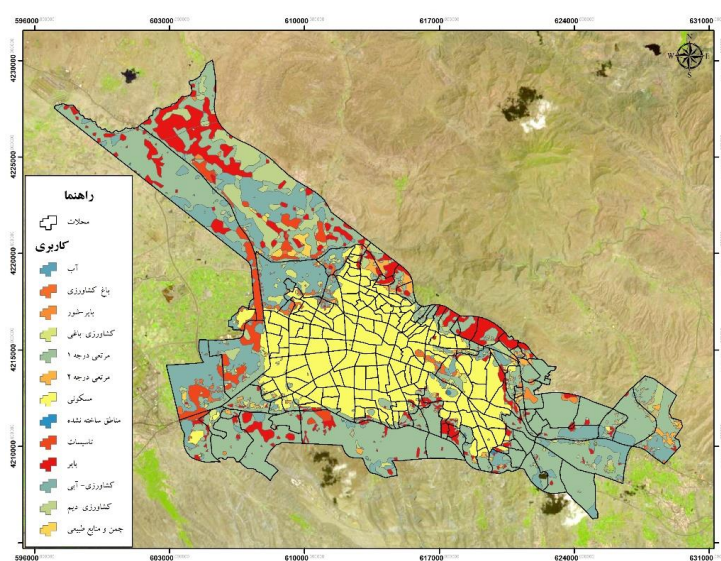
شاخص وضع بحرانی زیست محیطی (ECI) کلان

شهر تبریز با استفاده تصاویر لندست ۷

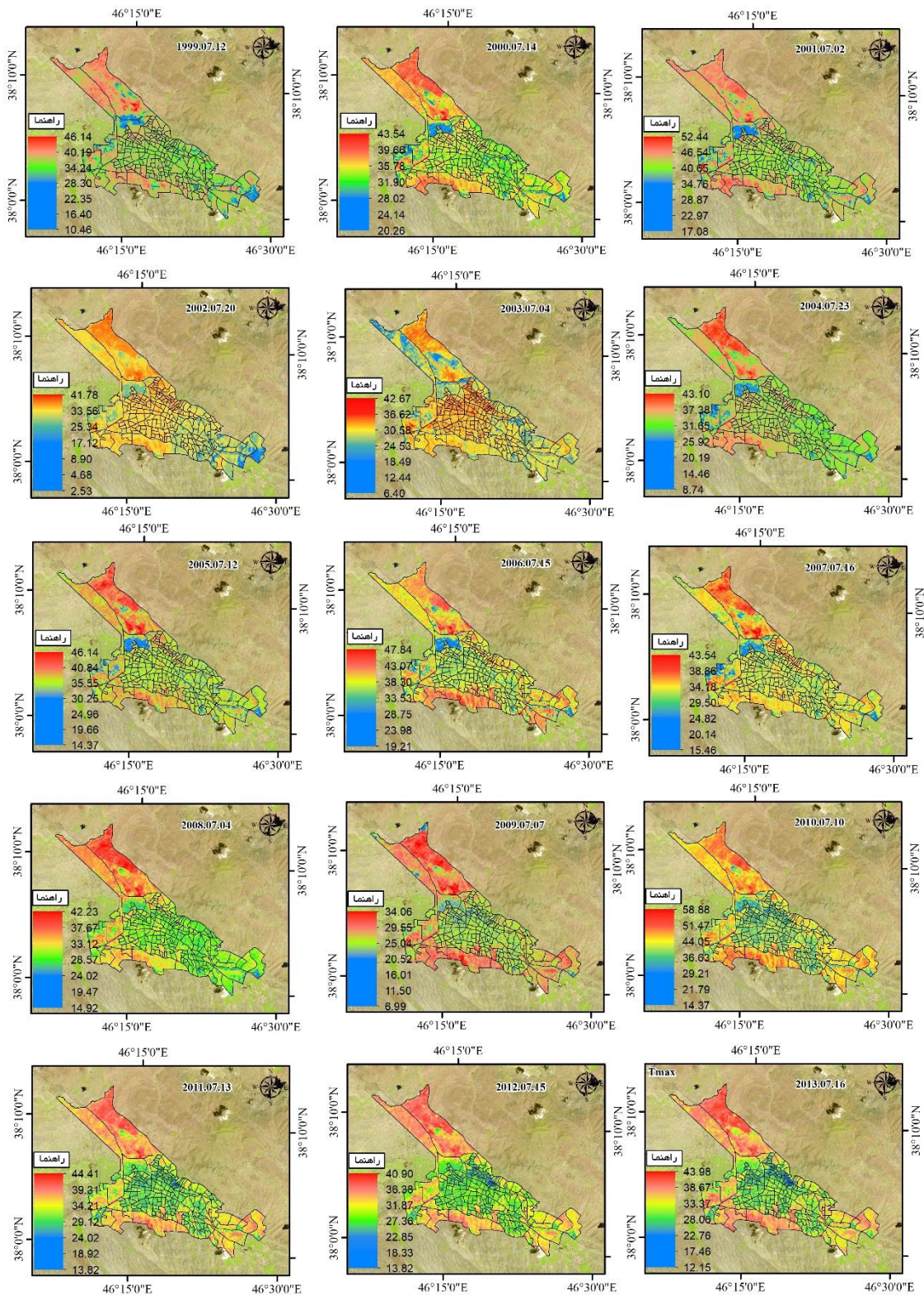
شکل ۵ شاخص وضع بحرانی زیست محیطی (ECI) را برای دوره ۱۵ ساله شهر تبریز نشان داده است. بالاترین حساسیت زیست محیطی در مناطق شمالی و جنوبی شهر و پس از آن در مناطق جنوب شرقی شهر قرار دارند. عدم وجود پوشش گیاهی و وجود جزایر حرارتی گرم که در نقشه های مربوط به LST و UHI به ارزیابی آنها پرداخته شد به تشدید حساسیت های زیست محیطی این مناطق دامن زده است. در بین تصاویر منتخب سال های ۲۰۰۲، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۹ بیشترین مناطق طاقت فرسا را دارا می باشند شناسایی جزایر حرارتی شهری و مناطق بحرانی کلان شهر تبریز می تواند نقش مهمی در زیست پذیری شهری آینده داشته باشد. همان طور که در بخش ابتدایی نتایج برای نقشه های LST بحث شد یکی از منابع اصلی جزایر حرارتی شهری تبریز زمین های بایر، شبکه های ارتباطی و مناطق مسکونی متراکم هستند که به شکل جزایر حرارتی نقش آفرینی می کنند لذا با اعمال

سیاست های ایجاد مناطق سبز با گیاهان بومی و سازگار با آب و هوای منطقه می توان تا حد زیادی از اثرات سو این پدیده جلوگیری کرد. بررسی دمای سطح زمین در سطح شهر تبریز نشان داد که نوع کاربری شهری در تغییر پذیری دمای سطح نقش تعیین کننده ای دارد. به طوری که فضای سبز پس از محدوده های آبی دومین کاربری خنک محسوب می شوند. در مقابل مناطق ساختمانی، شبکه راه ها، زمین های بایر به ترتیب در کاربری های گرم قابل طبقه بندی هستند. نقش مهم پوشش گیاهی در کاهش دما به دلیل تبدیل اشعه خورشید به گرمای نهان است.

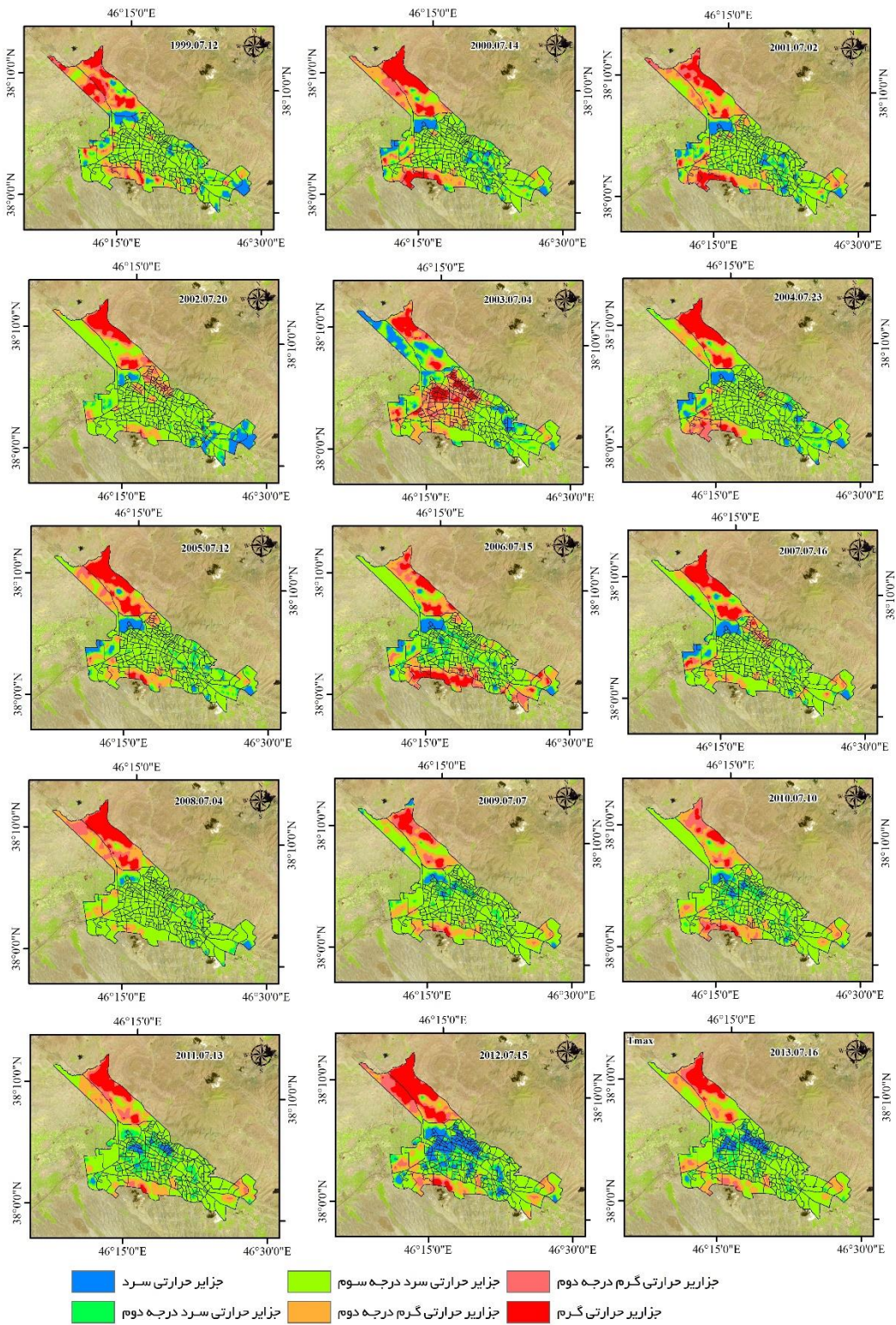
در این سازوکار فضای سبز اشعه خورشیدی را صرف تعرق کرده و انرژی مصرف شده برای تعرق گیاه به شکل گرمای نهان ظاهر می شود. افزایش گرمای نهان نیز باعث کاهش گرمای محسوس شده و از آنجایی که که گرمای محسوس با دمای محیط رابطه مستقیمی دارد کاهش آن نیز طبیعتاً باعث کاهش دمای محیط می شود (شکل ۵).



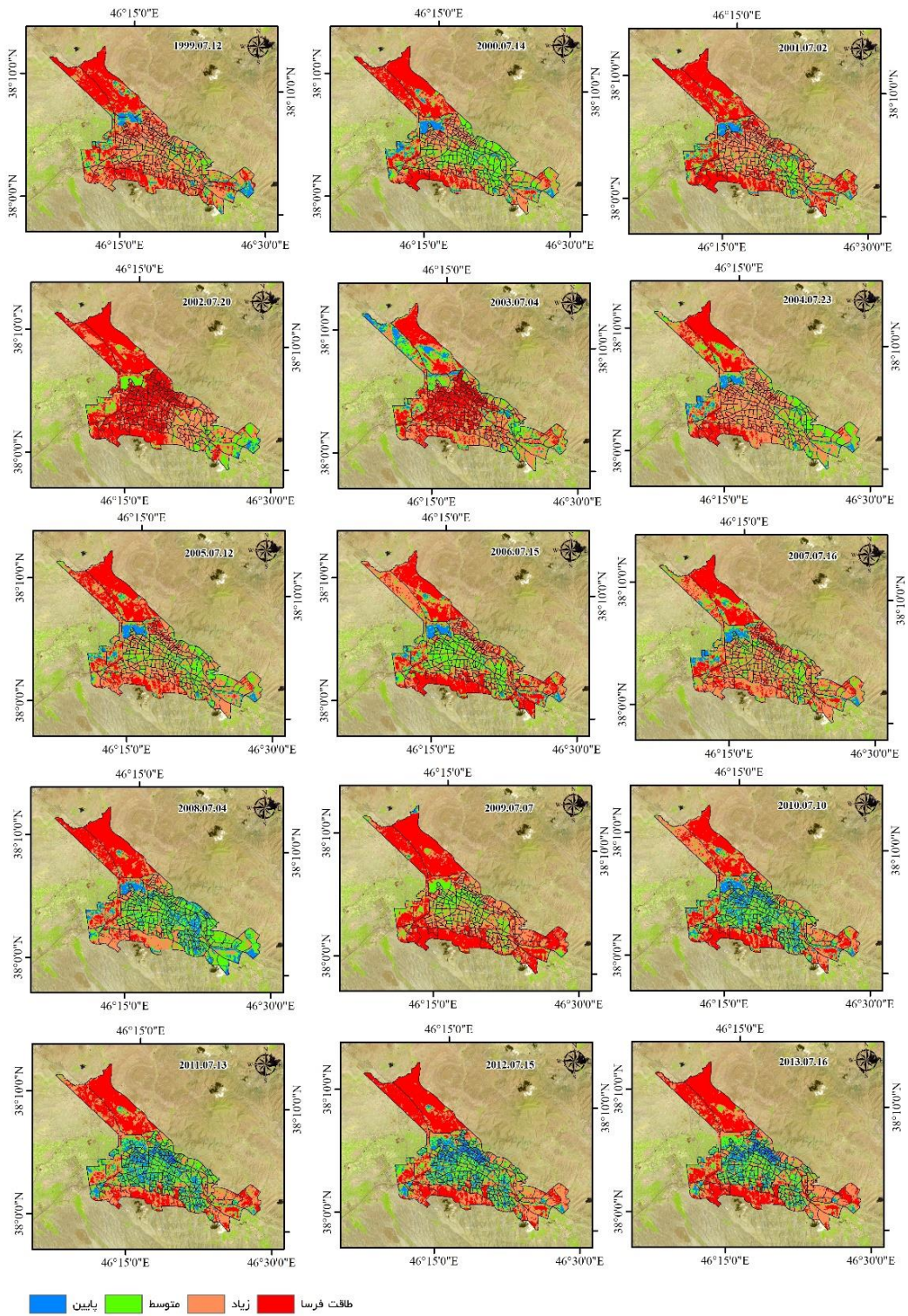
شکل ۲: کاربری اراضی شهر تبریز



شکل ۳: تغییرات زمانی - مکانی دمای سطح زمین شهر تبریز با استفاده از داده‌های لندست ۷



شکل ۴: جزایر حرارتی شهر تبریز با رویکرد تکاملی فرکتال ویژه (FNEA) با استفاده تصاویر لندست ۷



شکل ۵: شاخص وضع بحرانی زیست محیطی (ECI) کلان شهر تبریز با استفاده از تصاویر لندست ۷

جدول ۳: درصد تغییرات جزایر حرارتی شهر تبریز با رویکرد تکاملی فرکتال ویژه (FNEA)

تاریخ	جزایر حرارتی سرد	جزایر حرارتی سرد درجه دوم	جزایر حرارتی سرد درجه سوم	جزایر حرارتی گرم درجه دوم	جزایر حرارتی گرم
۱۹۹۹/۷/۱۲	۶/۶۸	۴/۳۶	۵۹/۱۲	۷/۲۲	۷/۴۴
۲۰۰۰/۷/۱۴	۵/۸۶	۷/۰۱	۵۴/۳۵	۶/۲۳	۱۰/۷۶
۲۰۰۱/۷/۲	۵/۹۶	۶/۲۲	۵۳/۸۹	۷/۳۰	۷/۵۶
۲۰۰۲/۷/۲۰	۶/۵۸	۵/۱۸	۶۵/۴۶	۳/۸۸	۶/۶۴
۲۰۰۳/۷/۴	۹/۱۵	۶/۸۷	۴۶/۵۴	۸/۷۸	۸/۰۵
۲۰۰۴/۷/۲۳	۶/۲۱	۵/۱۴	۶۲/۰۴	۵/۰۰	۹/۷۴
۲۰۰۵/۷/۱۲	۵/۴۰	۵/۶۱	۵۷/۹۰	۴/۶۸	۹/۳۸
۲۰۰۶/۷/۱۵	۵/۴۹	۸/۴۲	۵۰/۳۰	۸/۱۱	۸/۲۰
۲۰۰۷/۷/۱۶	۵/۲۲	۳/۶۳	۶۳/۸۹	۳/۸۴	۸/۶۱
۲۰۰۸/۷/۴	۱/۰۸	۳/۷۹	۶۹/۱۱	۵/۲۱	۸/۶۵
۲۰۰۹/۷/۷	۲/۴۸	۵/۵۰	۶۸/۳۴	۴/۸۲	۴/۱۷
۲۰۱۰/۷/۱۰	۲/۷۲	۷/۹۶	۶۲/۹۷	۶/۹۹	۲/۸۷
۲۰۱۱/۷/۱۳	۲/۷۷	۱۰/۵۷	۶۰/۶۸	۴/۴۷	۶/۴۰
۲۰۱۲/۷/۱۵	۱۳/۱۵	۱۰/۳۱	۴۱/۲۲	۷/۴۹	۱۳/۱۵
۲۰۱۳/۷/۱۶	۴/۸۷	۸/۱۶	۶۱/۰۶	۴/۹۴	۵/۴۴

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، الگوهای فضایی LST در UHI را برای پدیده SUHI با استفاده از داده‌های ماهواره لندست ۷ سنجنده ETM⁺ طی دوره آماری ۱۵ ساله (۲۰۱۳-۱۹۹۹) بررسی شد. صحت سنجی داده‌های سطح زمین نشان داد مقدار RMSE برای LST ۰/۹۸۷ و مقدار MBE ۰/۵۴۶ محاسبه شد که نشان دهنده دقت بالای LST محاسبه شده طی دوره آماری مورد مطالعه بوده است. نتایج نشان داد نشانه‌هایی از شدت بخشیدن به اثرات SUHI، به ویژه در دوره ۲۰۱۰-۲۰۱۳ که شهرنشینی دارای رشد بیش‌تری بود، وجود دارد. بیشینه انحراف از معیار طی دوره مطالعه در سال-های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ دیده شد به طوری که در سال ۲۰۱۰ مقدار انحراف معیار ۴/۰۷۰ و در سال ۲۰۱۳ که سال پایانی اخذ داده توسط سنجنده بوده به ۴/۱۵۰ درجه سلیسوس رسیده است. کمینه LST با ۱۳/۴۰ درجه سلیسوس در سال

۲۰۰۲ و بیشینه آن با ۴۳/۹۴ درجه سلیسوس نیز در سال ۲۰۱۰ محاسبه شد. همبستگی مثبت و معناداری بین LST و مناطق ساخته شهری دیده شد که تأثیر قوی شهرنشینی در تشکیل SUHI در تبریز تأیید شده است. پوشش گیاهی و بهبود مستمر آن در کاهش اثرات گرمایش SUHI کمک مهمی می‌کند. جزایر حرارتی مهم تبریز که با استفاده از داده‌های ماهواره لندست ۷ سنجنده ETM⁺ شناسایی شدند عبارتند از: فرودگاه تبریز (بزرگترین جزیره حرارتی در سطح شهر)؛ مناطق صنعتی جنوب غرب شهر؛ ایستگاه راه آهن، بازار تبریز، مناطق مسکونی پر تراکم مانند ملازینال و مناطق تعمیرگاهی و پایانه‌های شهری تبریز. نقشه ECI تولید شده در این مطالعه نیز گویای رابطه تنگاتنگ LST و NDVI بوده است که بر این اساس فضاهای سبز شهری نیز مؤلفه‌ای مهم در مفهوم توسعه پایداری شهری هستند. نتایج به دست آمده توسط احمدی و داداشی رودباری

پیشرفت‌های پیش‌بینی شده برای رشد شهری خواهد بود. توجه بیشتر به فضای سبز بسیار مهم است زیرا فضای سبز می‌تواند به کاهش اثرات گرمایش شهری کمک کند لذا دستاوردهای این پژوهش برای چشم‌انداز توسعه شهری تبریز بسیار مهم است. همچنین پیشنهادهای کاربردی، گسترش و ایجاد فضای سبز کمربندی در اطراف شهر و درون شهر تبریز، جهت کاهش آفتاب‌گیری آسفالت‌های خیابان و غیره و طراحی الگوی بهینه مسکن هم‌ساز با آب و هوای شهر تبریز به منظور کاهش ضرورت استفاده از دستگاه‌های مکانیکی، سبب افزایش دمای شهر می‌شوند باید در سطح شهر جهت افزایش زیست‌پذیری شهری عملی گردد.

(۱۳۹۶) در شهر تبریز و احمدی و همکاران (۱۳۹۸) در کلان شهر تهران در تایید نتایج به دست آمده در این تحقیق برای کلان شهر تبریز است. همچنین سنانایاک و همکاران (۲۰۱۳) (Senanayake et al, 2013) نیز که شاخص ECI را در کلان شهر Colombo در سریلانکا مورد مطالعه قرار دادند این رابطه قوی را تایید کردند. شاخص ECI می‌تواند به عنوان یک شاخص مکمل در مطالعات زیست‌پذیری شهری با اطمینان بالایی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین تغییرات ECI را می‌توان در خصوص تنش‌های زیست‌محیطی در محیط‌های شهری به کار برد. چالش اساسی در خصوص UHI و ECI در کلان شهر تبریز دسترس بودن زمین برای مسکن و همچنین برنامه‌های منطقه‌بندی به منظور تسهیل

پانوش

- 1-Urban Heat Island (UHI)
- 2-Surface urban heat islands (SUHI)
- 3-Land Surface Temperature (LST)

- 4-Fractal Net Evolution Approach (FNEA)
- 5-Environmental Criticality Index (ECI)

منابع

شهرنشینی روی وضع هوا و اقلیم محلی در کلان شهر تهران براساس داده‌های مهرآباد و ورامین، مجله محیط‌شناسی، شماره ۳۹، ص ۵۹-۶۸.

-شکیبا، ع.، ضیائیان فیروز آبادی، پ.، عاشورلو، د. و نامداری، س.، ۱۳۸۸. تحلیل رابطه کاربری و پوشش اراضی و جزیره حرارتی شهر تهران با استفاده از داده‌های ETM+، سنجش از دور GIS ایران، شماره ۱، ص ۳۹-۵۶.

-صادقی نیا، ع.، ۱۳۹۱. تحلیل فضایی-زمانی ساختار جزیره حرارتی تهران با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران.

-احمدی، م. و داداشی رودباری، ع.، ۱۳۹۶. شناسایی جزایر حرارتی شهری مبتنی بر رویکرد زیست‌محیطی، مطالعه موردی (کلان شهر اصفهان)، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۳، ص ۱-۲۰.

-احمدی، م.، داداشی رودباری، ع. و اسفندیاری، م.، ۱۳۹۸. پایش جزایر حرارتی شهری با رویکرد تکاملی فرکتال ویژه (FNEA) (مطالعه موردی: کلان‌شهر تهران)، سنجش از دور و GIS ایران، شماره ۱، ص ۹۵-۱۱۴.

-رنجبر سعادت آبادی، ع.، علی اکبری بیدختی، ع. و صادقی حسینی، ع.، ۱۳۸۴. آثار جزیره گرمایی و

- 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*, v. 113, p. 2606-2617.
- Chander, G. and Groeneveld, D.P., 2009. Intra-annual NDVI validation of the Landsat 5 TM radiometric calibration, *International Journal of Remote Sensing*, v. 30, p. 1621-1628.
- Chander, G. and Markham, B., 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 41, p. 2674-2677.
- Coseo, P. and Larsen, L., 2014. How factors of land use/land cover, building configuration, and adjacent heat sources and sinks explain Urban Heat Islands in Chicago, *Landscape and Urban Planning*, v. 125, p. 117-129.
- Debbage, N. and Shepherd, J.M., 2015. The urban heat island effect and city contiguity, *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 54, p. 181-194.
- Farina, A., 2012. Exploring the relationship between land surface temperature and vegetation abundance for urban heat island mitigation in Seville, Spain. LUMA-GIS Thesis.
- Kikon, N., Singh, P., Singh, S.K. and Vyas, A., 2016. Assessment of urban heat islands (UHI) of Noida City, India using multi-temporal satellite data, *Sustainable Cities and Society*, v. 22, p. 19-28.
- Lo, C.P., Quattrochi, D.A. and Luvall, J.C., 1997. Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect, *International journal of remote sensing*, v. 18, p. 287-304.
- Mohajerani, A., Bakaric, J. and Jeffrey-Bailey, T., 2017. The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete, *Journal of environmental management*, v. 197, p. 522-538.
- Molnár, G., 2016. Analysis of land surface temperature and NDVI distribution for Budapest using Landsat 7 ETM+ data, *Acta climatologica et chorologica*, v. 49, p. 49-61.
- Oke, T.R., 1982. The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 108, p. 1-24.
- Pan, J., 2016. Area delineation and spatial-temporal dynamics of urban heat island in Lanzhou City, China using remote sensing imagery, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 44, p. 111-127.
- Rasul, A., Balzter, H., Smith, C., Remedios, J., Adamu, B., Sobrino, J. and Weng, Q., 2017. A review on remote sensing of urban heat and cool islands, *Land*, v. 6, p. 38-54.
- Santamouris, M., 2013. *Energy and climate in the urban built environment*, Routledge.
- Senanayake, I.P., Welivitiya, W.D.D.P. and Nadeeka, P.M., 2013. Remote sensing based analysis of urban heat islands with vegetation cover in Colombo city, Sri Lanka using Landsat-7 ETM+ data, *Urban Climate*, v. 5, p. 19-35.
- Singh, R.B. and Grover, A., 2015. Spatial correlations of changing land use, surface temperature (UHI) and NDVI in Delhi using Landsat satellite images, In *Urban Development Challenges, Risks and Resilience in Asian Mega Cities*, Springer, Tokyo, p. 83-97.
- Son, N.T., Chen, C.F., Chen, C.R., Thanh, B.X. and Vuong, T.H., 2017.

- Assessment of urbanization and urban heat islands in Ho Chi Minh City, Vietnam using Landsat data, *Sustainable cities and society*, v. 30, p. 150-161.
- Srivanit, M. and Hokao, K., 2012. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: An application for the city of Bangkok, Thailand, *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, v. 9, p. 83-100.
- Wark, D.Q., Yamamoto, G. and Lienesch, J.H., 1962. Methods of estimating infrared flux and surface temperature from meteorological satellites, *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 19, p. 369-384.
- Yang, J., Wang, Z.H. and Kaloush, K.E., 2015. Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a 'silver bullet' for mitigating urban heat island, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 47, p. 830-843.
- Zhang, H., Qi, Z.F., Ye, X.Y., Cai, Y.B., Ma, W.C. and Chen, M.N., 2013. Analysis of land use/land cover change, population shift, and their effects on spatiotemporal patterns of urban heat islands in metropolitan Shanghai, China, *Applied Geography*, v. 44, p. 121-133.