

تحلیل ناهمگونی فضایی و عوامل موثر بر دمای سطح زمین با استفاده از مدل‌های رگرسیون فضایی

زهرا پرور^۱، مرجان محمدزاده^{۲*} و سپیده سعیدی^۳

۱) دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران.

۲) دانشیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول مکاتبات: marjan.mohammadzadeh@gmail.com

۳) استادیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۹

چکیده

دمای سطح زمین یک عامل مهم تاثیرگذار بر تغییرات حرارتی و تعادل در مطالعات جهانی است. در طول دو دهه گذشته، نیاز شدید به داده‌های LST در مطالعات محیط‌زیستی و مدیریت منابع زمین، اندازه‌گیری LST را به یک بحث علمی بزرگ تبدیل کرده است. کشف ناهمگونی فضایی دمای سطح زمین و تحلیل عوامل کلیدی و روابط فضایی خاص که از سری‌های زمانی دمای سطح زمین تاثیر می‌گیرند، اهمیت بالایی در مدیریت سرزمین دارند. مطالعه حاضر با هدف تحلیل ناهمگونی فضایی و عوامل موثر بر دمای سطح زمین با استفاده از مدل‌های رگرسیون فضایی انجام شد. برای بررسی این موضوع نقشه‌های LST روزانه با استفاده از روش معادله انتقال تابشی از داده‌های لندست ۷ و ۸ برای سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۱ شهر بجنورد تهیه شدند. تحلیل دمای سطح زمین در مناطقی که زمین‌های بایر غالب هستند، نیاز به داده‌های دمای شبانه دارد. بنابراین نقشه‌های LST شبانه مادیس نیز به‌عنوان نقشه‌های کمکی تهیه شدند. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از مدل‌های همبستگی پیرسون، خودهمبستگی فضایی، حداقل مربعات معمولی و رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی استفاده شد. سپس عملکرد مدل‌ها با استفاده از ضریب تعیین و معیار اطلاعات آکاییک مقایسه شدند. نتایج مطالعه بیانگر توانایی بیشتر و پیش‌بینی دقیق‌تر رویکرد GWR نسبت به OLS برای توصیف ناهمگونی فضایی است. پاسخ فضایی دماهای سطح زمین و متغیرهای تاثیرگذار مختلف از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ نشان داد توسعه فضای سبز نقش مهمی در تعدیل دماهای سطح زمین ایفا می‌کند. با توجه به اینکه LST تحت تاثیر متغیرهای مختلفی از جمله توپوگرافی، متغیرهای اقلیمی، جوی و پوشش گیاهی است، بنابراین درک روابط فضایی و تجزیه و تحلیل مناطق با LST بالا، می‌تواند به‌عنوان راهگشایی در برنامه‌ریزی و آمایش اصولی سرزمین مفید واقع شود.

واژه‌های کلیدی: حداقل مربعات معمولی، رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی، سیمای سرزمین، ناهمگونی فضایی.

مقدمه

شهرها سیستم‌های پیچیده و پویایی هستند که توسعه آنها مزایای زیادی را به همراه داشته، اما ویژگی‌های فیزیکی و هندسی سطح زمین را نیز تغییر داده‌اند (Naim and Kafy, 2021). شهرنشینی می‌تواند طیف گسترده‌ای از فرآیندهای طبیعی مانند دمای سطح زمین^۱ (LST) را تحت تاثیر قرار دهد، از این رو بررسی اثرات شهرنشینی بر دمای سطح زمین بسیار مهم است. سنجش‌ازدور ماهواره‌ای روشی منحصر به فرد برای به‌دست آوردن LST و نظارت بر تغییرات زمانی و مکانی آن است. از مزایای استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌توان به وضوح

در سطح زمین، هیچ پدیده یا عملکردی به‌صورت مجزا اتفاق نمی‌افتد، بلکه در ارتباط پیچیده با یکدیگر هستند و بر محیط پیرامون خود تاثیرگذار می‌باشند (Kumari et al., 2018). تغییرات در سیستم‌های زمینی می‌تواند به‌طور مستقیم بر آب‌وهوای منطقه، عملکرد اکوسیستم و طیف وسیعی از خدمات اکوسیستم تاثیر گذارد (Aboelnour and Engel, 2018; Cao et al., 2020). شهرها نیز به‌عنوان یکی از سیستم‌های پیچیده در سطح زمین از این قاعده مستثنی نیستند.

^۱ Land Surface Temperature (LST)

2009). بنابراین، روش کاوش ناهمگونی فضایی دمای سطح از سری‌های زمانی متعدد و تحلیل رابطه بین LSTs و عوامل مختلف تاثیرگذار برای برنامه‌ریزی شهری منطقی اهمیت زیادی دارد. در زمینه بررسی تغییرات زمانی و مکانی دمای سطح زمین با در نظر گرفتن الگوها و شکل شهر مطالعات متنوعی وجود دارد (Guo et al., 2020).

Li و همکاران (۲۰۱۸) تفاوت‌های الگوهای فضایی شهری بر LST در سه مقیاس فضایی مختلف را با استفاده از تحلیل همبستگی پیرسون و مدل GWR بررسی نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد، فرآیندهای طبیعی که بر دمای سطح زمین و الگوی فضایی آن تاثیر می‌گذارند تحت تاثیر مقیاس‌های فضایی متفاوت عمل می‌کنند. Zhi و همکاران (۲۰۲۰) رابطه عوامل فیزیکی طبیعی از جمله ارتفاع و پوشش‌های طبیعی بر ویژگی‌های فضایی LST یک منطقه شهری با استفاده از یک مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی را نشان دادند که اکثر موارد با LST همبستگی منفی داشتند. تاثیر مورفولوژی شهری و ویژگی‌های سیمای سرزمین بر ناهمگونی فضایی و زمانی دمای سطح زمین در شهرهای بسیاری مورد توجه قرار گرفته است (Guo et al., 2020; S. Li et al., 2010)؛ اما اکثر این مطالعه‌ها تنها در مقیاس شهری صورت گرفته‌اند و به نقش تغییرات زمانی / مکانی کاربری‌ها، عوامل توپوگرافی و فیزیکی در مقیاس کلان و میان‌مقیاس (موقعیت جغرافیایی و پستی و بلندی‌ها) توجه کافی صورت نگرفته است.

شهر بجنورد، تحت تاثیر رشد و توسعه شهری که بنا به جایگاه و موقعیت سیاسی- اداری از سال ۱۳۸۳ (هم‌زمان با مرکز استان شدن) به وجود آمد، دچار تحولات عمیق فضایی و محیطی شد. به دنبال توسعه شهر بجنورد و افزایش روند مهاجرت از روستا به شهر، بهره‌برداری از زمین‌های کشاورزی و باغ‌های اطراف شهر برای مقاصد شهری افزایش یافت. بنابراین هدف از انجام این مطالعه تعیین و تحلیل رابطه بین ویژگی‌های سیمای سرزمین و پارامترهای زمین‌شناختی تاثیرگذار بر دمای سطح زمین در محدوده‌ای فراتر از شهر بجنورد (محدوده‌ای به مساحت ۱۶۴۰ کیلومتر مربع) طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ و تجزیه و تحلیل ویژگی‌های فضایی- زمانی آن است.

مکانی بالا و تناوب (فرکانس) زمانی این تصاویر در یک منطقه بزرگ اشاره کرد. بسیاری از مطالعه‌ها، قابلیت اطمینان داده‌های LST بر اساس تصاویر ماهواره‌ای را در مقایسه با اندازه‌گیری‌های درجا نشان داده‌اند (Azmi et al., 2021; Rongali et al., 2018; Soydan, 2020). از طرفی تصاویر ماهواره‌ای لندست از ۲۳ جولای ۱۹۷۲ در دسترس هستند و به دلیل تداوم زمانی بالا و وضوح مکانی نسبتاً خوب به‌طور گسترده‌ای در مطالعات و تحقیقات مختلف از جمله برنامه‌ریزی منطقه‌ای و محیط زیست، کشاورزی و تغییرات جهانی اقلیم استفاده شده‌اند (Sun et al., 2010).

LST نتیجه تعامل عوامل متعدد است، بنابراین درک مکانیسم‌های محرک این عوامل ضروری است (Liu et al., 2021). نوع کاربری و پوشش زمین یک عامل تاثیرگذار و مهم در پویایی و تغییرات دمای سطح زمین است (Tiepolo et al., 2023). در سال‌های اخیر مطالعه‌های متعددی به بررسی این موضوع پرداخته‌اند و جنبه‌های مختلفی از جمله رابطه بین LST با کاربری / پوشش زمین^۱ در مناطق شهری (Naim and Kafy, 2021)، نقش الگوهای سیمای سرزمین بر LST و کمی‌سازی اثرات و بررسی روند تغییرات آن (Nimish et al., 2020; Zhuang et al., 2020)، رابطه بین فرم شهری و اقلیم با توزیع فضایی و استفاده از شاخص‌های مورفولوژیکی (Azmi et al., 2021; Martinelli and Matzarakis, 2017) و در نهایت روابط بین LST با پارامترهای مختلف تاثیرگذار بر آن مانند شاخص‌های طیفی (Faisal et al., 2021; Feng et al., 2019; Guo et al., 2020; B. Kumari et al., 2018) را بررسی و واکاوی نموده‌اند.

به‌منظور کشف رابطه بین LST و محرک‌های آن معمولاً از روش رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLS)^۲ استفاده می‌شود، با این حال در این روش، ناهمگونی فضایی و پویایی LST ممکن است نادیده گرفته شود (Liu et al., 2021). روش رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR)^۳ بهبودیافته، مدل رگرسیون خطی سنتی و نوعی آمار محلی است که می‌تواند مجموعه‌ای از تخمین‌های پارامتر محلی را تولید کند و نشان دهد چگونه یک رابطه در فضا تغییر می‌کند، سپس الگوی فضایی تخمین‌های محلی را بررسی می‌کند تا درک درستی از علل احتمالی پنهان این الگو داشته باشد (Tu and Xia, 2018).

1 Land Use Land Cover (LULC)

2 Ordinary Least Squares (OLS)

3 Geographically weighted regression (GWR)

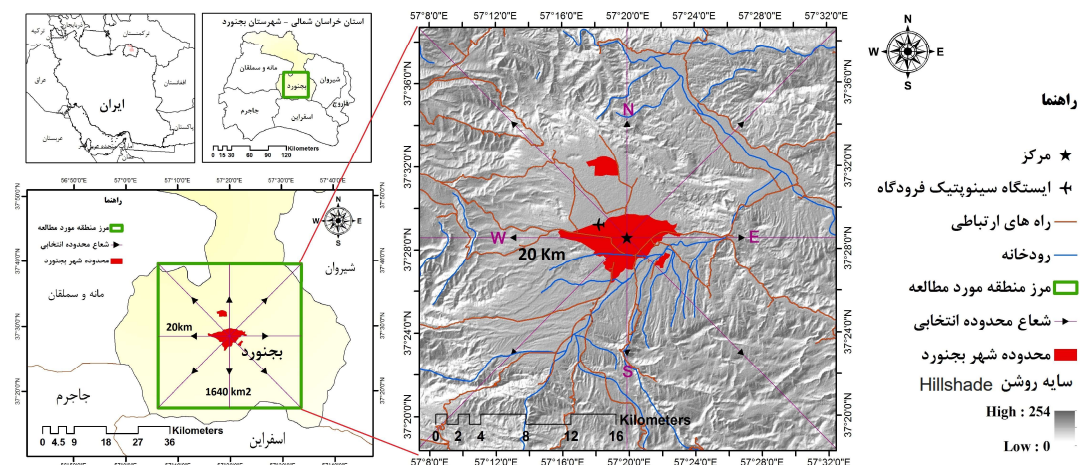
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

توده هوای سرد و تاثیر توده خزری گرم و مرطوب از سمت غرب در شهر رطوبت و اعتدال هوا ایجاد می‌شود. جمعیت شهر بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵ حدود ۲۲۸'۹۳۱ نفر (در ۶۷'۳۳۵ خانوار) گزارش شده است^۱. محدوده مورد مطالعه در این پژوهش به مرکز شهر بجنورد و به شعاع ۲۰ کیلومتری اطراف آن با مساحت حدود ۱۶۴۰ کیلومتر مربع در شکل (۱) مشخص شده است. زمین‌های زراعی و باغ‌ها و تفرجگاه‌های شهر در محدوده جنوب شرق و شمال شهر متمرکز شده‌اند و با توسعه شهر در سال‌های اخیر باغ‌ها و زمین‌های زراعی مطلوب اطراف شهر به کاربری مسکونی و اداری تغییر کاربری داده‌اند.

شهر بجنورد مرکز استان خراسان شمالی، تقریباً در مرکز جغرافیایی استان در طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی و در ارتفاع متوسط ۱۰۱۰ متری از سطح دریا واقع شده است. این شهر در اقلیم سرد کوهستانی واقع شده و آب و هوا در محدوده محیطی از نوع نیمه‌خشک تا خشک با تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد و طولانی است (الهی‌گل و همکاران، ۱۳۹۸). دو توده هوایی سرد سیبری از شمال و گرم مدیترانه‌ای خزری از غرب بر منطقه تاثیر می‌گذارد. با وجود سردی و خشکی

منطقه مورد مطالعه - شهر بجنورد



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان خراسان شمالی و نسبت آن به محدوده مصوب شهر

ساعت ۱۰:۳۰ و ۲۲:۳۰ و در ماهواره Aqua (MYD11A1) حدود ۱۳:۳۰ و ۰۱:۳۰ است (Lazzarini et al., 2013).

جهت بررسی و ارزیابی درستی دقت نقشه‌های دمای سطح زمین از داده‌های ایستگاه هواشناسی بجنورد استفاده شد. پردازش و طبقه‌بندی تصاویر در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 و برای سایر تجزیه و تحلیل‌ها از جمله بررسی خودهمبستگی فضایی از نرم‌افزارهای GeoDa 1.12 و Arc GIS استفاده شد. به‌منظور برآورد دمای روزانه سطح زمین از نرم‌افزار منبع باز و مبتنی بر پایتون با نام LST تهیه شده توسط (پرور و سلمان‌ماهینی، ۱۴۰۱) استفاده شد و سنجه‌های سیمای سرزمین با استفاده از Fragstats 4.2 استخراج شدند.

داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده برای این مطالعه شامل تصاویر لندست سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۱ جهت بازیابی دمای سطح زمین، نقشه‌های کاربری و پوشش زمین و نقشه‌های کمکی شامل شیب و جهت (تهیه شده از DEM) است. جهت بررسی دمای شبانه سطح زمین نیز تصاویر مادیس^۲ تهیه شدند (جدول ۱). MODIS (تابش سنخ طیفی تصویربرداری با وضوح متوسط) ابزاری بر روی ماهواره‌های Terra (EOS AM) (آغاز ماموریت در دسامبر ۱۹۹۹) و Aqua (EOS PM) (آغاز ماموریت در مه ۲۰۰۲) با ۳۶ باند طیفی است. زمان گذر از بالای استوا در ماهواره Terra (MOD11A1) در حدود

جدول ۱- منبع داده‌های مورد استفاده در پژوهش

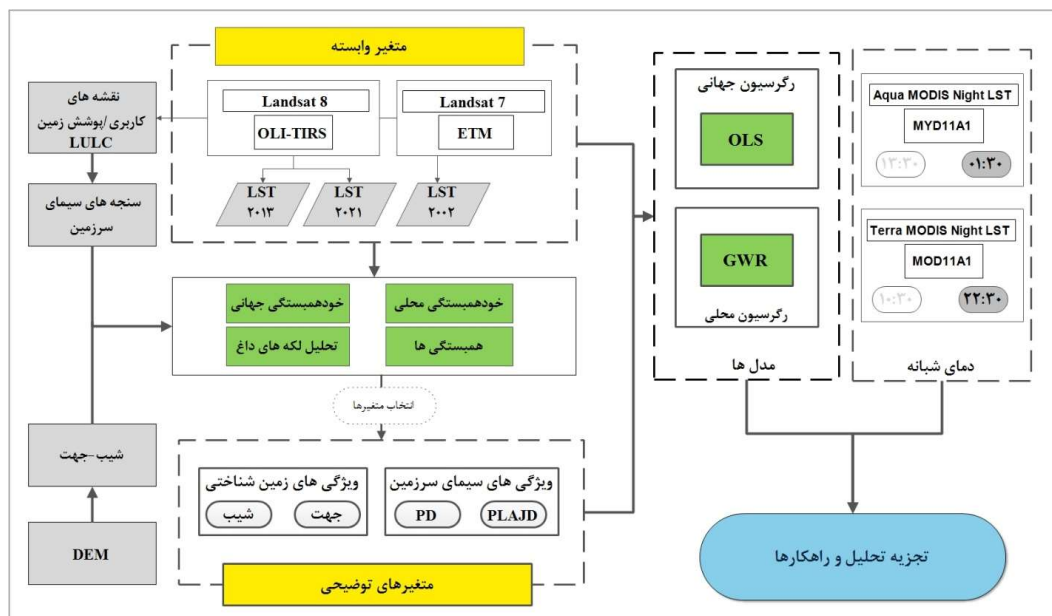
توضیحات	قدرت تفکیک مکانی	داده‌ها
https://earthexplorer.usgs.gov	Multispectral: 30 m Thermal: 60 m	Landsat 7 ETM
https://earthexplorer.usgs.gov	Multispectral: 30 m; Thermal: 100 m	Landsat 8 OLI_TIRS
http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/download.d.htm	1 km	Terra MODIS LST - MOD11A1
https://search.earthdata.nasa.gov/search	1 km	Aqua MODIS LST MYD11A1
https://earthexplorer.usgs.gov	30 m	DEM

مراحل انجام پژوهش

معیارهای الگوی سیمای سرزمین به‌طور گسترده‌ای برای اندازه‌گیری روابط بین نوع کاربری زمین و LST استفاده شده است (Duan et al., 2023; Roy and Bari, 2022; Xiang et al., 2022). در مطالعه حاضر نیز علاوه بر ویژگی‌های زمین‌شناختی، ویژگی‌های سیمای سرزمین به‌عنوان متغیرهای توضیحی استفاده شدند. در این مطالعه تلاش شد تا از آمارهای تداعی‌کننده ویژگی‌های فضایی استفاده شود، بنابراین علاوه بر بررسی خودهمبستگی، خودهمبستگی محلی و جهانی، لکه‌های داغ و سرد نیز تعیین و در تحلیل‌ها و انتخاب متغیرها مورد استفاده قرار گرفتند.

در نهایت از مدل‌های رگرسیون محلی و جهانی، برای کشف و درک ارتباط میان متغیر دمای سطح زمین (متغیر وابسته) با متغیرهای توضیحی انتخابی استفاده و نتایج، بررسی و تحلیل شدند. در شکل (۲) مراحل انجام کار شرح داده شده است.

برای تهیه نقشه‌های کاربری/ پوشش زمین و LST از تصاویر لندست ۷ و ۸ استفاده شد. نقشه‌های کاربری و پوشش زمین به روش درخت تصمیم برای سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۱ (پرور و همکاران، ۱۴۰۱) و تصاویر LST شبانه MODIS برای ساعات مختلف به‌منظور داشتن تحلیل‌های بهتر از تغییرات دمایی در منطقه مورد مطالعه و آشکار شدن تضادها در دمای سطح زمین بر اساس انواع کاربری تهیه شدند. دمای سطح زمین (به‌عنوان متغیر وابسته) تحت تاثیر عوامل بسیاری مرتبط با ویژگی‌های فضایی شهر، کاربری‌ها و ناهمگونی‌های فضایی منطقه است، بنابراین با توجه به مطالعه‌های پیشین و بررسی همبستگی تمام پارامترها، عوامل تاثیرگذار بر دمای سطح زمین (متغیرهای توضیحی) انتخاب شدند (Guo et al., 2020; Kashki et al., 2021; S. Li et al., 2010).



شکل ۲. نمودار جریان روش کار

انتخاب متغیرهای رگرسیون

رگرسیون یک تکنیک آماری است که یک متغیر وابسته را به یک یا چند متغیر مستقل (توضیحی) مرتبط می‌کند. یک مدل رگرسیون تغییرات مشاهده شده در متغیر وابسته با متغیرهای توضیحی را پیش‌بینی می‌کند. دمای سطح زمین به‌عنوان متغیر وابسته با عوامل مختلفی در ارتباط است، بنابراین انتخاب روش‌های تحلیل مناسب برای درک تاثیر عوامل محرک مختلف بر LSTها از اهمیت بالایی برخوردار است.

متغیر وابسته^۱: دمای سطح زمین LST

نقشه‌های LST، از تصاویر لندست به‌عنوان متغیر وابسته در این مرحله تهیه شدند. به‌منظور بازیابی دمای سطح زمین از معادله انتقال تابشی (RTE)^۲ برای سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۱ استفاده شد. حل معکوس معادله انتقال تابشی (RTE) یک روش مستقیم و مناسب‌ترین روش برای بازیابی LST با استفاده از یک باند حرارتی است. محاسبه RTE برای یک باند حرارتی و در یک طول موج خاص $C(\lambda)$ را می‌توان بر اساس رابطه (۱) به‌دست آورد (Diaz et al., 2021):

$$L_{\lambda}^{sen} = [\varepsilon B_{\lambda}(T_s) + (1 - \varepsilon)L_{\lambda}^{\downarrow}] \tau + L_{\lambda}^{\uparrow} \quad (1)$$

رابطه (۱) است، B_{λ} رادیانس جسم سیاه است، بنابراین رادیانس L_{λ}^{sen} رادیانس ثبت شده در سنجنده باند حرارتی مربوطه (۶) و L_{λ}^{\uparrow} رادیانس جسم سیاه است، بنابراین رادیانس ساطع شده برای یک جسم سیاه در دمای Ts با معکوس نمودن

رابطه قبل و بر اساس رابطه (۲) به‌دست می‌آید:

$$B_{\lambda}(T_s) = \frac{L_{\lambda}^{sen} - L_{\lambda}^{\uparrow} - \tau(1 - \varepsilon)L_{\lambda}^{\downarrow}}{\varepsilon} \quad (2)$$

Ts را می‌توان با معکوس کردن قانون پلانک در رابطه قبل

و بر اساس رابطه (۳) به‌دست آورد:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{\frac{L_{\lambda}^{sen} - L_{\lambda}^{\uparrow} - \tau(1 - \varepsilon)L_{\lambda}^{\downarrow}}{\varepsilon} + 1}\right)} \quad (3)$$

K_1 و K_2 ثابت‌های کالیبراسیون باند‌های حرارتی برای تصاویر ماهواره‌های لندست است.

متغیرهای توضیحی^۳

۶ متغیر به‌عنوان متغیرهای توضیحی LST انتخاب شدند که جنبه‌های مختلفی از ویژگی‌های سیمای سرزمین و توپوگرافی را شامل می‌شوند (جدول ۲). تمام متغیرها، لایه‌های رستری با وضوح فضایی ۳۰ متر هستند. به‌منظور استفاده از ابزار GWR در محیط ArcGIS، تمام لایه‌ها باید به فرمت‌های برداری تبدیل شوند. برای تبدیل فرمت داده‌ها ابتدا نقاط نمونه‌برداری ایجاد می‌شوند و سپس، متغیرهای اصلی با فرمت رستر به فرمت شیپ نقطه‌ای تبدیل می‌شوند. با استفاده از ابزار FISHNET یک فایل برداری شبکه‌ای با اندازه 300×300 متر تولید شد و مقادیر LST و متغیرهای توضیحی برای هر شبکه با استفاده از ArcGIS 10.8 تعیین شدند (Guo et al., 2020).

جدول ۲ - توضیحات متغیرهای توضیحی

متغیرهای توضیحی	توضیحات
ویژگی‌های سیمای سرزمین	تراکم لکه ^۴
نسبت مساحت ^۵ باغ	نسبت مساحت کاربری‌های باغ و فضای سبز شهری در هر شبکه
نسبت مساحت کشاورزی	نسبت مساحت کاربری کشاورزی در هر شبکه
ویژگی‌های توپوگرافی	شیب
شیب	نقشه طبقه‌بندی شده شیب ۳۰ متری
شمالی بودن جهت	جهت شمالی-جنوبی، از تبدیل تابع کسینوس نقشه جهت شیب ۳۰ متری

ویژگی‌های سیمای سرزمین

با توجه به ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه، کاربری‌های باغ و فضای سبز شهری و کشاورزی به‌عنوان کاربری‌های تاثیرگذار بر منطقه و به‌عنوان متغیرهای توضیحی LST انتخاب شدند. LST تحت تاثیر شکل‌ها، الگوها و ویژگی‌های ساختاری انواع کاربری سرزمین قرار می‌گیرد. بعد از بررسی همبستگی و ارزیابی شاخص‌های مختلف، از شاخص‌های فشردگی^۶،

شاخص تراکم لکه^۴ و نسبت مساحت کاربری در هر شبکه^۸ برای کاربری‌های کشاورزی، باغ و فضای سبز شهری که انبوهی این لکه‌ها را نشان می‌دهند، به‌عنوان متغیرهای توضیحی استفاده و انتخاب شدند. منطقه مورد مطالعه به شبکه‌هایی به ابعاد 300×300 متر تفکیک شدند (Guo et al., 2020) و سپس با استفاده از Fragstats 4.2، سنج‌های سیمای سرزمین برای کاربری‌های سرزمین در هر شبکه پردازش شدند.

5 Proportion of like adjacency (PLADJ)
6 Aggregation
7 PD
8 PLAJD

1 Dependent variable
2 Radiative Transfer Equation (RTE)
3 Explanatory variables
4 Patch density (PD)

ویژگی‌های توپوگرافی

جهت شیب سطح زمین به شدت بر میزان تابش خورشیدی دریافتی توسط آن سطح تاثیر می‌گذارد، بنابراین تنوع فضایی در جهت، یک عامل مهم طبیعی تعیین‌کننده دمای سطح زمین است. به‌طور کلی، شیب‌های رو به جنوب دارای بالاترین مقادیر دمای سطح زمین هستند و با تغییر جهت از جنوب به شمال در نیمکره شمالی مقدار آن به‌طور مداوم کاهش می‌یابد (Li et al., 2010). در ArcGIS، جهت به‌دست آمده از نقشه DEM بر حسب درجه و با الگوی دایره‌ای است، در نتیجه مقادیر بالای جهت ممکن است بسیار نزدیک به مقادیر پایین باشد، بنابراین به‌منظور آماده‌سازی نقشه‌ها ابتدا نقشه شیب بر حسب درجه به رادیان تبدیل شد (۳/۱۴ × ۱۸۰) (شیب) و سپس با استفاده از تابع مثلثاتی (Roberts, 1986) در رابطه (۴)، تبدیل صورت پذیرفت:

$$\text{northness} = \cos(\text{aspect}) \quad (4)$$

اعداد نزدیک به ۱ نشان‌دهنده جهت شمال، نزدیک به -۱ جهت جنوب و نزدیک به صفر جهت شرق یا غرب را نشان می‌دهد. شیب بر میزان تابش دریافتی و در نتیجه دمای سطح زمین تاثیرگذار است، بنابراین نقشه شیب (بر حسب درصد) نیز تهیه شد.

خودهمبستگی فضایی

بر اساس قانون کاهش فاصله^۱ که به‌عنوان قانون اول جغرافیای توبلر نیز شناخته می‌شود، تعامل میان اهداف مختلف با افزایش فاصله آنها از هم کاهش می‌یابد (Tobler, 1970). خودهمبستگی فضایی روش تجزیه و تحلیل داده‌های فضایی است و تعیین می‌کند که آیا بین مقادیر مشاهده شده برای یک مکان فضایی خاص و مقادیر مکان‌های مجاور آن همبستگی وجود دارد یا خیر (Soltanifard et al., 2021). خودهمبستگی فضایی مثبت زمانی است که مقادیر مشابه در نزدیکی یکدیگر قرار می‌گیرند، به عبارت دیگر زمانی که مکان‌های همسایه دارای مقادیر ویژگی مرتبط هستند. یا به عبارت دیگر، زمانی که مکان‌های همسایه دارای مقادیر ویژگی مرتبط هستند، خودهمبستگی فضایی مثبت است. در این مطالعه، شاخص‌های جهانی و محلی Moran's I به‌ترتیب برای بررسی ناهمگونی فضایی جهانی و محلی LST استفاده شد (M. Kumari et al., 2019). خودهمبستگی فضایی جهانی،

همبستگی کلی بین مناطق و سطح اهمیت را به شرح زیر منعکس می‌کند (رابطه ۵) (Guo et al., 2020):

$$\text{Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})} \quad (5)$$

که در آن: n تعداد کل نقاط نمونه‌برداری؛ xi و xj به‌ترتیب مقادیر LST نمونه‌های i و j؛ Wij ماتریس وزن فضایی بین مکان‌های i و j و \bar{x} مقدار متوسط LST است. شاخص محلی ارتباط فضایی^۲ برای تجزیه و تحلیل تجمع فضایی LST از رابطه (۶) به‌دست آمد:

$$\text{Local Moran's } I = \left(\frac{x_i - \bar{x}}{n} \right) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (6)$$

محدوده‌های عددی شاخص موران I بین ۱ و -۱ است، مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده الگوی تصادفی، کمتر مساوی -۱ الگوی خوشه‌ای و بزرگ‌تر مساوی ۱ الگوی پراکنده را نشان می‌دهد (Chen and Lin, 2021). از آنجایی که شاخص جهانی Moran's I فقط می‌تواند نشان دهد که آیا یک الگوی خوشه‌ای / پراکنده وجود دارد یا خیر، از شاخص‌های محلی ارتباط فضایی برای کشف الگوهای خوشه‌ای / پراکنده فضایی استفاده می‌شود.

چهار نوع الگوی خوشه‌ای / پراکنده وجود دارد: خوشه‌های بالا-بالا^۳، پایین-پایین^۴، نقاط پرت بالا-پایین و نقاط پرت پایین-بالا^۵ (M. Kumari et al., 2019). خوشه‌های بالا-بالا مقدار نسبتاً بالایی از واحدهای مساحتی را نشان می‌دهند که با هم خوشه‌بندی شده‌اند، درحالی‌که LL نشان‌دهنده مقدار نسبتاً پایین واحدهای مساحتی در کنار هم هستند. نقاط پرت مختلف (بالا و کم) واحدهای سطحی را که با هم خوشه‌بندی شده‌اند، نشان می‌دهد (Chen and Lin, 2021).

روش رگرسیون حداقل مربعات معمولی

OLS یک نوع آمار جهانی است که فرض می‌کند رابطه مورد مطالعه در فضا ثابت است، بنابراین این پارامتر برای تمام منطقه مورد مطالعه یکسان برآورد می‌شود. تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی معمولاً برای مطالعه کمی روابط بین LST و عوامل محرک استفاده می‌شود. روش OLS شامل یک مدل رگرسیون خطی جهانی است و یک تابع خطی چندمتغیره بین متغیرهای وابسته و مستقل است (Guo et al., 2020; S. Li et al., 2010). یک مدل OLS را می‌توان به‌صورت رابطه (۷) بیان کرد:

$$y_i = \beta_0 + \sum_k \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i \quad (7)$$

4 Low-Low (LL)
5 LH

1 Law of distance decay
2 LISA
3 High-High (HH)

تحلیل ناهمگونی فضایی و عوامل موثر بر دمای سطح زمین با استفاده از مدل‌های رگرسیون فضایی/۱۰۳

داده شده است، بیان می‌کند. به عبارت دیگر با محاسبه این ضریب می‌توان گفت که چند درصد از کل واریانس Y توسط متغیرهای مستقل X بیان می‌شوند. مقدار عددی این ضریب از صفر تا ۱ متغیر است و هر چه مقدار این معیار به ۱ نزدیک‌تر باشد، دقیق‌تر است. درحالی‌که هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت مدل کمتر است (Kashki et al., 2021).

معیار اطلاعات آکایک، معیاری برای نشان دادن کارایی نسبی و برازش است. این معیار نشان می‌دهد استفاده از یک مدل آماری تا چه حد باعث از دست رفتن داده‌ها می‌شود و دقت مدل و پیچیدگی آن را متعادل می‌سازد. مقدار کوچک این معیار نشان می‌دهد مقدار تخمین زده شده توسط مدل به مقدار مشاهده‌ای یا واقعیت زمین نزدیک‌تر است. اگر اختلاف AIC بین دو مدل کمتر از ۳ باشد (به‌عنوان آستانه)، می‌توان نتیجه گرفت که این دو مدل‌ها تقریباً حالت یکسانی دارند (Kashki et al., 2021). مدل GWR با استفاده از ماژول Spatial Relationships در نرم‌افزار ArcGIS اجرا شد.

نتایج

نقشه‌های کاربری و پوشش زمین LULC

نوع کاربری و پوشش زمین تاثیر مهمی بر دمای سطح زمین دارد. در این مطالعه نقشه‌های LULC در ۶ طبقه شامل باغ (باغ، جنگل و مناطق درخت‌کاری شده پوشش گیاهی انبوه)، جاده (راه‌های اصلی و خیابان‌ها)، مرتع، مناطق انسان‌ساخت (مناطق مسکونی شهری، روستایی و برخی دیگر از مناطق انسان‌ساخت)، فضای سبز شهری (فضای سبز در محدوده شهر) و کشاورزی (زمین‌های دیم و با پوشش گیاهی ضعیف یا زمین‌های رها شده و بایر) تهیه شدند (شکل ۳).

ε_i و X_{ik} به ترتیب متغیر وابسته، متغیرهای مستقل و عبارت خطای تصادفی را در نقاط فضایی مختلف نشان می‌دهند. i و k به ترتیب مخفف موقعیت‌های فضایی و عدد متغیر مستقل هستند). β_0 یک ثابت و β_k ضریب شیب برای k امین متغیر مستقل است. هیچ اطلاعاتی از موقعیت جغرافیایی در تخمین پارامترهای مدل در نظر گرفته نمی‌شود و همه پارامترها در کل مجموعه داده‌ها میانگین هستند.

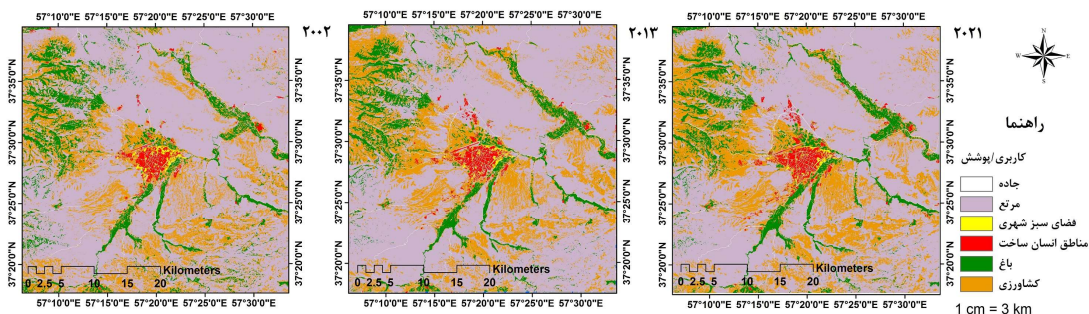
روش رگرسیون وزن دار جغرافیایی

GWR همان OLS است، با این تفاوت که مشاهده‌ها نسبت به نقاط/محل‌های مرجع بر اساس موقعیت یا مختصات فضایی آنها وزن می‌شوند. هر پارامتر یا ضریب GWR یک علامت و یک مقدار دارد. اگر علامت یک ضریب مثبت باشد، افزایش مقدار متغیر مستقل باعث افزایش متغیر وابسته خواهد شد. اگر علامت منفی باشد، آن متغیر اثر کاهشی بر متغیر وابسته دارد (Kashki et al., 2021). مدل GWR بر اساس رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i)X_{ik} + \varepsilon_i \quad (8)$$

y_i مقدار مشاهده شده؛ (u_i, v_i) مختصات جغرافیایی نقطه i در فضا و $\beta_0(u_i, v_i)$ محل تقاطع هر موقعیت i است. $\beta_k(u_i, v_i)$ پارامتر رگرسیون برای متغیر مستقل k در نقطه نمونه‌گیری داده i ؛ k تعداد متغیرهای مستقل؛ X_{ik} مقدار متغیر مستقل X_k در نقطه i و ε_i عبارت خطای تصادفی در نقطه i است.

دقت مدل GWR تحت تاثیر پهنای باند قرار می‌گیرد. پارامترهای ضریب تعیین و معیار اطلاعات آکایک (AICc) برای مقایسه برازش مدل انتخاب شدند. ضریب تعیین، درصد واریانس متغیر وابسته را که توسط متغیرهای مستقل توضیح



شکل ۳. نقشه‌های LULC سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۱

که هر چه مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد، دقیق‌تر است. ضریب

به منظور ارزیابی صحت طبقه‌بندی از ضریب کاپا استفاده شد

۱۰۴/ مجله تحقیقات منابع طبیعی تجدید شونده، سال سیزدهم، شماره ۲، یانیز و زمستان ۱۴۰۱ (بیاپی سی و هشت)

کاپا برای سال‌های ۲۰۲۱، ۲۰۱۳ و ۲۰۰۲ به ترتیب ۸۶/۴۸، ۸۸/۷۲ و ۸۴/۶۹ درصد به دست آمد که نشان می‌دهد نقشه‌های طبقه‌بندی شده از دقت مناسبی برخوردار هستند. جدول (۳)

جزییات ماتریس خطای طبقه‌بندی سال‌های ۲۰۲۱، ۲۰۱۳ و ۲۰۰۲ را نشان می‌دهد.

جدول ۳. ماتریس خطای طبقه‌بندی ۲۰۲۱، ۲۰۱۳ و ۲۰۰۲

واقعیت زمینی (۲۰۲۱)								
طبقات	جاده	مرتع	فضای سبز شهری	مناطق انسان‌ساخت	باغ	کشاورزی	کل	صحت تولیدکننده (%)
جاده	۱۵	۲	۰	۳	۰	۰	۲۰	۷۵
مرتع	۱	۴۸	۰	۰	۰	۱	۵۰	۹۶
فضای سبز شهری	۰	۱	۴۵	۱	۰	۳	۵۰	۹۰
مناطق انسان‌ساخت	۱	۳	۰	۴۳	۰	۳	۵۰	۸۶
باغ	۰	۵	۰	۰	۴۴	۱	۵۰	۸۸
کشاورزی	۰	۴	۰	۱	۰	۴۵	۵۰	۹۰
کل	۱۷	۶۳	۴۵	۴۸	۴۴	۵۳	۲۷۰	نقاط درست
صحت کاربر (%)	۸۸	۷۶	۱۰۰	۸۹	۱۰۰	۸۴	۲۴۰	
درستی کل (%)				۸۸/۸۸				
ضریب کاپا (%)				۸۶/۴۸				
واقعیت زمینی (۲۰۱۳)								
طبقات	جاده	مرتع	فضای سبز شهری	مناطق انسان‌ساخت	باغ	کشاورزی	کل	صحت تولیدکننده (%)
جاده	۱۳	۲	۰	۴	۰	۱	۲۰	۶۵
مرتع	۰	۴۹	۰	۰	۰	۱	۵۰	۹۸
فضای سبز شهری	۰	۱	۴۸	۰	۰	۲	۵۰	۹۶
مناطق انسان‌ساخت	۳	۰	۱	۴۶	۰	۰	۵۰	۹۲
باغ	۰	۲	۰	۰	۴۶	۲	۵۰	۹۲
کشاورزی	۱	۵	۰	۰	۱	۴۳	۵۰	۸۶
کل	۱۷	۵۹	۴۹	۵۰	۴۷	۴۹	۲۷۰	نقاط درست
صحت کاربر (%)	۷۶	۸۳	۹۷	۹۲	۹۷	۷۸	۲۴۵	
درستی کل (%)				۹۰/۷۴				
ضریب کاپا (%)				۸۸/۷۲				
واقعیت زمینی (۲۰۰۲)								
طبقات	جاده	مرتع	پارک	مناطق انسان‌ساخت	باغ	کشاورزی	کل	صحت تولیدکننده (%)
جاده	۱۴	۲	۰	۳	۱	۰	۲۰	۷۰
مرتع	۰	۴۸	۰	۰	۰	۲	۵۰	۹۶
فضای سبز شهری	۱	۰	۴۴	۵	۰	۰	۵۰	۸۸
مناطق انسان‌ساخت	۳	۰	۲	۴۵	۰	۰	۵۰	۹۰
باغ	۰	۳	۰	۰	۴۳	۴	۵۰	۸۶
کشاورزی	۱	۴	۱	۱	۱	۴۲	۵۰	۸۴
کل	۱۹	۵۷	۴۷	۵۴	۴۶	۴۸	۲۷۰	نقاط درست
صحت کاربر (%)	۷۳	۸۴	۹۳	۸۳	۹۵	۸۷	۲۳۶	
درستی کل (%)				۸۷/۴۱				
ضریب کاپا (%)				۸۴/۶۹				

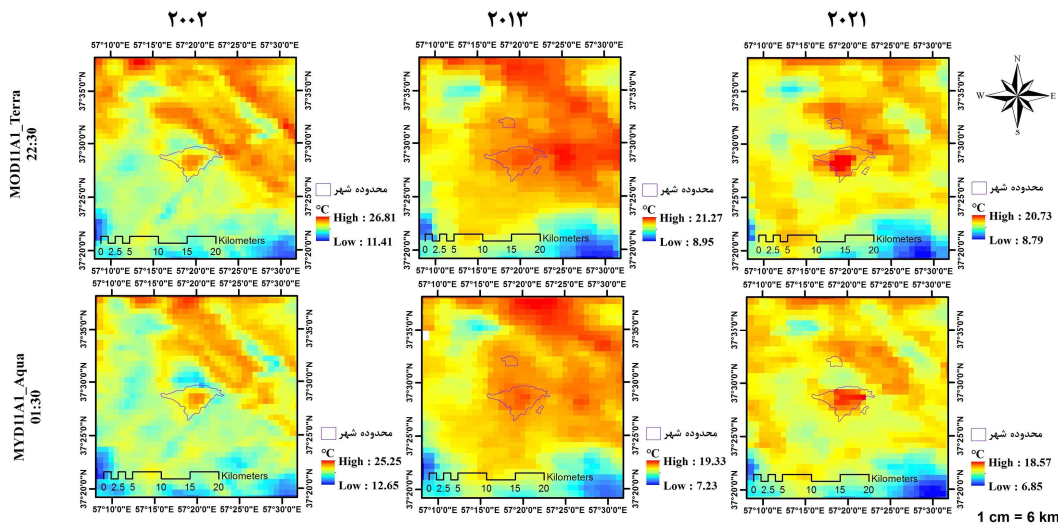
دمای سطح زمین در شب در ساعات مختلف

تجزیه و تحلیل دما در شهرهای نیمه‌خشک و مناطقی که زمین‌های بایر غالب هستند، حداقل به دو تصویر، یکی در روز

و دیگری در شب نیاز دارد (Haashemi et al., 2016). از

این رو تصاویر LST شبانه مادیس نیز تهیه شد (شکل ۴).

MODIS Land Surface Temperature and Emissivity



شکل ۴. توزیع مکانی LST شب بر اساس تصاویر مادیس

لندست ۷ و ۸ و به روش معادله انتقال تابشی برای سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ تهیه شدند. دقت الگوریتم انتخابی با استفاده از داده‌های تنها ایستگاه هواشناسی در فرودگاه بجنورد (مطابق تاریخ و ساعت اخذ تصاویر ماهواره‌ای) ارزیابی شد. مقدار خطای جذر میانگین مربعات^۱ برای این الگوریتم ۳/۱۱ درجه سلسیوس به دست آمد (جدول ۴).

نتایج LST شبانه در شکل (۴) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود دما در ساعات مختلف شب در مناطق شهری نسبت به بسیاری از کاربری‌های دیگر و مناطق غیرشهری بالاتر است که در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۲۱ با مقایسه نقشه‌های کاربری به وضوح قابل مشاهده است.

متغیر وابسته (دمای سطح زمین)

نقشه‌های روزانه دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر

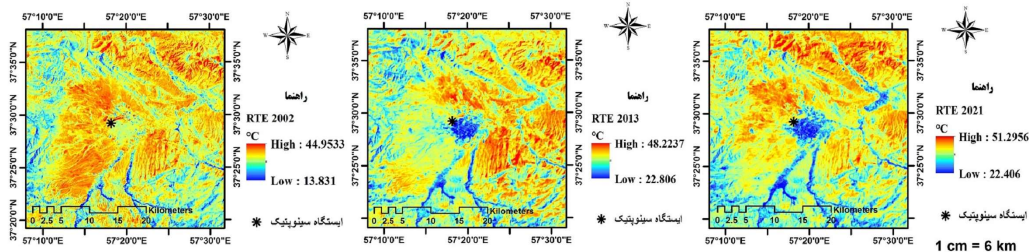
جدول ۴. دقت دماهای سطح زمین به دست آمده

سنجده	تاریخ	ساعت (UTC)	حداکثر دما	RTE (C°)
لندست ۷	۲۰۰۲/۰۸/۰۴	۰۶:۳۷:۲۱	۳۳/۲	۳۶
لندست ۸	۲۰۱۳/۰۸/۲۶	۰۶:۵۱:۱۲	۳۳/۶	۳۵
	۲۰۲۱/۰۸/۱۶	۰۶:۴۹:۱۹	۳۱/۶	۳۶
		مقدار خطای جذر میانگین مربعات		۳/۱۱

سانتی‌گراد و در سال ۲۰۲۱ حداکثر دما برابر با ۵۱/۲۹ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است.

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود در طول دوره مطالعه افزایش قابل توجهی در دمای سطح زمین در روز اتفاق افتاده است. در سال ۲۰۰۲ حداکثر دمای روز ۴۴/۹۵ درجه

Land Surface Temperature - Radiative Transfer Equation



شکل ۵. نقشه‌های LST به دست آمده از الگوریتم RTE برای سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۱

تحلیل همبستگی‌ها

نسبت مساحت باغ و کشاورزی به ترتیب همبستگی منفی و مثبت داشتند که نشان‌دهنده اهمیت فضای سبز در کاهش دمای سطح زمین است. دماهای پایین سطح زمین معمولاً در مناطق با تراکم بالای لکه‌ها مشاهده می‌شود (جدول ۵).

LST با شیب و جهت شیب و تراکم لکه‌ها همبستگی منفی داشت. همبستگی منفی شمالی بودن جهت، نشان می‌دهد دما در جهت‌های شمالی در مقایسه با جهت‌های جنوبی کمتر است.

جدول ۵. همبستگی بین LST‌ها و متغیرهای توضیحی (۲۰۲۱ و ۲۰۱۳، ۲۰۰۲)

متغیرها	شیب	شمالی بودن	نسبت مساحت باغ	نسبت مساحت کشاورزی	تراکم لکه
۲۰۰۲	-۰/۲۸	-۰/۲۴	-۰/۴۱	۰/۲۰	-۰/۱۵
۲۰۱۳	-۰/۴۲	-۰/۱۴	-۰/۴۲	۰/۲۷	-۰/۲۴
۲۰۲۱	-۰/۲۴	-۰/۱۷	-۰/۳۲	۰/۱۷	-۰/۱۸

می‌تواند مربوط به ارتفاع خورشید باشد چرا که خورشید در تابستان در بیشترین فاصله از زمین قرار دارد. بنابراین درجه تابش خورشید در شیب‌های کم ممکن است بیشتر از نواحی شیب‌دار باشد، زیرا زاویه اوج خورشیدی^۱ در شیب‌های کم بیشتر از نواحی شیب‌دار است (Kashki et al., 2021).

جدول (۶) سهم و تاثیر شیب بر LST را نشان می‌دهد. شیب غالب منطقه مورد مطالعه در محدوده ۵-۰ درصد (۲۱/۸۷ درصد) و ۲۰-۱۲ درصد (۲۷/۸۹ درصد) است. بالاترین دما در تمام سال‌ها در شیب بین ۱۲ تا ۳۰ درصد و پایین‌ترین دما در شیب ۳۰ تا ۶۰ درصد ثبت شده است، بنابراین بالاترین دما در شیب‌های متوسط و نه بالاترین شیب ثبت شده است. این مسئله

جدول ۶. سهم و تاثیر شیب بر LST

شیب (درصد)	۲۰۰۲			۲۰۱۳			۲۰۲۱		
	درصد مساحت	حداقل دما	حداکثر دما	درصد مساحت	حداقل دما	حداکثر دما	درصد مساحت	حداقل دما	حداکثر دما
۰-۵	۲۱/۸۷	۱۵/۹۶	۴۴/۹۵	۲۱/۸۷	۲۴/۳۴	۴۶/۶۶	۲۱/۸۷	۲۳/۵۹	۴۸/۶۰
۵-۸	۱۴/۷۳	۱۵/۹۶	۴۴/۹۵	۱۴/۷۳	۲۴/۶۵	۴۷/۵۷	۱۴/۷۳	۲۳/۹۸	۵۰/۴۰
۸-۱۲	۱۸/۲۳	۱۶/۳۱	۴۴/۹۵	۱۸/۲۳	۲۴/۴۸	۴۷/۸۰	۱۸/۲۳	۲۳/۹۹	۵۰/۹۲
۱۲-۲۰	۲۷/۸۹	۱۴/۹۰	۴۵/۰۱	۲۷/۸۹	۲۴/۹۱	۴۷/۷۷	۲۷/۸۹	۲۴/۰۳	۵۱/۳۱
۲۰-۳۰	۱۴/۰۰	۱۳/۸۳	۴۴/۹۵	۱۴/۰۰	۲۴/۰۴	۴۸/۲۲	۱۴/۰۰	۲۴/۰۹	۵۰/۹۶
۳۰-۶۰	۳/۲۸	۱۴/۹۰	۴۴/۹۵	۳/۲۸	۲۲/۸۱	۴۷/۸۵	۳/۲۸	۲۲/۴۱	۴۸/۶۷
>۶۰	۰/۰۰	۲۰/۹۱	۳۳/۰۰	۰/۰۰	۲۶/۸۰	۳۴/۹۸	۰/۰۰	۲۸/۲۹	۳۵/۰۴

به‌دست آمده برای هر ۳ سال کمتر از ۰/۰۵ ($p \leq 0.05$) است، در نتیجه فرض استقلال در مقادیر داده و تصادفی بودن رد می‌شود. امتیاز Z به‌دست آمده برای تمام سال‌ها سال بیشتر از ۲/۵۸ ($Z\text{-score} > 2.58$) است، بنابراین کمتر از ۰/۰۱ احتمال دارد که الگوی مشاهده شده نتیجه یک فرآیند تصادفی باشد (جدول ۷).

خودهمبستگی فضایی

موران جهانی

Moran's I برای بررسی خودهمبستگی فضایی جهانی LST برای سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۱ به‌دست آمد. مقادیر شاخص موران جهانی به‌دست آمده برای هر ۳ سال بزرگ‌تر از صفر است که نشان می‌دهد خودهمبستگی مثبت یا الگوی بسیار خوشه‌ای وجود دارد. مقادیر p نیز آن را تایید می‌کند. مقدار p

جدول ۷. تحلیل خوشه‌ای مکانی-زمانی

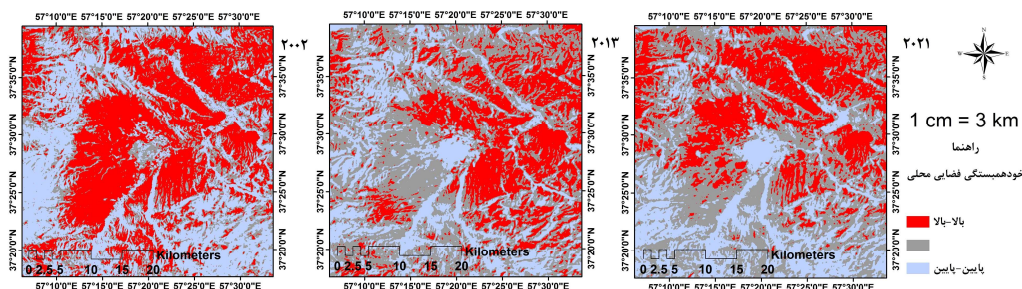
سال	LST Algorithm	Moran's Index	Z-score	p value	مفهوم‌سازی رابطه فضایی	روش اندازه‌گیری
۲۰۰۲	RTE	۰/۹۱	۴۷۹۱/۳۵	۰/۰۰۰۰۰۰	مربع معکوس فاصله	اقلیدسی
۲۰۱۳	RTE	۰/۹۵	۵۰۵۳/۴۴	۰/۰۰۰۰۰۰	مربع معکوس فاصله	اقلیدسی
۲۰۲۱	RTE	۰/۹۶	۵۱۱۰/۳۸	۰/۰۰۰۰۰۰	مربع معکوس فاصله	اقلیدسی

تحلیل ناهمگونی فضایی و عوامل موثر بر دمای سطح زمین با استفاده از مدل‌های رگرسیون فضایی/۱۰۷

موران محلی

دسته بالا-بالا برای LST در طول دوره مطالعه تغییراتی آشکار نشان داد و از روند و الگوی منظمی پیروی نکرد (شکل ۶).

خوشه‌بندی موران محلی برای ۳ دوره زمانی در نظر گرفته شده در دو دسته اصلی بالا-بالا و پایین-پایین تهیه شد. مناطق

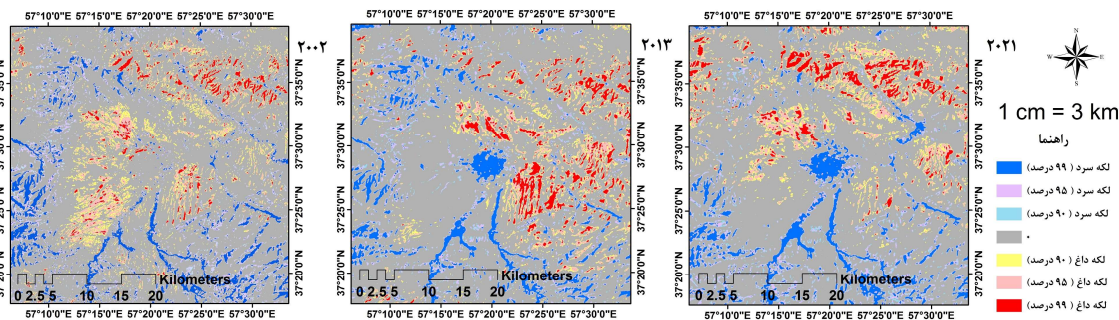


شکل ۶. توزیع خودهمبستگی فضایی محلی

لکه‌های سرد قابل پیش‌بینی نیستند، با این وجود همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در شمال شرق لکه‌های داغ همواره وجود دارند. در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۱ لکه‌های سرد علاوه بر مناطق با پوشش گیاهی بالا در محدوده شهری نیز مشاهده می‌شوند. اگرچه ممکن است انتظار رود، بتن، آسفالت و سایر مصالح انسان‌ساخت شهری دمای بالاتری نسبت به پوشش‌های طبیعی داشته باشند، اما به دلیل ماهیت منطقه مورد مطالعه و به‌ویژه غالب بودن زمین‌های بایر در منطقه و ویژگی‌های حرارتی خاص خاک این وضعیت مشاهده نمی‌شود.

تحلیل لکه‌های داغ و سرد^۱

به‌منظور آشکارسازی موقعیت فضایی لکه‌های داغ و سرد در منطقه مورد مطالعه از آماره Getis-Ord Gi نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. در این تحلیل زمانی که عارضه‌ای ارزش بالایی داشته باشد، مهم محسوب می‌شود، ولی یک لکه داغ تلقی نمی‌شود. زمانی که خود عارضه و عوارض همسایگانش از نظر آماری معنی‌دار باشند آن لکه به‌عنوان لکه داغ تلقی می‌شود (M. Kumari et al., 2019). همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود لکه‌های داغ (دمای سطح زمین بالاتر) در منطقه بر خلاف



شکل ۷. تحلیل لکه‌های داغ و سرد

کشاورزی، نسبت مساحت باغ، تراکم لکه باغ و شمالی بودن دارای شیب منفی است که دلالت بر روابط معکوس بین متغیر وابسته و متغیرهای توضیحی آن دارد. در مقابل، رابطه مثبتی بین LST و متغیر توضیحی نسبت مساحت کشاورزی وجود دارد که نشان می‌دهد با افزایش زمین‌های کشاورزی، دمای سطح زمین نیز با افزایش همراه است. ضریب منفی متغیر شمالی

رگرسیون جهانی

روش رگرسیون حداقل مربعات معمولی

مدل OLS، به‌عنوان یکی از روش‌های کلاسیک تحلیل رگرسیون جهانی در محیط نرم‌افزار ArcGIS انجام شد. جدول (۸) شامل تخمین پارامترهای رگرسیون مدل OLS است. مقادیر میانگین ضرایب رگرسیون متغیرهای تراکم لکه

بودن جهت بیانگر آن است که هرچه جهت به شمال نزدیکتر باشد، دمای سطح زمین کمتر می‌شود. رابطه منفی در متغیر شیب نیز به همین صورت است. عامل تورم واریانس^۱، افزونگی را در بین متغیرهای توضیحی اندازه‌گیری می‌کند. به‌عنوان یک قاعده کلی، متغیرهای توضیحی مرتبط با مقادیر VIF بزرگ‌تر از حدود ۷/۵ باید از مدل رگرسیون حذف شوند. مقادیر VIF همه متغیرهای توضیحی کمتر از ۲ انتخاب شد تا هم خطی کمتری بین این

متغیرها وجود داشته باشد. همه ضرایب متغیرهای انتخابی مدل OLS از نظر آماری معنی‌دار بودند ($p < 0/05$). در جدول (۸)، خلاصه‌ای از نتایج مدل OLS ارائه شده است. سال ۲۰۰۲ دارای $R^2 = 0/39$ است، یعنی به‌طور تقریبی ۴۳ درصد از تغییرات دمای سطح زمین منطقه مورد مطالعه را می‌توان با متغیرهای مستقل توضیح داد و برای سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۱ مقدار ۰/۳۵ و ۰/۲۵ برآورد شده است.

جدول ۸. خلاصه‌ای از نتایج مدل OLS

سال	تعداد مشاهده‌ها	R^2 چندگانه	R^2 تعدیل شده	Jarque-Bera Statistic [g]	Koenker (BP) Statistic [f]	AICc
۲۰۰۲	۱۸۲۲۵	۰/۳۹	۰/۳۹	۳۷۳/۸۲	۹۰۴/۴۳	۸۶۴۷۴/۳۹
۲۰۱۳	۱۸۲۲۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۱۰۴۶/۶۵	۴۸۶/۶۳	۸۱۹۴۴/۲۷
۲۰۲۱	۱۸۲۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۱۳۱/۲۷	۶۰۸/۷۵	۹۱۶۱۴/۸۲

رگرسیون محلی

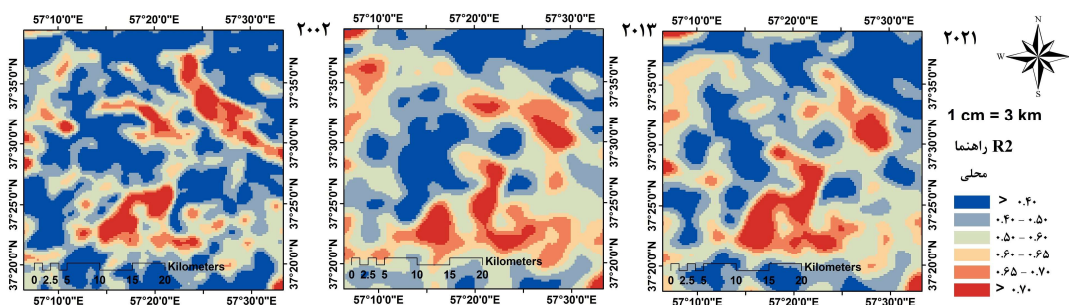
روش رگرسیون وزن دار جغرافیایی

نتایج مدل GWR برای ۱۸۲۲۵ داده نمونه (مشاهده‌ها بر اساس شبکه‌بندی منطقه) در جدول (۹) ذکر شده است. مربع باقی‌مانده^۲، بیانگر مجموع مجذور باقی‌مانده‌ها^۳ در مدل است. هرچه این مقدار کوچک‌تر باشد، تناسب بیشتری با داده‌های مشاهده شده دارد. عدد موثر^۴ مبادله بین واریانس مقادیر برازش شده و جهت‌گیری در برآورد ضرایب است. معیار اطلاعات آکاییک، یک معیار نسبی از عملکرد مدل است که برای مقایسه مدل‌ها استفاده می‌شود. AIC کوچک‌تر نشان‌دهنده یک مدل

برتر است. R^2 و R^2 تعدیل شده^۵ معیارهای خوبی برای ارزیابی تناسب مدل می‌باشند و مقادیر بالاتر آنها ترجیح داده می‌شود. نتایج مدل OLS فضا را همگن در نظر می‌گیرد، اما برای در نظر گرفتن ناهمگونی‌های فضایی LST، مدل GWR برای تجزیه و تحلیل غیرایستایی از دیدگاه محلی استفاده شد. مدل GWR رابطه بین LSTها و متغیرهای توضیحی و عدم ایستایی فضایی/ زمانی را با دقت بیشتری نسبت به OLS منعکس می‌کند. مقادیر R^2 برای سه دوره زمانی به ترتیب ۰/۸۰، ۰/۷۶ و ۰/۸۱ به دست آمد.

جدول ۹. نتایج مدل GWR

سال	R^2	R^2 تعدیل شده	Residual Squares	عدد موثر	طول باند	Sigma	AICc
۲۰۰۲	۰/۸۰	۰/۷۷	۴۰۰۲۰۵۶	۲۰۳۵/۴۵	۱۳۳۹/۲۰	۱/۵۷	۶۹۱۳۷/۹۶
۲۰۱۳	۰/۷۶	۰/۷۵	۳۴۶۶۰/۳۶	۹۲۶/۲۹	۲۰۵۸/۲۸	۱/۴۱	۶۴۷۷۲/۰۴
۲۰۲۱	۰/۸۱	۰/۸۰	۴۰۰۲۵/۱۲	۱۱۰۳/۸۰	۱۸۶۳/۵۲	۱/۵۲	۶۷۶۶۶/۳۰



شکل ۸. توزیع‌های فضایی R^2 محلی در مدل GWR برای سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۱

4 Effective Number
5 Adj-R2

1 VIF
2 Residual Squares
3 Squared Residuals

به‌ویژه در مناطق ناهمگون از نظر مکانی/ زمانی ثابت نیستند، بنابراین زمانی که چنین پویایی فضایی ذاتی وجود دارد بررسی روابط و تنوع فضایی محلی ضروری می‌باشد. چنین شرایطی نشان می‌دهد تحلیل رگرسیون محلی ممکن است مناسب‌تر باشد (Lin and Chen, 2011). دماهای سطح زمین به‌دست آمده تحت تاثیر عوامل مختلف مربوط به ناهمگونی‌های فضایی منطقه انتخابی از نظر توزیع فضایی دارای ویژگی‌های متفاوتی بودند.

با توجه به نقش فضاهاى سبز در کاهش دمای سطح زمین و به‌کارگیری نتایج مطالعه حاضر در مکان‌یابی و توسعه فضاهاى سبز، گستره فضایی مورد مطالعه محدوده‌ای وسیع‌تر از محدوده شهر انتخاب شد. با توجه به وسعت منطقه، شبکه‌بندی ۳۰۰ متری انتخاب شد تا در حد ممکن اطلاعات کمتری از دست رفته و جزئیات بیشتری از الگوهای فضایی حفظ شود. این مسئله در مطالعه Li و همکاران (۲۰۱۸) به‌طور مفصل بررسی شده است. آنها اثر مقیاس را با مقایسه سه سایز مختلف از شبکه‌بندی بررسی نمودند و نشان دادند ضرایب همبستگی بین معیارهای فضایی و LST با افزایش مقیاس‌های فضایی کاهش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد با درشت‌تر شدن مقیاس، تاثیر الگوی فضایی شهری بر LST ضعیف‌تر می‌شود (C. Li et al., 2018). در مطالعه حاضر خوشه‌بندی موران محلی برای ۳ دوره زمانی در دو دسته اصلی بالا-بالا و پایین-پایین نیز تهیه و بررسی شد. خوشه‌های سرد را می‌توان در مناطق با پوشش گیاهی و منطقه شهری به دلیل وجود فضاهاى سبز شهری مشاهده نمود. توزیع فضایی خوشه‌های پایین-پایین اساساً در طول دوره در نظر گرفته شده پایدار دید. این خوشه‌ها به‌طور عمده در مناطق با پوشش گیاهی انبوه متمرکز شده‌اند. خوشه‌بندی فضایی دمای سطح زمین در یک اکوسیستم می‌تواند نقشی حیاتی در ارزیابی پویایی کاربری/پوشش زمین ایفا کند. Kumari و همکاران (۲۰۱۹)، سودمندی تحلیل‌های خودهمبستگی فضایی دمای سطح زمین و پوشش گیاهی را در یک منطقه شهری نشان دادند. خودهمبستگی فضایی را می‌توان برای سایر مطالعه‌های اکولوژیکی نیز اجرا کرد. Chen and Lin (۲۰۱۱) در شناسایی و مدیریت مکان دقیق مناطق حساس به خشکسالی، استفاده از شاخص موران محلی و بررسی

از نظر فضایی، R2 محلی^۱ که در واقع میزان دقت برآورد مدل محلی را نشان می‌دهد، در مناطق میانی و جنوبی که تقریباً منطبق با محدوده شهر، فضاهاى سبز و زمین‌های کشاورزی است، بیشتر از سایر بخش‌ها است (شکل ۸). از نظر سری زمانی نیز این مناطق ثبات بیشتری داشتند. با توجه به وسعت و ناهمگونی‌های بسیار منطقه، انتخاب متغیرهایی برای پیش‌بینی LST با چالش‌هایی همراه بود. همان‌طور که در بررسی همبستگی‌ها نیز اشاره شد، رابطه منفی دما و فضای سبز (باغ و فضای سبز شهری) در سوی دیگر رابطه مثبت دما با زمین‌های کشاورزی (دیم) تاثیر زیادی در پیش‌بینی مدل داشتند. پاسخ فضایی دماهای سطح زمین و متغیرهای تاثیرگذار مختلف از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ نشان می‌دهد توسعه فضای سبز نقش مهمی در تعدیل دماهای سطح زمین ایفا می‌کند.

بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف تجزیه و تحلیل ویژگی‌های فضایی- زمانی LST شهر بجنورد و عوامل تاثیرگذار بر آن برای سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۱ انجام شد. نتایج داده‌های LST روز و شب به‌دست آمده نشان داد در طول روز دمای سطح زمین در کاربری توسعه انسان‌ساخت و به‌طور ویژه در محدوده شهری پایین‌تر از سایر کاربری‌ها از جمله کشاورزی و مرتع است. با این حال در شب، این مناطق دمای بالاتری داشتند. بر اساس نتایج Haashemi و همکاران (۲۰۱۶)، مناطق غیرشهری به‌دلیل ظرفیت حرارتی و انتشار کم در شب گرمای خود را سریع‌تر از مرکز شهر از دست می‌دهند. به علاوه ساختمان‌های مرتفع در شهر که از وزش نسیم کوه به دره جلوگیری می‌کنند و همچنین تردد وسایل نقلیه و نور شب (روشنایی ساختمان‌ها و تاسیسات شهری در شب) باعث می‌شوند هوای گرم در نواحی مرکز شهر باقی بماند.

مقایسه مدل‌های GWR و OLS نشان داد مدل GWR در توضیح الگوی فضایی منطقه و رابطه LST بهتر از OLS عمل می‌کنند. عملکرد بهتر GWR در نمایش توزیع فضایی LST‌ها در شیراز در مطالعه Kashki و همکاران (۲۰۲۱) نیز بررسی شد. خروجی‌های حاصل از تحلیل رگرسیون جهانی معمولی در بعد فضایی ثابت بودند. در نتیجه رابطه جهانی و میانگین اطلاعات حاصل از تحلیل رگرسیون جهانی اغلب از فرآیندهای طبیعی واقعی منحرف می‌شوند. فرآیندها و الگوهای طبیعی

خودهمبستگی فضایی شاخص‌های خشکسالی و هیدرولوژیکی را موثر دانستند (Lin and Chen, 2011).

مقایسه روند تغییرات دما، افزایش قابل توجه دما در طول دوره مطالعه را نشان می‌دهد. لکه‌های داغ و سرد به دست آمده از نتایج خودهمبستگی می‌تواند در برنامه‌ریزی شهری، مدیریت اکوسیستم و حفاظت از تنوع زیستی مورد توجه قرار گیرد. اگرچه لکه‌های سرد در منطقه شهری مشاهده می‌شود، اما این به معنی خنک بودن و وضعیت مناسب دمای سطح زمین در منطقه شهری نیست و تنها تضاد شدید با پیرامون خود، به وجود آورنده این شرایط است. مقایسه یافته‌ها با تحقیق مشابه انجام شده توسط Haashemi و همکاران (۲۰۱۶) در شهر تهران نتایج تقریباً مشابهی را در مورد رفتار حرارتی زمین در اقلیم نیمه‌خشک نشان داد. تفاوت دما نشان داد خاک بدون پوشش گیاهی در مقایسه با مناطق شهری دارای مقادیر LST بالاتری در طول روز است. خاک‌های بایر ظرفیت و رسانندگی گرمایی پایینی دارند، به طوری که با طلوع خورشید به سرعت گرم می‌شوند، در حالی که سطوح شهری انرژی خورشیدی را ذخیره می‌کنند و در طول روز دمایی پایین‌تری نسبت به زمین‌های بایر نشان می‌دهند (Haashemi et al., 2016). رابطه متضاد دمای روزانه سطح زمین با پارامترهای سطحی شامل پوشش گیاهی، خاک، آب و شهرنشینی در شهر احمدآباد هند در مطالعه Mathew و همکاران (۲۰۲۲) به خوبی بررسی شد و نتایج یافته‌های حاضر را تایید کرد. در این مطالعه در طول روز دمای شهر پایین‌تر از مناطق روستایی و زمین‌های کشاورزی و بایر اطراف گزارش شده است. خاک و زمین بایر نقش مهمی در تغییرات روزانه دما ایفا می‌کند و در مناطق نیمه‌خشک که تراکم زمین‌های بایر بیشتر است، به عنوان عامل موثر در تأثیر معکوس پدیده جزیره حرارتی شناسایی شده است. این مسئله به‌ویژه در طول دوره زمستان و تابستان قابل مشاهده است (Mathew et al., 2022).

اگرچه پدیده‌های اقلیمی در تغییرات دما نقش دارند، اما برخی اتفاقات مانند تبدیل زمین به دلیل توسعه سریع شهرنشینی و گردشگری، افزایش روزافزون انتشار کربن خودرو در احتراق سوخت و جایگزینی جنگل‌ها با کاربری‌های انسانی از جمله کشاورزی، نشان از نقش عمده انسانی در این خصوص است. زمین‌های کشاورزی (زمین‌های دیم) در زمان‌های مختلف در

طول یک سال و همچنین در طول سال‌های مختلف از نظر نوع پوشش دارای تغییر است. عواملی مانند برداشت محصول، زیورود کردن خاک و خشکی محصولات باعث می‌شود این مناطق دمای بالایی را در طول روز تجربه کنند. از این رو بهینه‌سازی فضایی کاربری‌ها و افزایش مساحت لکه‌های فضای سبز می‌تواند تا حد زیادی به تعدیل دما در کل منطقه کمک کند.

ناهمگونی فضایی منجر به ایجاد عوامل مختلفی می‌شود که بر LST تأثیر می‌گذارد. بنابراین هنگام برنامه‌ریزی برای مناطق مختلف، تجزیه و تحلیل‌های خاص مناطق با LST بالا را می‌توان برای تعیین راهبردهای برنامه‌ریزی مربوطه هدف قرار داد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد مدل GWR در مقایسه با مدل OLS توانایی بهتری برای تشخیص وابستگی روابط فضایی بین LST و پارامترهای تأثیرگذار بر آن دارد. از این رو مدل GWR می‌تواند ابزار مناسبی جهت تعیین قابل‌اعتمادترین برنامه در مقیاس محلی تا منطقه‌ای برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری و منطقه‌ای باشد. از طرفی اصلاح و تغییر کاربری اراضی، اقدامی پرهزینه و گاهی غیرممکن است، اما با آگاهی از روابط فضایی، می‌توان اثرات گرما را با اصلاح برخی مناطق خاص و مشخص شده در محیط پیرامون شهر، بهبود کیفیت کاشت در زمین‌های کشاورزی در این نقاط و در نظر گرفتن بهبود چیدمان فضایی در برنامه‌های آتی توسعه و تغییرات هدفمند کاربری‌ها تا حد ممکن کاهش داد.

منابع

پرور، ز. و سلمان‌ماهینی، ع.ر. (۱۴۰۱) یک برنامه کاربردی مبتنی بر پایتون برای بازیابی دمای سطح زمین (LST) از تصاویر لندست. سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، قابل دسترس در: doi: 10.30495/girs.2023.1973819.2025/ پرور، ز.، محمدزاده، م. و سعیدی، س. (۱۴۰۱) ارزیابی کمی پویایی مکانی- زمانی کاربری/ پوشش زمین و دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم‌های مختلف و داده‌های لندست. نشریه محیط‌زیست طبیعی، قابل دسترس در: doi: 10.22059/jne.2023.350109.2484/ الهی‌گل، ع.، رهنمایمی، ا.، کوزه‌گران، س. و گلمکانی، ت. (۱۳۹۸) شناسایی اقلیم خراسان شمالی با هدف فرهنگ‌سازی برای سازگاری با آن. ششمین کنفرانس

- Guo, A., Yang, J., Sun, W., Xiao, X., Xia Cecilia, J., Jin, C. and Li, X. (2020) Impact of urban morphology and landscape characteristics on spatiotemporal heterogeneity of land surface temperature. *Sustainable Cities and Society*, 63(December): 102443. doi: 10.1016/j.scs.2020.102443/
- 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(4): 352-352.
- Kashki, A., Karami, M., Zandi, R. and Roki, Z. (2021) Evaluation of the effect of geographical parameters on the formation of the land surface temperature by applying OLS and GWR, A case study Shiraz City, Iran. *Urban Climate*, 37(May): 100832. doi: 10.1016/j.uclim.2021.100832/
- Kumari, B., Tayyab, M., Shahfahad, S., Mallick, J., Khan, M.F. and Rahman, A. (2018) Satellite-Driven Land Surface Temperature (LST) using landsat 5, 7 (TM/ETM+ SLC) and landsat 8 (OLI/TIRS) data and its association with built-up and green cover over urban Delhi, India. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 1(3): 63-78. doi: 10.1007/s41976-018-0004-2/
- Kumari, M., Sarma, K. and Sharma, R. (2019) Using Moran's I and GIS to study the spatial pattern of land surface temperature in relation to land use/cover around a thermal power plant in Singrauli district, Madhya Pradesh, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 15(August): 100239. doi: 10.1016/j.rsase.2019.100239/
- Lazzarini, M., Marpu, P.R. and Ghedira, H. (2013) Temperature-land cover interactions: The inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas. *Remote Sensing of Environment*, 130(15 March): 136-152. doi: 10.1016/j.rse.2012.11.007/
- Li, C., Zhao, J., Thinh, N.X., Yang, W. and Li, Z. (2018) Analysis of the spatiotemporally varying effects of urban spatial patterns on land surface temperatures. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 26(3): 216-231.
- Li, S., Zhao, Z., Miaomiao, X. and Wang, Y. (2010) Investigating spatial non-stationary and scale-dependent relationships between urban surface temperature and environmental factors using geographically weighted regression. *Environmental Modelling and Software*, 25(12): 1789-1800, doi: 10.1016/j.envsoft.2010.06.011/
- Lin, M.-L. and Chen, C.W. (2011) Using GIS-based spatial geocomputation from remotely sensed data for drought risk-sensitive منطقه‌ای تغییر اقلیم، تهران، ایران، قابل دسترس در: <https://civilica.com/doc/1002725/>
- Aboelnour, M. and Engel, B. (2018) Application of remote sensing techniques and geographic information systems to analyze land surface temperature in response to land use/land cover change in greater Cairo region, Egypt. *Journal of Geographic Information System*, 10(1): 57-88. doi: 10.4236/jgis.2018.101003/
- Azmi, R., Tekouabou Koumetio, C.S., Diop, E.B. and Chenal, J. (2021) Exploring the relationship between urban form and land surface temperature (LST) in a semi-arid region case study of Ben Guerir city - Morocco. *Environmental Challenges*, 5: 100229. doi: 10.1016/j.envc.2021.100229/
- Cao, Q., Wu, J., Yu, D., Wang, R. and Qiao, J. (2020) Regional landscape futures to moderate projected climate change: A case study in the agro-pastoral transitional zone of North China. *Regional Environmental Change*, 20(2): 66-66. doi: 10.1007/s10113-020-01661-2/
- Chen, T.-L. and Lin, Z.-H. (2021) Impact of land use types on the spatial heterogeneity of extreme heat environments in a metropolitan area. *Sustainable Cities and Society*, 72(September): 103005. doi: 10.1016/j.scs.2021.103005/
- Diaz, L.R., Santos, D.C., Käfer, P.S., Rocha, N.S., Costa, S.T., Kaiser, E.A. and Rolim, S.B. (2021) Land surface temperature retrieval using high-resolution vertical profiles simulated by WRF model. *Atmosphere*, 12(11), 1-22. doi: 10.3390/atmos12111436/
- Duan, X., Chen, Y., Wang, L., Zheng, G. and Liang, T. (2023) The impact of land use and land cover changes on the landscape pattern and ecosystem service value in Sanjiangyuan region of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of environmental management*, 325(Pt B): 116539. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116539/
- Faisal, A.-A., Kafy, A.-A., Al Rakib, A., Akter, K.S., Jahir, D.M.A., Sikdar, M.S., Ashrafi, T.J., Mallik, S. and Rahman, M.M. (2021) Assessing and predicting land use/land cover, land surface temperature and urban thermal field variance index using Landsat imagery for Dhaka Metropolitan area. *Environmental Challenges*, 4(August): 100192. doi: 10.1016/j.envc.2021.100192/
- Feng, Y., Gao, C., Tong, X., Chen, S., Lei, Z. and Wang, J. (2019) Spatial patterns of land surface temperature and their influencing factors: A case study in Suzhou, China. *Remote Sensing*, 11(2): 182-182. doi: 10.3390/rs11020182/

- between urban environment factors and land surface temperature in Mashhad city, Iran. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 25(4): 987-999. doi:10.1016/j.ejrs.2022.10.003/
- Soydan, O. (2020) Effects of landscape composition and patterns on land surface temperature: Urban heat island case study for Nigde, Turkey. Urban Climate, 34(December): 100688. doi: 10.1016/j.uclim.2020.100688/.
- Sun, Q., Tan, J. and Xu, Y. (2010). An ERDAS image processing method for retrieving LST and describing urban heat evolution: a case study in the Pearl River Delta Region in South China. Environmental Earth Sciences, 59(5): 1047-1055, doi 10.1007/s12665-009-0096-3.
- Tiepolo, M., Galligari, A., Tonolo, F.G., Moretto, E. and Stefani, S. (2023) LST-R: A method for assessing land surface temperature reduction in urban, hot and semi-arid Global South. MethodsX, 10(December): 101977. doi: 10.1016/j.mex.2022.101977/
- Tobler, W.R. (1970) A computer movie simulating urban growth in the detroit region. Economic Geography, 46(sup1): 234-240. doi: 10.2307/143141/
- Tu, J. and Xia, Z.-G. (2009) Examining spatially varying relationships between land use and water quality using geographically weighted regression I: Model design and evaluation. The Science of the total environment, 407(1): 358-378. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.09.031/
- Xiang, Y., Ye, Y., Peng, C., Teng, M. and Zhou, Z. (2022) Seasonal variations for combined effects of landscape metrics on land surface temperature (LST) and aerosol optical depth (AOD). Ecological Indicators, 138(May): 108810. doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108810/
- Zhi, Y., Shan, L., Ke, L. and Yang, R. (2020) Analysis of land surface temperature driving factors and spatial heterogeneity research based on geographically weighted regression model. Complexity, 2020(December): 2862917. doi: 10.1155/2020/2862917/
- Zhuang, Q., Wu, S., Yan, Y., Niu, Y., Yang, F. and Xie, C. (2020) Monitoring land surface thermal environments under the background of landscape patterns in arid regions: A case study in Aksu river basin. Science of The Total Environment, 710(25 March): 136336. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136336/
- assessment. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 7(2): 657-668.
- Liu, M., Ma, H. and Bai, Y. (2021) Understanding the drivers of land surface temperature based on multisource data: a spatial econometric perspective. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 14(1): 12263-12272. doi: 10.1109/JSTARS.2021.3129842/
- Martinelli, L. and Matzarakis, A. (2017) Influence of height/width proportions on the thermal comfort of courtyard typology for Italian climate zones. Sustainable Cities and Society, 29(February): 97-106. doi: 10.1016/j.scs.2016.12.004/
- Mathew, A.P.S. and Khandelwal, S. (2022) Investigating the contrast diurnal relationship of land surface temperatures with various surface parameters represent vegetation, soil, water, and urbanization over Ahmedabad city in India. Energy Nexus, 5(16 March): 100044. doi: 10.1016/j.nexus.2022.100044/
- Naim, M.N.H. and Kafy, A.-A. (2021) Assessment of urban thermal field variance index and defining the relationship between land cover and surface temperature in Chattogram city: A remote sensing and statistical approach. Environmental Challenges, 4: 100107. doi: 10.1016/j.envc.2021.100107/
- Nimish, G., Bharath, H.A. and Lalitha, A. (2020) Exploring temperature indices by deriving relationship between land surface temperature and urban landscape. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 18(April): 100299. doi: 10.1016/j.rsase.2020.100299/
- Roberts, D.W. (1986) Ordination on the basis of fuzzy set theory. Vegetatio Journal, 66(3): 123-131.
- Rongali, G., Keshari, A.K., Gosain, A.K. and Khosa, R. (2018) Split-window algorithm for retrieval of land surface temperature using landsat 8 thermal infrared data. Journal of Geovisualization and Spatial Analysis, 2(2): 14-14. doi: 10.1007/s41651-018-0021-y/
- Roy, B. and Bari, E. (2022) Examining the relationship between land surface temperature and landscape features using spectral indices with Google Earth Engine. Heliyon, 8(9): e10668. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e10668/
- Soltanifard, H., Kashki, A. and Karami, M. (2022) Analysis of spatially varying relationships

Analysis of spatial heterogeneity and driving factors of land surface temperature using spatial regression models

Zahra Parvar¹, Marjan Mohammadzadeh^{2*} and Sepideh Saiedi³

1) PhD. Student, Department of Environmental Sciences, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

2) Associate Professor, Department of Environmental Sciences, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. *Corresponding Author Email Address: marjan.mohammadzadeh@gmail.com

3) Assistant Professor, Department of Environmental Sciences, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

Date of Submission: 2022/12/20

Date of Acceptance: 2023/03/04

Abstract

Land surface temperature is a significant factor affecting thermal variation and balance in global studies. In the last two decades, the great necessity for LST data in environmental studies and land resource management activities has made the measurement of LST as a major scientific debate. Discovering the spatial heterogeneity of land surface temperature and analyzing the key factors and specific effective spatial relationships that are affected by time series have great importance in land management. The aim of this study is to analysis of land surface temperature driving factors and spatial heterogeneity using spatial regression models. To review this issue, daily LST maps were prepared by the radiative transfer equation method using Landsat 7 and 8 data for 2002, 2013, and 2021 years in Bojnord city. The analysis of land surface temperature in areas where barren lands prevail requires nighttime temperature data. Therefore, MODIS night LSTs were also prepared as auxiliary maps. Pearson correlation, spatial autocorrelation, ordinary least square, and geographically weighted regression models were used for data analysis. Then, the performance of the models was compared using the coefficient of determination and the Akaike information criterion. The results showed that the GWR approach had a better prediction accuracy and a better ability to describe spatial non-stationarity than the OLS approach. The spatial response of LST and different influencing variables from 2002 to 2021 showed that the development of green space plays an important role in modulating land surface temperatures. Since LST is influenced by various variables, including topography, climatic and atmospheric variables, and vegetation, therefore, understanding spatial relationships and analyzing the areas with high LST can be useful as a way forward in the planning strategies.

Keywords: Geographic weighted regression, Landscape, Ordinary least square, spatial heterogeneity.