



نسخ از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / سال هشتم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۵  
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol.8, No. 3, Autumn 2016

۳۹-۵۸

## آثار ترکیبات بیوفیزیکی در شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری (مطالعه موردی شهر مشهد)

محمود احمدی<sup>۱\*</sup>، عباسعلی داداشی رودباری<sup>۲</sup>

۱. استادیار اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی شهری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۹/۲۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۹



### چکیده

پدیده جزیره حرارتی شهری، با توجه به دگرگونی‌های هواشناسی همراه با افزایش شهرنشینی، طی سال‌های واپسین شدت یافته است. الگوهای فضایی-زمانی ترکیبات بیوفیزیکی که دربرگیرنده پوشش گیاهی، سطح نفوذناپذیر و نوع خاک در شهرند جزایر حرارتی شهری را تحت تأثیر چشمگیری قرار می‌دهند. هدف از این پژوهش مطالعه نقش پارامترهای بیوفیزیکی شهری در شکل‌گیری و خوشه‌ای شدن جزایر حرارتی شهری مشهد مقدس است. به منظور دستیابی به هدف مطرح‌شده، تصاویر حسگرهای OLI و TIRS ماهواره لندست ۸ برای اوت سه سال ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ استفاده شد. برای استخراج مقادیر UHI از LST، از یک رویکرد نوآورانه شیء‌گرا استفاده شد؛ به طوری که پس از محاسبه دمای سطح زمین (LST) با استفاده از شاخص محلی همبستگی مکانی (LISA) خوشه‌های گرم و سرد جزایر حرارتی مشهد استخراج شدند. برای ارزیابی ترکیبات بیوفیزیکی شهر مشهد نیز سه شاخص NDVI، NDBI و NDBaI به کار برده شد. نتایج نشان داد در تحلیل همبستگی دوبه‌دو پارامترهای بیوفیزیکی با دمای سطح زمین، با شدت مقدار LST، ناهمگنی فضایی خوشه‌ها به شکل غیرخطی افزایش می‌یابد. تحلیل‌های مکانی سه نوع جزیره حرارتی شهری را آشکار کرده است: جزایر حرارتی پیرامونی، جزایر حرارتی کانونی و جزایر حرارتی خطی. تحلیل خودهمبستگی فضایی با شاخص‌های موران و گری نشان از مقداری کاهش دارد که مبین از بین رفتن نظم فضایی دمای سطح زمین شهر مشهد است. همبستگی مکانی با شاخص موران محلی بر افزایش وسعت جزایر حرارتی گرم در طول دوره‌های مورد مطالعه تأکید داشته است.

**کلیدواژه‌ها:** جزایر حرارتی شهری، ترکیبات بیوفیزیکی، شاخص محلی همبستگی مکانی (LISA)، شهر مشهد.

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، ولنجک، میدان شهید شهریار، دانشگاه شهید بهشتی، تلفن: ۰۹۱۲۱۴۸۷۴۹۷.

## ۱- مقدمه

همان‌طور که گفته شد، امروزه سنجش از دور ابزاری کارآمد برای درک محیط شهری قلمداد می‌شود زیرا با قابلیت منحصربه‌فرد خود (تکرار تصاویر دریافت‌شده از یک منطقه)، نقشه‌هایی با طیف‌های متعدد فضایی در اختیار عموم قرار داده و پرده از مشکلات بسیاری در سطح ریزیمانه (سطح مطالعاتی شهر) برداشته است (Yuan & Bauer, 2007). خدمات دانش سنجش از دور به همین‌جا ختم نمی‌شود. به‌طور خاص، سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) مجموعه بانک داده‌ای با عنوان NLCD<sup>۱</sup> را به کمک تصاویر سنجنده‌های TM<sup>+</sup> و ETM<sup>+</sup> توسعه داد (Yang et al., 2001) که کمک ارزنده‌ای به تفسیر موضوعی پوشش سطح زمین و کاربری اراضی کرد. از آنجاکه روش‌های سنتی طبقه‌بندی پوشش زمین نتوانستند نیاز روزافزون مطالعات شهری را برآورده سازند، تحلیل‌هایی در حد بیخته<sup>۲</sup> توسعه یافتند (Deng & Wu, 2012). این روش از مطالعات شهری در ادبیات علمی به (V-I-S)<sup>۳</sup> یا پوشش گیاهی - سطح نفوذناپذیر - خاک مشهور است. طبق این چارچوب مفهومی، انواع پوشش زمین (به جز آب) در محیط شهری می‌تواند یک ترکیب<sup>۴</sup> در نظر گرفته شود. مفهوم بیوفیزیکی شهر از سه بخش اساسی تشکیل شده است: پوشش گیاهی، سطح نفوذناپذیر و خاک. بر این اساس، دو گروه از روش‌های گوناگون برای تعیین کمیت ترکیبات بیوفیزیکی شهری توسعه داده شده‌اند: گروه اول شامل روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین است؛ مانند شبکه عصبی مصنوعی (ANN) (Mohapatra & Wu, 2008; Pu et al., 2008).

جزایر حرارتی شهری (UHI)<sup>۱</sup> به پدیده‌ای اطلاق می‌شود که در آن دمای مناطق شهری، در مقایسه با مناطق اطراف (روستایی)، نمودی آشکار داشته باشد. این پدیده شهری با توجه به دگرگونی هواسپهر و همراه با افزایش شهرنشینی شدت یافته است (Voogt & Oke, 2003; Song & Wu, 2016). بر این اساس، فعالیت‌های متمرکز بشر در مناطق شهری به انتشار انرژی فراوان منجر می‌شود و همین عامل جنباننده‌ای برای دگرگونی آب‌وهوای مناطق محسوب می‌شود که با دگرگونی تبادلی انرژی همراه است (Yuan & Bauer, 2007). اهمیت جزایر حرارتی شهری باعث شد پژوهشگران و اندیشمندان رشته‌های وابسته به علوم محیطی و شهری تعاریف و دسته‌بندی‌های گوناگونی از این پدیده داشته باشند. در یکی از این بخش‌بندی‌ها که وکت و اوکی<sup>۲</sup> (۲۰۰۳) داشته‌اند و از مهم‌ترین و پراستنادترین بخش‌بندی‌های این پدیده شهری است، جزایر حرارتی شهری سه دسته شده‌اند: ۱. لایه تاج پوشش جزیره حرارتی (CLHI)<sup>۳</sup>، ۲. لایه مرزی جزیره حرارتی (BLHI)<sup>۴</sup> و ۳. سطح جزیره حرارتی شهری (SUHI)<sup>۵</sup>. از دو گروه نخست می‌توان با عنوان جزیره حرارتی هواسپهری یاد کرد که بیشتر با استفاده از سوابق دمای هوا جمع‌آوری شده از پیمونگاه‌های آب‌وهواشناسی ارزیابی می‌شوند؛ در حالی که SUHI بیشتر از طریق دمای سطح زمین (LST)<sup>۶</sup> بازیابی و از ماهواره‌های سنجش از دور رصد می‌شوند و معمولاً با توجه به دقت بالا و پوشش مکانی فراگیر و کم‌هزینه‌تر بودن در مقایسه با داده‌های گردآوری‌شده از طریق پیمونگاه‌های آب‌وهواشناسی، از مقبولیت بسیار برخوردارند. از سوی دیگر، این فناوری قادر است الگوهای فضایی و دگرگونی جزایر حرارتی شهری را آشکارتر به نمایش بگذارد که منجر به آشکارسازی نقش پارامترهای بیوفیزیکی در شکل‌گیری و هدایت ساختارمند جزایر حرارتی شهری می‌شود (Li and et al., 2011; Weng, 2012).

1. Urban heat island (UHI)
2. Voogt & Oke
3. canopy layer heat island
4. boundary layer heat island
5. surface urban heat island
6. land surface temperature
7. national land use land cover
8. sub-pixel
9. Vegetation – Impervious surface – Soil
10. combination

حرارت چشمگیری بوده که ناشی از نقش پرننگ از بین رفتن پوشش گیاهی بوده است. همچنین در پایان، با استفاده از رگرسیون وزن دار جغرافیایی، روابط فضایی اجتماعی و اقتصادی با دمای سطح زمین ارزیابی شد که نشان از نقش مثبت عوامل انسانی در شکل گیری جزایر حرارتی داشته است. بررسی اثر ترکیبات بیوفیزیکی شهری در دمای سطح زمین در چهار شهر منطقه ویسکانسین شامل واشنگتن، اوزاکی<sup>۷</sup>، میلوکی<sup>۸</sup> و واکوشا<sup>۹</sup> پژوهشی است که دنگ و وو<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۳) انجام دادند. در این پژوهش، آنها سطح جزیره حرارتی شهری (SUHI) مناطق نامبرده را مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که رطوبت موجود در خاک (خشک و مرطوب) آثار مهمی در مدلسازی SUHI دارد. هر چند مطالعه دنگ و وو نتایج ارزشمندی را در مدلسازی سطح جزیره حرارتی شهری (SUHI) عرضه کرد؛ نتوانست آن طور که بایسته است به آثار ترکیبات بیوفیزیکی شهری در مدلسازی خوشه‌های جزایر حرارتی شهری بپردازد. پژوهشی که می‌تواند ضمن طرح نقاط قوت پژوهش آنها نقص آن را برطرف و روشی نو را بررسی کند، مطالعه گائو و همکاران<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۵) است که در گوانگژو<sup>۱۲</sup>، مرکز استان گوانگدونگ<sup>۱۳</sup> چین، انجام شده است. نامبردگان در این پژوهش، ضمن مطالعه توأمان شاخص‌های NDVI، NDBI و NDBal، با استفاده از شاخص همبستگی مکانی (LISA) خوشه‌های جزایر حرارتی شهری را استخراج کردند و به این نتیجه رسیدند که شاخص‌های

رگرسیون و درخت تصمیم‌گیری (Lu & Weng, 2009; Mohapatra & Wu, 2010) و مدل‌های رگرسیونی (Yang & Liu, 2005; Yang, 2006). در این روش، اطلاعات منتج از ویژگی‌های طیفی و مکانی استخراج شده از روش‌های سنجش از دور با یک رابطه تجربی تصویری سازی می‌شوند. گروه دوم شامل جداسازی تکنیک‌های طیفی است (Small, 2005; Powell et al., 2008; Weng, 2012). فرض اساسی روش حاضر بر این قاعده استوار است که هر یاخته ترکیبی از طیف‌های چند نمونه همگن است که پوشش کسر فضایی هریک از مؤلفه‌های زمین می‌تواند ناشی از رویکرد واکاوی طیفی ترکیبی (SMA)<sup>۱</sup> باشد.

مطالعات پیشین درباره ارتباط رفتار و چشم‌اندازهای پیش روی جزایر حرارتی شهری نشان می‌دهد ترکیب و پیکربندی پوشش زمین و کاربری‌های آن در این دست از مطالعات اهمیت وافری دارد (Weng et al., 2004; Connors et al., 2013; Asgarian et al., 2015; Feyisa et al., 2014). مطالعات جهانی در این زمینه نشان می‌دهد دانش پردازش داده‌های سنجش از دور در سطوح شهری طی سال‌های اخیر روند افزایشی چشمگیری داشته است.

گائو و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۰) در پژوهشی شدت جزایر حرارتی سرد (UCI) در پارک‌های شهری ژاپن را با استفاده از داده‌های ASTER و IKONOS ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آنها در ۹۲ پارک در ناگویا<sup>۳</sup> نشان داد اثر خنک‌کنندگی به اندازه و شرایط تابش فصلی پارک وابسته است و اندازه پارک به صورت غیرخطی به خنک‌کنندگی محیط اطراف خود همبسته است. بویانتیو و وو<sup>۴</sup> (۲۰۱۰) ارتباط تغییرات زمانی-فضایی دمای سطح زمین با پوشش زمین و الگوهای اجتماعی و اقتصادی در بیابان سونورا<sup>۵</sup> در شمال ایالت آریزونا را بررسی کردند. آنها دو جفت تصویر روز و شب در نیمه گرم سال (ژوئن) و نیمه سرد سال (اکتبر) را مطالعه کردند. نتایج پژوهش آنان حاکی از اختلاف درجه

1. Spectral Mixture Analysis
2. Cao et al.
3. Urban Cooling Island (UCI)
4. Nagoya
5. Buyantuyev & Wu
6. Sonoran
7. Ozaukee
8. Milwaukee
9. Waukesha
10. Deng & Wu
11. Guo et al.
12. Guangzhou
13. Guangdong

۷ دقیقه و در حوضه آبریز کشف‌رود، بین رشته‌کوه‌های بینالود و هزارمسجد قرار دارد. ارتفاع شهر از سطح دریا ۹۹۹ متر است. براساس سرشماری سال ۱۳۹۰، جمعیت آن (بدون در نظر گرفتن توس و قرقی) بالغ بر ۲۷۶۶۲۵۸ نفر بوده است. طبق آخرین برآوردها جمعیت مشهد در سال ۱۳۹۲ برابر با ۲۹۰۶۷۸۲ نفر است (شکل ۱).

**۱-۲- داده‌های پژوهش:** به‌منظور استخراج دامنه‌های دمایی شهر مشهد در فصل گرم، تصاویر حسگرهای *OLI*<sup>۲</sup> و *TIRS*<sup>۳</sup> ماهواره لندست ۸ برای ماه اوت استفاده شد. در جدول ۱، اطلاعات هریک از تصاویر اخذشده آمده است.

برای استخراج دمای سطح زمین (LST) مشهد از باند ۱۰ حسگر *TIRS* استفاده شد. از مهم‌ترین موارد تحلیل در این مطالعه، تبدیل ارزش‌های رقومی تصویر به رادیانس طیفی است (Chander and Groeneveld, 2009).

در تصحیحات اتمسفری روی تصویر اصلی، معمولاً فضای هواسپهری به‌شکل یکنواخت در نظر گرفته می‌شود (Sobrin et al., 2004). بنابراین، تصحیحات هواسپهری تأثیر چندانی در آنالیز این مطالعه نخواهد داشت. با پیاده‌سازی تکنیک FLAASH روی تصویر پایه، خطای اتمسفری تا حد ممکن کاهش یافت. مراحل برآورد دمای سطح زمین (LST) بدین شکل انجام شد:

۱. تبدیل ارزش‌های رقومی تصویر به رادیانس طیفی؛ ۲. تبدیل رادیانس طیفی به دمای روشنایی (Chander et al., 2009)؛ ۳. تبدیل دمای روشنایی به دمای جنبشی (Artis & Carnahan, 1982; Barsi et al., 2003; Chander & Markhan, 2003; Chander et al., 2009). در مرحله سوم، تصحیح گسیل‌مندی دمای سطح زمین برای تبدیل دمای روشنایی به دمای جنبشی مطابق معادلات لی و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۱) و سوپرینو و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۰۴) محاسبه شد.

NDVI و NDBI بیشترین تأثیر را در خوشه‌های جزایر حرارتی شهری دارند. بررسی تأثیر بیوفیزیکی در جزیره حرارتی شهری پژوهشی است که سونگ و وو<sup>۱</sup> (۲۰۱۶) در ایالت ویسکانسین امریکا انجام داده‌اند. نتیجه کلی این پژوهش نشان از نقش بی‌چون‌وچرای سطوح نفوذناپذیر در تنوع جزایر حرارتی مناطق شهری دارد.

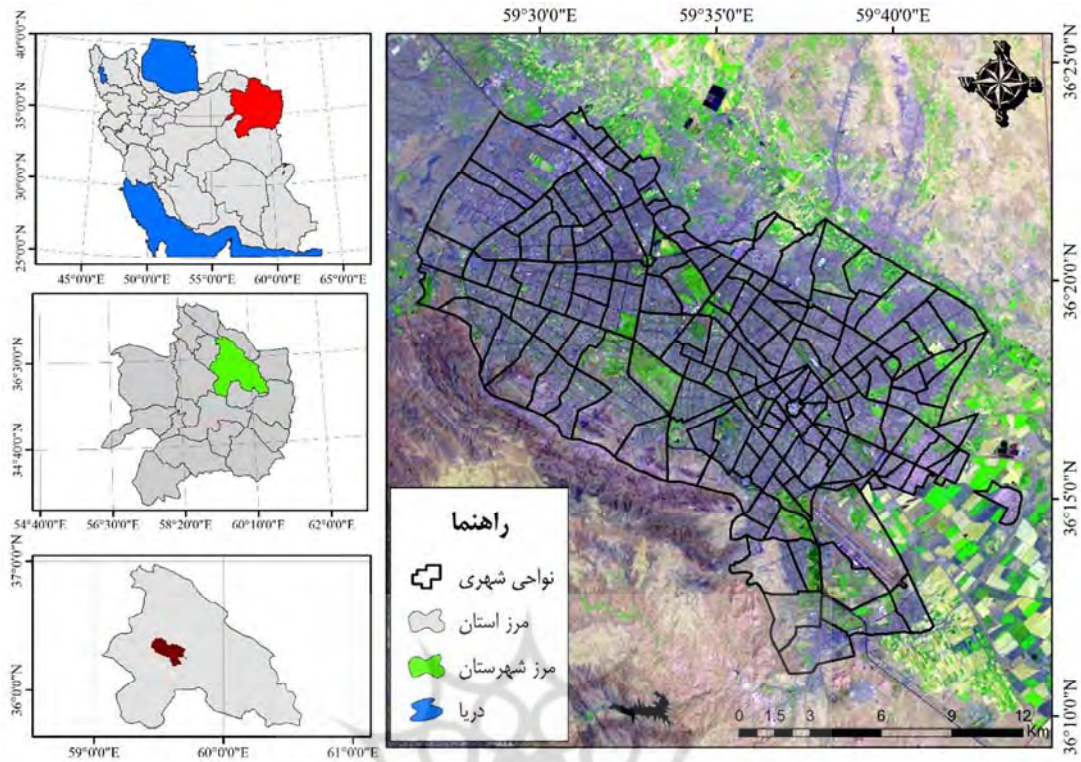
از بین مطالعاتی که در ایران انجام شده است، می‌توان به پژوهش احمدی و همکاران (۱۳۹۱) اشاره کرد که در آن تغییرات زمانی- مکانی الگوهای حرارتی شیراز را بررسی کرده‌اند. نتایج بررسی آنان که مبتنی بر پردازش تصویر سنجنده‌های TM و ETM<sup>+</sup> بوده است نشان داد حلقه‌های دمایی شیراز با مناطق آلوده و پرتراپیک شهری انطباق دارد و سردترین مناطق نیز منطبق بر پوشش گیاهی است. تحلیل فضایی دمای شیراز در فصل‌های گرم و سرد سال با تأکید بر پردازش‌های آماری و ماهواره‌ای نیز پژوهشی است که احمدی و همکاران (۱۳۹۴) آن را کانون توجه خود قرار دادند. خروجی این پژوهش نشان داد که در فصل گرم، پایین‌ترین آستانه‌های دمایی منطبق بر پوشش گیاهی بوده اما در فصل سرد سال، بر مناطق شمال و شمال‌غرب که در سیطره شهرک‌های نوساز و ارتفاعات شمالی شهرند منطبق بوده است.

از دیگر پژوهش‌ها می‌توان به مطالعات شکبیا و همکاران (۱۳۸۸)، موسوی بایگی و همکاران (۱۳۹۱)، صادقی‌نیا و همکاران (۱۳۹۱؛ ۱۳۹۲) اشاره کرد. با توجه به اینکه تا کنون پژوهش مستندی با رویکرد ترکیبات بیوفیزیکی شهری و شاخص همبستگی مکانی انجام نشده، پژوهش حاضر این موضوع را کانون توجه خود قرار داده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

مشهد مقدس، مرکز استان خراسان رضوی، در سال ۱۳۹۲ با احتساب نواحی منفصل توس و قرقی با ۳۲۸ کیلومتر مربع مساحت، در شمال‌شرق ایران و در طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۲ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۳۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و

1. Song & Wu  
2. Operational Land Imager (OLI)  
3. Thermal Infrared Sensor (TIRS)  
4. Li et al.  
5. Sobrin et al.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. تصاویر منتخب برای استخراج دمای سطح زمین

ردیف	فصل	تاریخ برداشت میلادی	تاریخ برداشت خورشیدی	ردیف و گذر	نوع حسگر
۱	تابستان	۲۰۱۳/۰۸/۱۳	۱۳۹۲/۰۵/۲۲	۱۵۹-۳۵	<i>TIRS</i> و <i>OLI</i>
۲	تابستان	۲۰۱۴/۰۸/۱۶	۱۳۹۳/۰۵/۲۵	۱۵۹-۳۵	<i>TIRS</i> و <i>OLI</i>
۳	تابستان	۲۰۱۵/۰۸/۰۲	۱۳۹۴/۰۵/۱۱	۱۵۹-۳۵	<i>TIRS</i> و <i>OLI</i>

$$NDBI = \frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR}$$

رابطه (۱)

$$NDBaI = \frac{SWIR1 - TIRS1}{SWIR1 + TIRS1}$$

رابطه (۲)

در روابط بالا، *SWIR* معرف باند طول موج کوتاه مادون قرمز و *TIRS* معرف باند حرارتی است.

برای ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی، برخی شاخص‌ها مطرح شده که متداول‌ترین و دقیق‌ترین آنها شاخص NDVI است (Atzberger, 2013) و در این پژوهش از قابلیت‌های این شاخص استفاده شد. همچنین در این پژوهش، به منظور ارزیابی دیگر پارامترهای بیوفیزیکی شهری از دو شاخص تفاضل نرمال‌شده مناطق ساخته‌شده  $NDBI^1$  (رابطه ۱) و شاخص تفاضل نرمال‌شده برهنگی (خاک)  $NDBaI^2$  (رابطه ۲) (Zha and et al., 2003) بهره بردیم.

1. Normalized Difference Build-up Index (NDBI)
2. Normalized Difference Bareness Index (NDBaI)

## ۲-۲- استخراج خوشه‌های جزایر حرارتی شهری

(UHI)

$$c = \frac{(n-1) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - y_j)^2}{2W \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad i \neq j.$$

در تضاد با شاخص موران، مقدار مورد انتظار ضریب «گری» از اندازه کوچک N متأثر نمی‌شود و غالباً برابر ۱ است. فرض صفر در آزمون گری این‌گونه بیان می‌شود که واحدهای فضایی مورد نظر با یکدیگر تفاوتی ندارند.

برای تشخیص خوشه‌های گرم و سرد جزایر حرارتی شهری مشهد از شاخص محلی همبستگی مکانی<sup>۴</sup> (LISA) استفاده شده است. این شاخص مقادیر دمای سطح زمین (LST) را در مکان‌هایی که نزدیک یکدیگر واقع شده و بیشترین شباهت مکانی را دارند به صورت یک خوشه گرم/سرد طبقه‌بندی می‌کند (Anselin, 1995; Anselin et al., 2006). بنابراین، در این مطالعه برای تعیین خوشه‌های جزایر حرارتی شهری، پس از به دست آوردن مقدار دمای سطح زمین از روش موران محلی<sup>۵</sup> استفاده شد. خوشه‌های آشکار شده با این روش رابطه بین جزایر حرارتی شهری و ترکیبات بیوفیزیکی شهری را در مقیاس شهر مشهد بطور بالقوه آشکار کرده‌اند. موران محلی به شکل زیر محاسبه می‌شود (Ibid.):

رابطه (۴)

$$I_i = n \times \frac{(x_i - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \times \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x})$$

$$= \frac{z_i}{m_0} \times \sum_j w_{ij} z_j, \quad \text{with: } m_0 = \sum_i \frac{z_i}{n}$$

در رابطه بالا،  $x_i$  مقدار ویژگی در عارضه  $i$  و  $\bar{x}$  میانگین ویژگی مورد نظر و  $w_{i,j}$  وزن فضایی بین عارضه  $i$  و  $j$  است.

برای بررسی الگوی فضایی داده‌ها به منظور تعیین کمیت و همچنین آزمون ساختار فضایی پارامترهای مشاهده شده چند آماره فضایی وجود دارد؛ مانند موران<sup>۱</sup> و گری<sup>۲</sup>. هر دو شاخص نامبرده را می‌توان برای خودهمبستگی فضایی داده‌ها به کار برد. خودهمبستگی فضایی موران خودهمبستگی فضایی را براساس مکان پراکنش دو مقدار بررسی می‌کند و ویژگی مورد نظر از عارضه جغرافیایی را در آن مکان تحلیل می‌کند (Griffith, 1987). برای محاسبه آماره یا شاخص موران، ابتدا نمره استاندارد Z و P-Value محاسبه می‌شود و در مرحله بعد، به ارزیابی و معنادار بودن شاخص پرداخته می‌شود (Fischer & Getis, 2009). برای محاسبه خودهمبستگی فضایی با استفاده از شاخص موران جهانی، از قابلیت‌های نرم‌افزار ArcGIS 10.3 استفاده شد. جزئیات کامل این روش‌ها و شیوه محاسباتی آنها را اسکات و جیکانس<sup>۳</sup> (۲۰۱۰) و فلاح قالمهری و همکاران (۲۰۱۶) بیان کردند.

به طور کلی اگر مقدار شاخص موران نزدیک به عدد +۱ باشد، داده‌ها خودهمبستگی فضایی و الگوی خوشه‌ای دارند و اگر مقدار شاخص موران نزدیک به عدد -۱ باشد، داده‌ها از هم گسسته و پراکنده‌اند. شاخص گری نیز مشابه موران است اما به جای تأکید بر انحراف از میانگین، اختلاف هر ناحیه را با ناحیه دیگر برآورد می‌کند (Fischer & Getis, 2009). ضریب «گری» بین ۰ تا ۲ در نوسان است که مقدار صفر دلالت بر خودهمبستگی فضایی کاملاً مثبت دارد (زمانی که ارزش همه همسایگی‌ها مشابه باشد). بنابراین، حاصل ضرب ضربدری برابر صفر است و مقدار ۲ بر خودهمبستگی فضایی کاملاً منفی دلالت دارد. مقدار ۱ در ضریب «گری» به مفهوم نبود رابطه فضایی است. این شاخص را همانند رابطه (۳) می‌توان نوشت.

1. Moran's I
2. Geary's c
3. Scott & Janikas
4. Local Indicators of Spatial Autocorrelations (LISA)
5. local Moran's I

اوت، سه دوره مورد مطالعه (۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵) مشخص شد که دمای سطح زمین در حال افزایش است (جدول ۲) به طوری که کمینه دمایی از ۲۶/۶۷ درجه سلسیوس در سال ۲۰۱۳ به ۳۱/۸۹ درجه سلسیوس در سال ۲۰۱۴ و در سال ۲۰۱۵ همین مقدار به ۳۴/۸۱ درجه رسیده است. میانگین دمایی سطح زمین مشهد نیز افزایش بسیاری داشته؛ به طوری که میانگین آن از ۳۷/۲۳ درجه سلسیوس در سال ۲۰۱۳ به ۴۳/۴۴ درجه در سال ۲۰۱۴ و ۴۷/۰۶ درجه در سال ۲۰۱۵ رسیده است. بیشینه دمایی دوره‌های مورد مطالعه نیز روند افزایشی چشمگیری را نشان داده است؛ چنانکه اختلاف بین دو سال آغازین (۲۰۱۳) و پایانی (۲۰۱۵) ۱۰/۲۲ درجه سلسیوس بوده است. چولگی دمای سطح زمین به‌غیر از سال ۲۰۱۳، در دو سال دیگر مثبت است. چولگی منفی دمای سطح زمین در سال ۲۰۱۳ به مفهوم آن است که دنباله توزیع به سمت چپ کشیده شده است. یعنی فراوانی یاخته‌های بالاتر از میانگین بیش از فراوانی یاخته‌های پایین‌تر از میانگین است. چولگی مثبت بیانگر آن است که دنباله توزیع دمای سطح زمین به سمت راست کشیده شده است؛ در هر سه دوره مورد مطالعه دیده می‌شود که میانگین و میانه به هم نزدیک است اما مد تفاوت چشمگیری با دو آماره دیگر دارد (به‌ویژه در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵). این مورد هرچند به دلیل اختلاف دمایی شهر مشهد است، شاهدی بر این مدعاست که میانگین دمای سطح زمین این شهر دفعات بیشتری دارای دمای کمتر از میانگین بوده است. ضریب چولگی ( $g1$ ) نیز به‌غیر از سال ۲۰۱۳، در دو سال دیگر مقدار عددی مثبت را نشان داده که مبین چوله به‌راست بودن دمای سطح زمین

خروجی این آماره چهار نوع الگوی فضایی خواهد بود که به این شکل تعریف شده‌اند: بالا-بالا (H-H)، کم-کم (L-L)، کم-بالا (L-H)، و بالا-پایین (H-L). H-H (جزایر حرارتی گرم): این نوع از خوشه‌بندی جزایر حرارتی شهری معرف مناطقی است که دمای سطح زمین (LST) آنها تا حد بسیاری بالاتر از سطح میانگین کل پهنه است. L-L (جزایر حرارتی سرد): این نوع از خوشه‌بندی جزایر حرارتی شهری معرف مناطقی است با دمای سطح زمین نسبتاً کمتر از سطح میانگین کل پهنه. H-L (جزیره گرم در کنار سرد): این نوع از خوشه‌بندی معرف مناطقی با دمای سطح زمین بالا است؛ در حالی که دمای مناطق مجاور آن از حد میانگین کل پهنه کمتر است. L-H (جزیره سرد در کنار گرم): این نوع از خوشه‌بندی جزایر حرارتی شهری معرف مناطقی با دمای سطح زمین پایین است؛ در حالی که دمای مناطق مجاور آن از حد میانگین کل پهنه بیشتر است. افزون بر چهار نوع جزیره حرارتی یادشده، خروجی این تابع شکل پنجمی نیز ممکن است داشته باشد که با شکل اختصاری NS (فاقد معناداری) نمایش داده می‌شود. مناطقی با چنین مقداری در حقیقت نشان می‌دهند که هیچ ارتباط مکانی محلی چشمگیری در دمای سطح زمین آن پهنه وجود نداشته است. در این مطالعه، به منظور به حداقل رساندن پیچیدگی فضای شهری از تابع افزایش‌بندی چندحالتی<sup>۱</sup> CHull (Wilderjans et al., 2013) در نرم‌افزار<sup>۲</sup> CHULL استفاده شده است و فضای بهینه شهری که خطای ناشی از شکل‌شناسی محیطی آن به کمترین میزان ممکن رسیده است مورد ارزیابی قرار گرفته است.

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- تحلیل آماری دمای سطح زمین شهر مشهد

با بررسی داده‌های دمای سطح زمین مشهد برای ماه

#### 1. Multimode Partitioning

۲. این نرم‌افزار از تارنمای

<http://ppw.kuleuven.be/okp/software/CHULL> قابل

بارگیری است.

از پیچیدگی منظر شهری مشهد باشد. چنین رابطه نامنتظره‌ای در پژوهش‌هایی که در مناطق گوناگون شهری در دیگر نقاط جهان انجام شده است نیز مشاهده شد؛ مانند پژوهش‌های ونگ و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۴)، یو و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۷) و گنو و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۵).

جدول ۳. ضریب همبستگی پیرسون بین دمای سطح زمین

	LST	NDVI	NDBI	NDBal
LST	۱/۰۰			
NDVI	-۰/۶۹**	۱/۰۰		
NDBI	۰/۶۵**	۰/۶۷**	۱/۰۰	
NDBal	-۰/۳۸*	۰/۳۹**	۰/۳۳**	۱/۰۰

\* همبستگی معنادار در سطح ۰/۰۵ درصد  
\*\* همبستگی معنادار در سطح ۰/۰۱ درصد

مطالعات بسیاری «لبه دمای» را با تأکید بر رابطه Gillies et al., 1997; ) LST و NDVI واکاوی کردند ( Carlson et al., 2000; Li et al., 2011; Guo et al., 2015). در این مطالعه، مشخص شد که پراکنش LST و NDVI به‌وضوح هر دو لبه گرم<sup>۶</sup> و لبه سرد<sup>۷</sup> را نمایش داده است. در شکل‌های ۲ تا ۴، محور بالایی مثلث لبه گرم و محور پایینی آن لبه سرد را نشان می‌دهد (با توجه به حجم بالای نمودارهای ترسیمی فقط به نمودارهای NDVI و LST بسنده شد). یاخته‌هایی با ارزش گرم‌تر در حقیقت همان یاخته‌هایی با پوشش گیاهی ضعیف‌تر (در شاخص NDVI) و خشک‌تر (در شاخص NDBI) در نزدیکی لبه گرم‌اند. عکس آن نیز برای لبه سرد صادق است. روابط بین NDVI و LST نشان می‌دهد که روابط این دو پارامتر در سطح شهر

1. Pearson correlation coefficient
2. Weng et al.
3. Yue et al.
4. Guo et al.
5. temperature edge
6. warm edge
7. cool edge

مشهد در این دو سال است. همچنین این آماره نشان می‌دهد که هرچه قدرمطلق ضریب چولگی بزرگ‌تر باشد، تفاوت جامعه آماری از نظر قرینگی با توزیع متقارن بیشتر است. ضریب درجه اوج ( $g2$ ) نشان‌دهنده تفاوت مکانی دمای سطح زمین در سطح مشهد است. همان‌طور که از این شاخص پیداست، هرچه اختلاف دمای کمینه و بیشینه کمتر می‌شود مقدار شاخص نیز کاهش می‌یابد. این امر تداعی‌گر خوشه‌ای شدن دمای سطح زمین است.

جدول ۲. شاخص‌های آماری دمای سطح زمین مشهد

نوع آماره	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۵
میانگین	۳۷/۲۳	۴۳/۴۴	۴۷/۰۶
میانه	۳۶/۹۶	۴۲/۷۴	۴۶/۳۹
انحراف معیار	۳/۸۲	۳/۲۲	۳/۳۷
انحراف از میانگین	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۵۹
کمینه	۲۶/۷۲	۳۱/۸۹	۳۴/۸۱
مد	۳۵/۱۴	۴۰/۹۲	۴۵/۸۳
چولگی	-۱/۰۴	۰/۳۳	۰/۲۷
بیشینه	۴۸/۰۸	۵۴/۱۵	۵۸/۳۰
$g1$	-۱/۰۵۵	۰/۳۲	۰/۲۷
$g2$	۱۰/۵۴	۵/۷۲	۵/۷۱

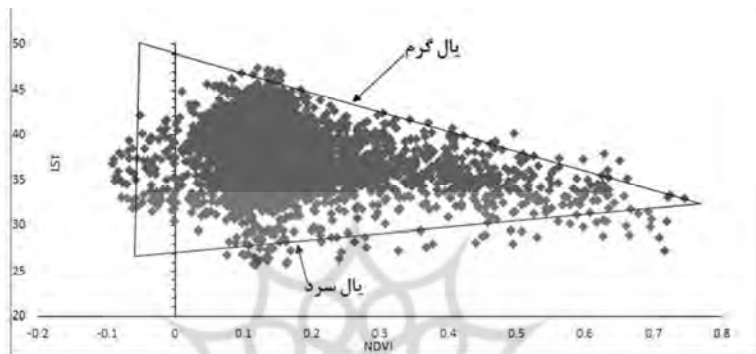
### ۳-۲- واکاوی همبستگی دمای سطح زمین (LST) با شاخص‌های NDVI، NDBI و NDBal

ضرایب همبستگی پیرسون<sup>۱</sup> نشان داد تمامی متغیرهای بیوفیزیکی با LST (جدول ۳) رابطه معناداری دارند. اما در مجموع، NDVI ارتباط قوی‌تری با دمای سطح زمین نشان داده است. همان‌طور که در این جدول پیداست، در مجموع شاخص NDVI اثر منفی در LST داشته و برعکس، شاخص NDBI اثر مثبت در LST داشته است. شاخص تفاضل نرمال‌شده برهنگی (NDBal) که نشان‌دهنده خاک در مناطق شهری است ( Zhao & Chen, 2005; Chen et al., 2006 ) تمایل به رابطه‌ای منفی با مقدار LST دارد. همچنین رابطه منفی نامنتظره بین LST و NDBal ممکن است ناشی

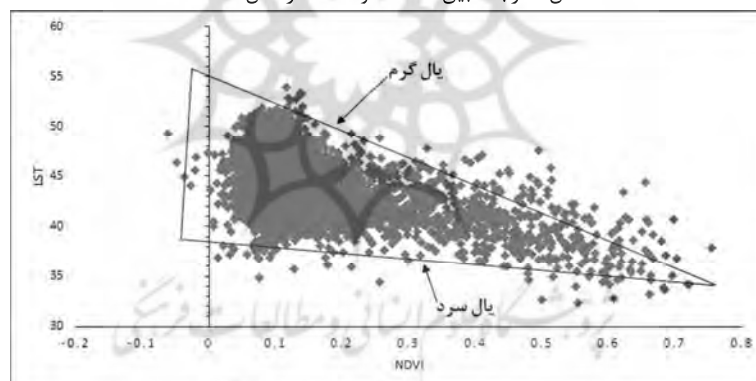


تأیید خوبی بر این است که رابطه بین NDVI و LST و یا میان NDBI و LST همیشه الزاماً خطی یا غیرخطی نیست. همچنین، ارزیابی نمودارهای مربوط به شاخص NDBI نشان داده است که رابطه خطی قوی فقط زمانی پدید می‌آید که مقدار شاخص بیشتر از ۰/۳ و کمتر از ۰/۷- باشد. همچنین نتیجه شاخص مورد نظر نه با شدت شاخص‌های NDVI و NDBI برای شاخص NDBaI نیز صادق است.

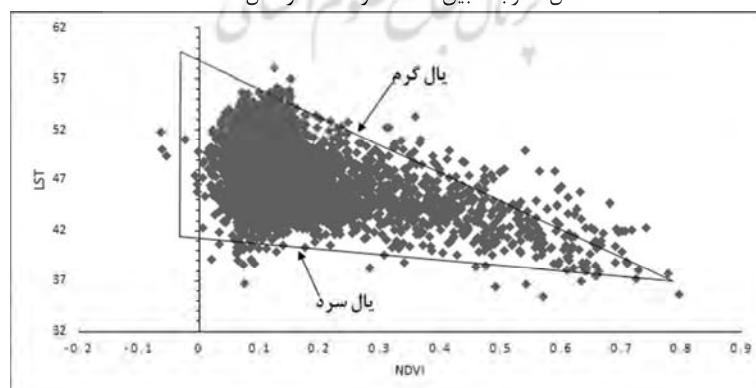
پراکندگی یکنواختی ندارد. رابطه قوی منفی بین دو پارامتر نامبرده زمانی اتفاق می‌افتد که شهر یا سطحی از آن دارای پوشش یکدست باشد و یا اینکه دارای کاهش تدریجی باشد (برای نمونه، محله نوفل لوشاتو در غرب مشهد). یافته حاضر با نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش‌های یوان و بائر<sup>۱</sup> (۲۰۰۷) و لی و همکاران (۲۰۱۱) همخوانی دارد. نتایج ارزیابی لبه‌های دمایی



شکل ۲. رابطه بین NDVI و LST در سال ۲۰۱۳



شکل ۳. رابطه بین NDVI و LST در سال ۲۰۱۴

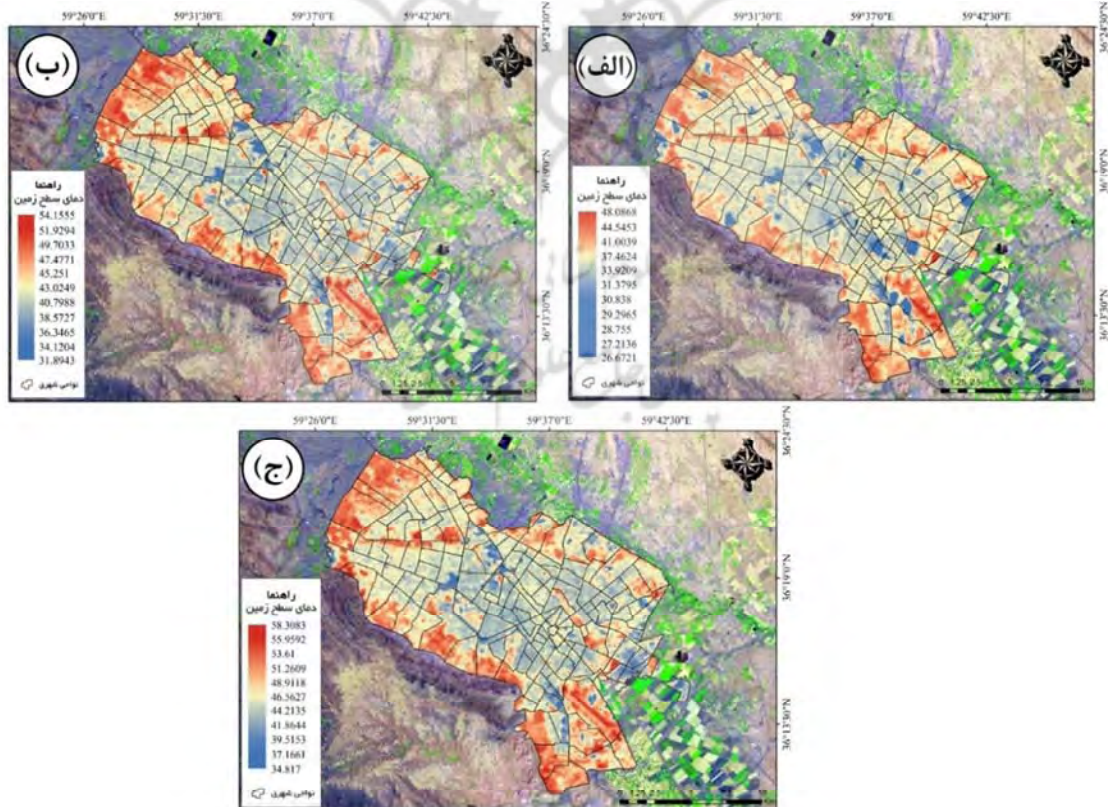


شکل ۴. رابطه میان NDVI و LST در سال ۲۰۱۵

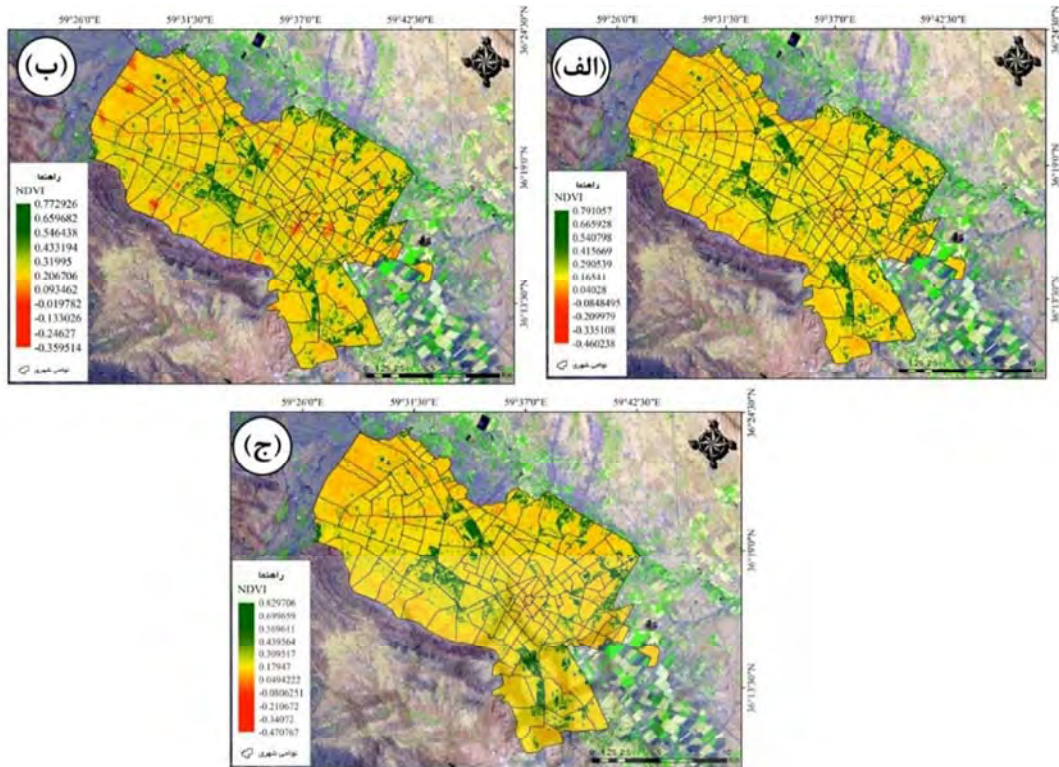
1. Yuan and Bauer

جنوب شهر، با بیشترین پوشش گیاهی، کمینه‌های دمایی مشهد را در هر سال مورد مطالعه با تغییرات چندی به خود اختصاص داده‌اند. از سوی دیگر، مناطق بایر (بدون پوشش گیاهی) معمولاً در اطراف شهر، محدوده فرودگاه (جنوب شرق شهر) و فضاهای باز پیرامونی شهر که همچون نواری سراسری شهر را دربر گرفته‌اند دامنه‌های دمایی گرم مشهد را تشکیل داده‌اند. بررسی‌ها نشان داده است که محله فرودگاه واقع در منطقه هفت شهری، کانون اصلی دمایی بیشینه مشهد در هر سه دوره مورد مطالعه محسوب می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵ نیز نشان داده شده است، مناطق قرمز محدوده‌های دمایی بسیار گرم مشهد را نشان می‌دهند. این مناطق اغلب کاربری غیرمسکونی دارند و همچنین در مناطق در شهری (مسکونی) منطبق بر بافت فرسوده و متراکم شهری جایگزین شده‌اند (شکل ۷).

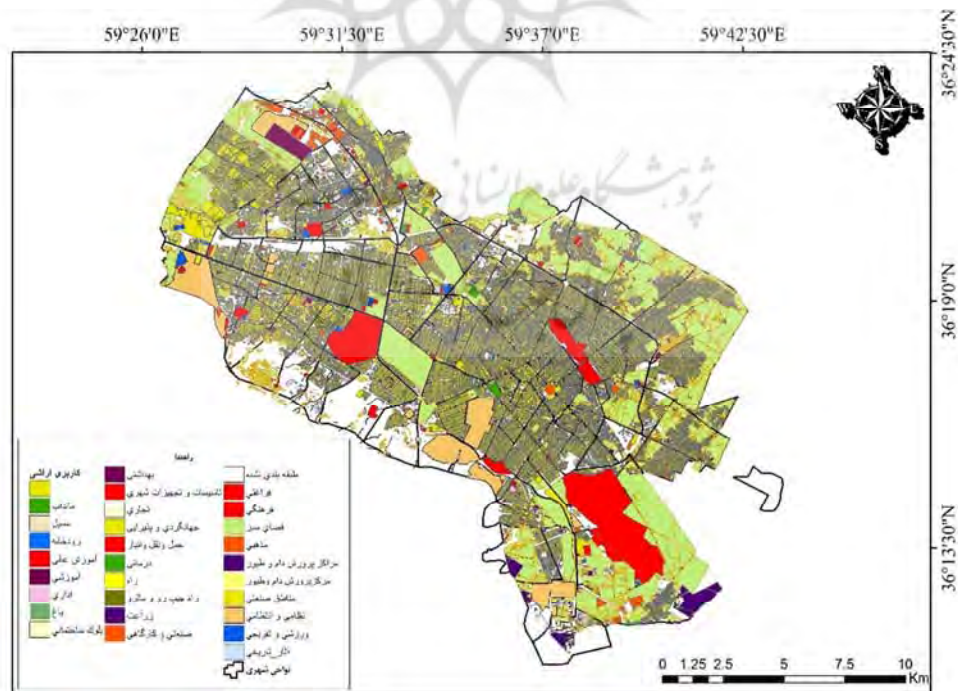
دامنه‌های دمایی برای ماه اوت سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ روی شکل ۵ نشان از تغییری بنیادین در دمای سطح زمین برای مقدار کمینه و بیشینه دارند؛ به طوری که کمینه دمایی برای سال آغازین و پایانی پژوهش حاضر تفاوتی ۸/۱۴ درجه سانتیگراد را نشان داده است. مقایسه حاضر برای دمای بیشینه نشان از تفاوتی آشکارتر دارد و اختلاف دمایی به دست آمده ۱۰/۲۲ درجه سلسیوس است. در هر سال مورد مطالعه، کمینه‌های دمایی که در شکل ۵ با رنگ آبی مشخص شده‌اند بیشتر در مناطق مرکزی مشهد متمرکز شده‌اند (مناطق ۱ تا ۵ و ۸). مقایسه دامنه‌های دمایی سرد (پایین و گرم (بالا) معمولاً بیشترین همپوشانی را با پوشش گیاهی دارند (شکل ۶). محله‌های نوفل لوشاتو، جانبازان، رضاشهر، آزادشهر در مرکز شهر؛ خواجه ربیع و سپس آباد در شرق؛ سیدی، انقلاب و عسکریه در



شکل ۵. دمای سطح زمین طبقه‌بندی شده مشهد از حسگر TIRS ماهواره لندست ۸: (الف) سال ۲۰۱۳؛ (ب) سال ۲۰۱۴؛ (ج) سال ۲۰۱۵



شکل ۶. شاخص تفاضل بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI) مشاهد از حسگر *OLI* ماهواره لندست ۸: (الف) سال ۲۰۱۳؛ (ب) سال ۲۰۱۴؛ (ج) سال ۲۰۱۵



شکل ۷. نقشه کاربری اراضی شهر مشهد

تشکیل می‌دهند؛ بزرگراه‌های قائم و میثاق به ترتیب در نوار شرقی و شمالی شهر که نقشی همانند بزرگراه‌های فکوری و کلانتری را در شرق مشهد برعهده دارند؛ ادامه بزرگراه کلانتری در جنوب مشهد و نیز جاده قدیم مشهد- قوچان، جاده‌های سنتو، کلات نادری، کارخانه سیمان، خین عرب و توس نیز با شدتی کمتر از بزرگراه‌های یاد شده نقش خطوط گرمایی مشهد را بازی می‌کنند. از سوی دیگر، وجود پارک‌ها و باغ‌ها و خانه‌های ویلایی که معمولاً پوشش گیاهی درختی و درختچه‌ای دارند باعث ایجاد جزایر حرارتی سرد در سطح شهر شده‌اند. این مناطق شرایط دوگانه‌ای (قرارگیری کنار جزایر حرارتی هم سرد و هم گرم) را در جای‌جای شهر مشهد پدید آورده‌اند. همچنین از دیگر عوامل بیوفیزیکی تأثیرگذار در جزایر حرارتی شهری می‌توان به شهرک‌های تازه‌ساخت اشاره کرد که تفاوت دمایی محسوسی با بافت متراکم درون‌شهری دارند. همچنین مجتمع‌های مسکونی، شهرک‌های صنعتی و جایگاه‌های سوخت نیز نقش بسزایی در لکه‌های گرمایی دارند که در شکل ۵ ارزیابی می‌شوند.

### ۳-۳- خودهمبستگی فضایی دمای سطح زمین

#### شهر مشهد (موران جهانی و گری سی)

برای ارزیابی مقادیر خودهمبستگی فضایی داده‌های دمای سطح زمین مشهد با مقیاس مکانی ۳۰ متر از روش‌های موران جهانی و گری سی استفاده شد. جدول ۴ مقادیر خودهمبستگی فضایی موران جهانی و گری سی را برای دمای سطح زمین این شهر نشان می‌دهد. مبتنی بر بروندادهای جدول حاضر، دمای سطح زمین مشهد در همه سال‌های مورد مطالعه دارای خودهمبستگی فضایی معنادار مثبت است. ارزیابی هم‌زمان مقادیر به‌دست‌آمده با آستانه معنادار نشان داد که تمامی مقادیر به‌دست‌آمده برای سال‌های مورد مطالعه در سطح  $\alpha = 0.01$  معنادارند. اکنون با مبنای قراردادن شالوده حاضر که از نتایج موران جهانی به‌دست آمده است، می‌توان فرضیه  $H_0$  مبنی بر

اصلی‌ترین جزایر حرارتی شهری مشهد در محلات زرکش، امیریه، الهیه، جاهدشهر و وکیل‌آباد در منطقه دوازده شهری، در محلات خاتم‌الانبیاء و زرکش در منطقه ده شهری، محلات بهارستان، ابوذر، رباط، ایوان، طرق عسکریه و فرودگاه در منطقه هفت شهری مشهد قرار گرفته‌اند. از دیگر حلقه‌های حرارتی بالا (جزایر حرارتی) که جزایر حرارتی پیرامونی را تشکیل می‌دهند محلات ایمان، کوهسنگی، بهارستان، نیروی هوایی و اقبال در نوار غربی و همچنین محلات سپاد، نوید و بهمن در نوار شرقی را می‌توان نام برد. جزایر حرارتی خرد که بیشتر در داخل شهر قرار دارند دو کانون عمده را به خود اختصاص داده‌اند: کانون اول درست در شرق حرم مطهر و در محلات راه‌آهن، ایثار، سجادیه و حسین‌آباد قرار گرفته است که قرارگرفتن عمده بافت‌های فرسوده شهر در این محلات از یکسو و حجم بالای ترافیک و آلودگی، به‌دلیل دسترسی به حرم مطهر رضوی، این دمای بالا را توجیه می‌کند. از سوی دیگر دومین کانون جزیره حرارتی درون‌شهری درست در مرز مناطق ده و یازده مشهد قرار گرفته که به‌شکل سراسری، از شرق به غرب کشیده شده است. با نزدیک‌شدن به شرق از شدت آن کاسته می‌شود و در دو سوی خود محلات رازی، زیباشهر، شهید رضوی، شاهد، دانشجو، فرهنگیان، تربیت، رسالت، شریف و فارغ‌التحصیلان را تحت تأثیر قرار داده است. دلیل عمده دمای بالای این منطقه تراکم بالای مناطق مسکونی عمدتاً با عمر زیاد، قرارگیری پایانه‌های مسافربری و مجموعه ورزشی و پارکینگ‌های آن (مجموعه ورزشی آستان) است. بازتاب سطوح روکش‌شده آسفالت و خطوط حمل‌ونقل شهری نیز از دیگر جزایر حرارتی شهری متفاوت است. این نوع از مناطق را می‌توانیم با عنوان خطوط گرمایی یاد کنیم. بر این اساس، خطوط گرمایی مشهد عبارت‌اند: از بزرگراه امام علی (ع) درست منطبق بر مرز مناطق ۱۰ و ۱۱؛ بزرگراه‌های فکوری و کلانتری در غرب مشهد که مرز پایانی جزایر حرارتی پیرامونی نوار غربی مشهد را

### ۳-۴- خوشه‌بندی جزایر حرارتی شهری (UHI)

سنجش مطالعات جزایر حرارتی شهری (UHI) پیشین که در طیف یک شهر انجام شده است به‌طور خاص با تمرکز بر خوشه‌بندی جزایر حرارتی، به آثار بیوفیزیکی شهر مرتبط بود (Buyantuyev & Wu, 2010; Cao and et al., 2010; Zhou and et al., 2011; Deng & Wu, 2013; Song & Wu, 2016). سنجش حاضر ما را بر آن داشت که ترکیبی از روش‌های یکپارچه و شاخص محلی همبستگی مکانی<sup>۱</sup> (LISA) را در افتراق جزایر حرارتی مشهد به کار ببندیم. بنابراین، مشکلی که در این بین وجود داشت پیچیدگی فضای شهری بود زیرا ساختار هر شهر ارتباط تنگاتنگی با محیط طبیعی خود دارد و از عوامل دور و نزدیک بسیاری تأثیر می‌پذیرد. برای برون‌رفت از این مشکل، با اعمال کاربست افزایش‌بندی چندحالتی<sup>۲</sup> با استفاده از تابع CHull، فضای مشهد را در کنترل در آورسیم و آن‌گاه خوشه‌بندی جزایر حرارتی اعمال شد. تدبیر حاضر ضمن عرضهٔ برازشی بهینه از مدل، پیچیدگی‌های نامتجانس محیط را نیز به کمترین میزان ممکن کاهش داد. شکل ۸ افزایش بندی چندحالتی و توزیع جهت‌دار اعمال شده بر مشهد را نشان می‌دهد. شکل‌شناسی توزیع جهت‌دار نشان می‌دهد که دمای سطح زمین مشهد جهت شمال‌غرب به جنوب‌شرق دارد (این نتیجه با اعمال تابع نامبرده بر

نداشتن ارتباط فضایی دمای سطح زمین مشهد را رد کرد. نتیجه می‌گیریم که داده‌های دمای سطح زمین این شهر ساختار فضایی دارند یا، به عبارتی، دمای سطح زمین مشهد الگوی ساخت‌یافته دارد و به شکل خوشه‌ای توزیع شده است؛ یعنی یاخته‌های دمایی بالا و پایین تمایل به متمرکز شدن یا خوشه‌ای شدن در فضا دارند. در شاخص موران، عبارت حاصل ضرب ضربدری بر انحراف از میانگین ارزش‌های همسایگی‌ها متکی است اما در ضریب گری، به جای مقایسهٔ ارزش‌های یاخته‌های همسایگی با میانگین، ارزش‌های دو همسایگی با یکدیگر به طور مستقیم مقایسه می‌شوند. مقادیر خودهمبستگی به دست‌آمدهٔ شاخص گری برای سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ نشان از روندی کاهشی در مقدار شاخص دارد به طوری که مقدار این شاخص در سال ۲۰۱۳ عدد ۰/۹۰۰، در ۲۰۱۴ عدد ۰/۸۵۲ و در ۲۰۱۵ عدد ۰/۸۵۱ را با  $P-Value$  ۰/۰۰۰۱ نشان داده است. این بدان مفهوم است که یاخته‌هایی که در همسایگی یکدیگر قرار گرفته‌اند در مقیاس مکانی مورد مطالعه (۳۰ متر) شباهت بسیار و تفاوت اندک دارند. این مقدار کاهشی از بین رفتن نظم فضایی دمای سطح زمین مشهد و یا به عبارتی، خوشه‌ای شدن بیشتر دما در این شهر را نشان می‌دهد.

جدول ۴. خروجی آماره‌های موران و گری برای دمای سطح زمین شهر مشهد

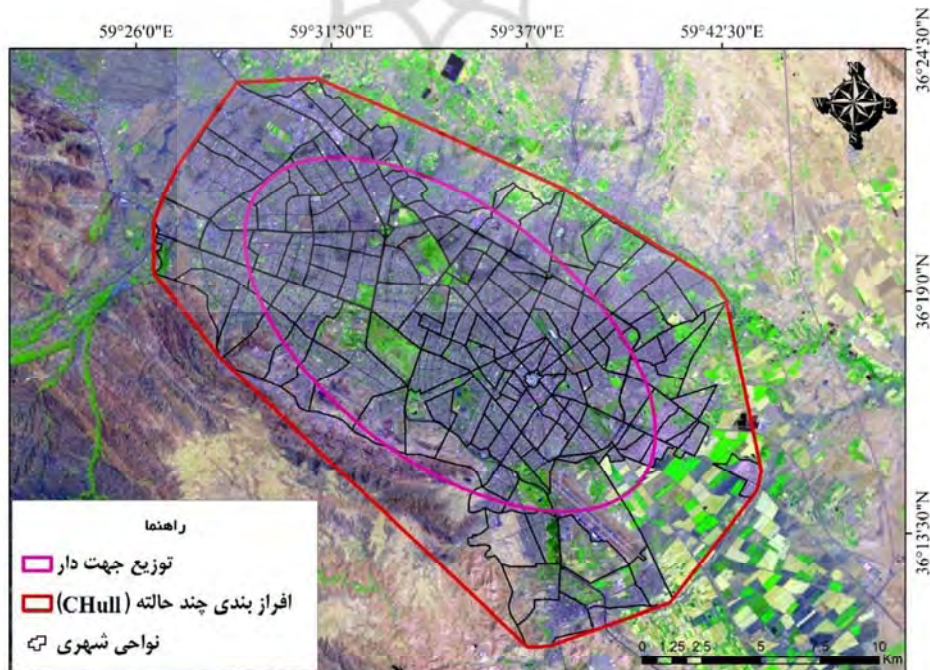
موران جهانی ("Moran's I")					
سال	شاخص موران	شاخص موران مورد انتظار	واریانس	z-score	p-value
۲۰۱۳	۰/۷۱۶۱۰۰	-۰/۰۰۰۲۱۶	۰/۰۰۰۱۱۱	۶۷/۹۶۵۵۲۱	.
۲۰۱۴	۰/۷۲۲۰۷۷۸	-۰/۰۰۰۲۱۶	۰/۰۰۰۱۱۱	۶۸/۳۷۳۹۶۲	.
۲۰۱۵	۰/۷۱۶۱۸۵	-۰/۰۰۰۲۱۶	۰/۰۰۰۱۱۱	۶۷/۹۳۷۹۰۹	.
گری ("Geary's C")					
سال	شاخص گری	شاخص گری مورد انتظار	خطای استاندارد شاخص C	p-value	
۲۰۱۳	۰/۹۰۰۰۸۳	۱	۰/۰۰۲۸۳۰	۰/۰۰۰۱	
۲۰۱۴	۰/۸۵۲۰۵۲	۱	۰/۰۰۲۸۳۰	۰/۰۰۰۱	
۲۰۱۵	۰/۸۵۱۳۳۲	۱	۰/۰۰۲۸۳۰	۰/۰۰۰۱	

1 Local Indicators of Spatial Autocorrelations (LISA)

2 multimode partitioning

$LL$  بیانگر خوشه‌های مقادیر دمای پایین سطح زمین (خودهمبستگی فضایی منفی در سطح اطمینان ۹۹٪) است. بر این اساس همان‌طور که در جدول ۵ و شکل‌های ۹ تا ۱۱ نیز آمده است، خوشه‌های جزایر حرارتی گرم ۱۵/۷۰٪ در سال ۲۰۱۳، ۱۸/۸۱٪ در سال ۲۰۱۴ و در نهایت ۱۹/۷۶٪ از کل فضای شهر مشهد را به خود اختصاص داده‌اند. جزایر حرارتی سرد نیز به ترتیب ۹/۱۱، ۱۳/۱۹ و ۱۲/۶۴٪ از فضای شهری مشهد را در سه سال مورد مطالعه تحت تأثیر قرار داده‌اند. مناطقی که فاقد الگوی خودهمبستگی فضایی معنادار بوده‌اند نیز در جدول ۵ ارائه شده‌اند. این مناطق پیش از آنکه دلیل آماری داشته باشند، عوامل بیوفیزیکی شهری را در شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری تبیین می‌کنند زیرا تغییرات بالای دمای سطح زمین در یاخته‌ها و تباین بالای آن در سطح شهر مشهد را نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، تابع حاضر فقط آن دسته از جزایر حرارتی شهری را آشکار کرده است که بیشترین تمایل به متمرکز شدن و خوشه‌شدن در فضا را دارند.

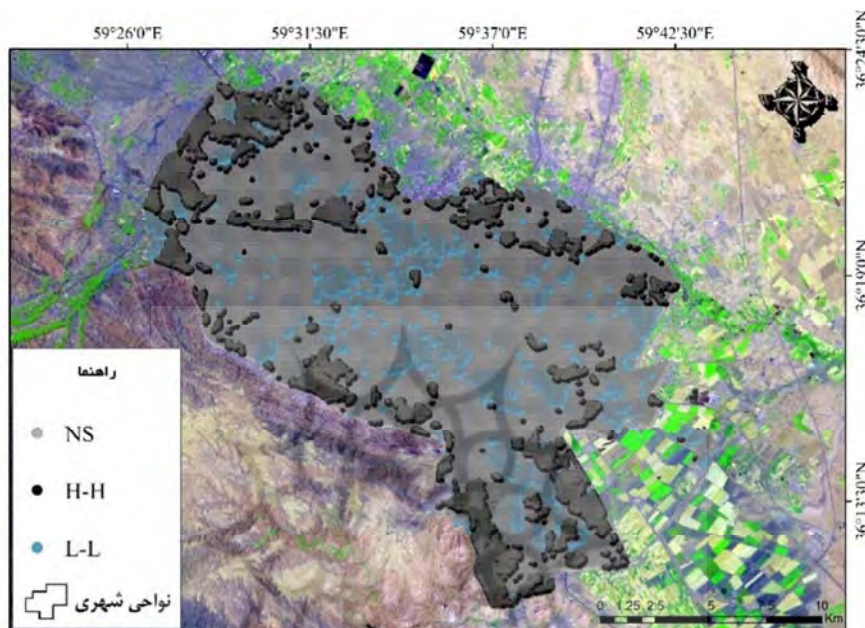
۳۰×۳۰ متری یاخته شهر مشهد با تفکیک مکانی ۳۰×۳۰ متر مربع به دست آمده است. این نوع از شکل‌شناسی تابع حاضر نشان از ارتباط تگاتنگ دمای سطح زمین مشهد با عوامل بیوفیزیکی شهری دارد. از مهم‌ترین این عوامل می‌توان به شاخص پوشش گیاهی، شاخص برهنگی زمین، شاخص مناطق ساخته‌شده شهری و ارتفاعات اشاره کرد که شرح هر یک پیش‌تر آمده است. از سوی دیگر، شکل‌شناسی دشت مشهد و حالت دالانی آن نیز چه بسا یکی از عوامل مهم چنین شکل‌گیری از تابع توزیع جهت‌دار برای دمای سطح زمین آن شهر باشد. همان‌طور که پیش‌تر بحث شد، تابع‌های خودهمبستگی فضایی موران جهانی و گری سی فقط نوع الگوی دمای سطح زمین را مشخص می‌کردند. به همین دلیل، برای نشان دادن توزیع فضایی الگوی حاکم بر جزایر حرارتی مشهد و خوشه‌بندی آن طی دوره‌های مورد مطالعه، از شاخص محلی همبستگی مکانی استفاده شده است. در این آماره،  $HH$  بیانگر خوشه‌های مقادیر دمای زیاد سطح زمین (خودهمبستگی فضایی مثبت در سطح اطمینان ۹۹٪)،



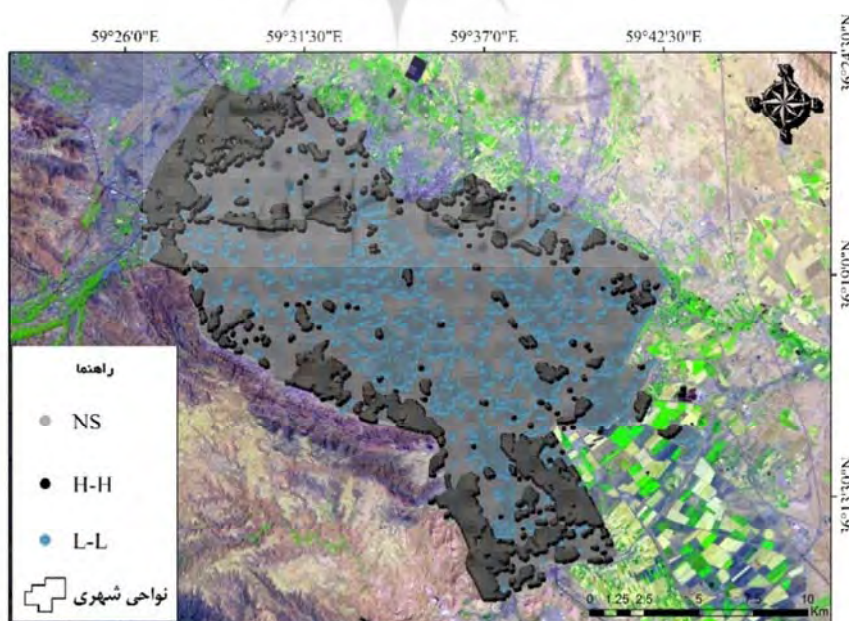
شکل ۸. افراز‌بندی چندحالتی و توزیع جهت‌دار شهر مشهد

جدول ۵. درصد مساحت زیر پوشش خوشه‌بندی جزایر حرارتی مشهد با تابع (LISA)

نوع الگو	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۵
جزایر حرارتی گرم (HH)	۱۵/۷۰	۱۸/۸۱	۱۹/۷۶
جزایر حرارتی سرد (LL)	۹/۱۱	۱۳/۱۹	۱۲/۶۴
بدون الگوی معنادار (NS)	۷۵/۱۹	۶۸	۶۷/۶۰

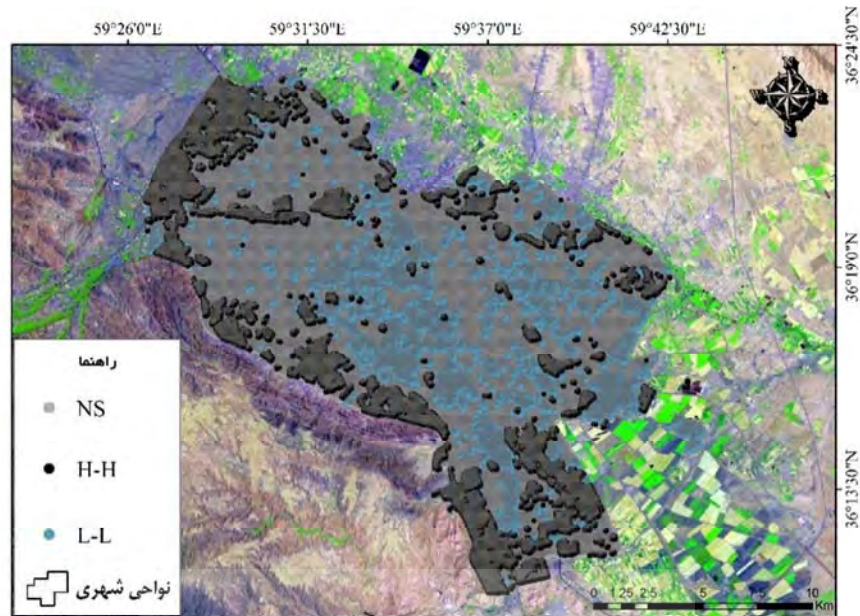


شکل ۹. خوشه‌بندی جزایر حرارتی مشهد با تابع (LISA)، سال ۲۰۱۳



شکل ۱۰. خوشه‌بندی جزایر حرارتی مشهد با تابع (LISA)، سال ۲۰۱۴

آثار ترکیبات بیوفیزیکی در شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری (مطالعه موردی شهر مشهد)



شکل ۱۱. خوشه‌بندی جزایر حرارتی مشهد با تابع (LISA)، سال ۲۰۱۵

به طوری که شاخص NDVI اثر منفی در LST دارد و برعکس، شاخص NDBI دارای اثر مثبت در LST است. در نتیجه، مشخص شد که هر دو شاخص NDVI و NDBI شاخص‌های خوبی برای مطالعه جزایر حرارتی شهری‌اند. همچنین در ادامه، ارزیابی دوبه‌دو شاخص‌های ماهواره‌ای سبب آشکار شدن پیچیدگی منظر شهری مشهد با رابطه منفی نامنتظره بین LST و NDBal شد. در این مطالعه مشخص شد که پراکنش LST و NDVI به وضوح هر دو لبه گرم و لبه سرد را در شهر مشهد آشکار کرده است؛ به گونه‌ای که روابط این دو پارامتر در سطح شهر پراکندگی یکنواختی ندارد. رابطه قوی منفی بین این دو پارامتر زمانی پدید می‌آید که شهر و یا سطحی از آن که مورد مطالعه است دارای پوشش یکدست باشد و یا کاهش تدریجی داشته باشد که این خود مدعای دیگر برای برهمکنش ساختاری جزایر حرارتی شهری مشهد به‌شمار می‌رود.

آنچه بیش از پیش در مورد جزایر حرارتی شهری مشهد خودنمایی کرده انواع جزایر حرارتی آن بوده است و نتایج ارزیابی تفصیلی پژوهش حاضر منجر به شناسایی سه نوع جزیره حرارتی شهری شد: ۱. جزیره

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

دمای سطح زمین (LST) نقش اساسی در تبادل و تعامل شار انرژی بین سطح زمین و هوا سپهر ایفا می‌کند؛ بنابراین، درک ارتباط بین LST و ویژگی‌های سطوح شهری برای طراحی اقدامات مؤثر به منظور کاهش دامنه جزایر حرارتی شهری (UHI) حیاتی است. این مطالعه با رویکردی نوآورانه و شیء‌گرا، با استفاده از شاخص همبستگی مکانی (LISA) و با هدف مطالعه آثار پارامترهای بیوفیزیکی شهری در شکل‌گیری و خوشه‌ای شدن جزایر حرارتی شهری مشهد انجام شده است. بدین منظور تصاویر حسگرهای *OLI* و *TIRS* ماهواره لندست ۸ در ماه اوت سه سال ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ از پایگاه علوم زمین آمریکا (USGS) دریافت شد و دمای سطح زمین هر یک از این تصاویر برای محدوده شهر مشهد محاسبه شد. در گام بعدی، برای ارزیابی ترکیبات بیوفیزیکی مشهد، سه شاخص NDVI و NDBI و NDBal محاسبه و نتایج آنها بررسی شد.

نتایج حاکی از آن بود که هر دو شاخص NDVI و NDBal همبستگی چشمگیری با LST دارند؛



- حرارتی پیرامونی؛ ۲. جزیره حرارتی کانونی؛ ۳. جزیره حرارتی خطی.
- نتایج خودهمبستگی فضایی موران جهانی به دست آمده تأییدی آشکار بر رد فرضیه نداشتن ارتباط فضایی دمای سطح زمین مشهود بوده که نشان داده است داده‌های دمای سطح زمین مشهود ساختار فضایی دارند یا به عبارتی، دمای سطح زمین مشهود دارای الگوی ساخت یافته است و به شکل خوشه‌ای توزیع شده است؛ یعنی یاخته‌های دمایی بالا و پایین تمایل به متمرکز شدن یا خوشه‌ای شدن در فضا دارند. همچنین مقدار کاهشی تابع خودهمبستگی فضایی گری سی نشان داده است نظم فضایی دمای سطح زمین مشهود در طول زمان از بین رفته و تمایل جزایر حرارتی شهری برای خوشه‌ای شدن افزایش یافته است.
- نتایج خوشه‌بندی جزایر حرارتی شهری با تابع موران محلی نشان داد: ۱. در طول زمان، بر وسعت جزایر حرارتی گرم افزوده شده و به تبع آن، از وسعت جزایر حرارتی سرد کاسته شده است. ۲. تغییرات بالای دمای سطح زمین در یاخته‌ها و تباین بالای آن در سطح شهر مشهود باعث برهم خوردن نظم خوشه‌بندی فضایی جزایر حرارتی شده ولی از وسعت مناطقی با چنین ویژگی آماری (فاقد معناداری آماری)، به دلیل افزایش جزایر حرارتی گرم در طول دوره مورد مطالعه کاسته شده است؛ و ۳. تمایل به متمرکز شدن و خوشه‌ای شدن جزایر حرارتی شهری در فضای شهری مشهود در حال افزایش است. همان‌طور که اشاره شد، براساس نوع ویژگی‌های مدیریت مناطق شهری، نتایج این پژوهش در زمینه کمک به برنامه‌ریزان شهری برای کاهش آثار جزایر حرارتی شهری مشهود آینده‌ای روشن دارد. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مطالعات احمدی و همکاران (۱۳۹۱ و ۱۳۹۴) و گائو و همکاران (۲۰۱۵) نشان داده است به دلیل اعمال هم‌زمان روش‌های آفرزبندی چندحالتی به منظور کاهش پیچیدگی‌های فضای شهری و تابع محلی همبستگی مکانی (LISA)، این تحقیق بهتر توانست خوشه‌های جزایر حرارتی شهری را تبیین کند.
- منابع**
- احمدی، م.، عاشورلو، د.، نارنگی‌فرد، م.، ۱۳۹۱، تغییرات زمانی - مکانی الگوهای حرارتی و کاربری شهر شیراز با استفاده از داده‌های سنجنده TM&ETM<sup>+</sup>، سنجش از دور و GIS ایران، سال ۴، شماره ۴، صص. ۶۸-۵۵.
- احمدی، م.، عاشورلو، د.، نارنگی‌فرد، م.، ۱۳۹۴، تحلیل دمای شهر شیراز در فصول گرم و سرد با به کارگیری تحلیل‌های آماری و تصاویر ماهواره‌ای، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال ۳۰، شماره ۲، صص. ۱۶۰-۱۴۷.
- شکیبا، ع.، ضیائی‌ان فیروزآبادی، پ.، عاشورلو، د.، نامداری، س.، ۱۳۸۸، تحلیل رابطه کاربری و پوشش اراضی جزایر حرارتی شهر تهران، با استفاده از داده‌های ETM<sup>+</sup>، سنجش از دور و GIS ایران، سال اول، شماره اول، صص. ۵۶-۳۹.
- صادقی‌نیا، ع.، علیجانی، ب.، ضیائی‌ان فیروزآبادی، پ.، ۱۳۹۱، تحلیل فضایی - زمانی جزیره حرارتی کلان‌شهر تهران با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال ۱، شماره ۴، صص. ۱۷-۱.
- صادقی‌نیا، ع.، علیجانی، ب.، ضیائی‌ان فیروزآبادی، پ.، ۱۳۹۲، کاربرد تکنیک خودهمبستگی فضایی در تحلیل جزیره حرارتی شهر تهران، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال ۱۳، شماره ۳۰، صص. ۹۰-۶۷.
- موسوی بایگی، م.، اشرف، ب.، فرید حسینی، ف.، میان‌آبادی، آ.، ۱۳۹۱، بررسی جزیره حرارتی شهر مشهد با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و نظریه فرکتال، مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره اول، صص. ۴۹-۳۵.

- Anselin, L., 1995, **Local Indicators of Spatial Association—LISA**, Geographical Analysis, 27(2), PP. 93–115.
- Anselin, L., Syabri, I. & Kho, Y., 2006, **GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis**, Geographical Analysis, 38(1), PP. 5–22.
- Artis, D.A. & Carnahan, W.H., 1982, **Survey of Emissivity Variability in Thermography of Urban Areas**, Remote Sensing of Environment, 12(4), PP. 313–329.
- Asgarian, A., Amiri, B.J. & Sakieh, Y., 2015, **Assessing the Effect of Green Cover Spatial Patterns on Urban Land Surface Temperature Using Landscape Metrics Approach**, Urban Ecosystems, 18(1), PP. 209–222.
- Atzberger, C., 2013, **Advances in Remote Sensing of Agriculture: Context Description, Existing Operational Monitoring Systems and Major Information Needs**, Remote Sensing, 5(2), PP. 949–981.
- Barsi, J.A., Schott, J.R., Palluconi, F.D., Helder, D.L., Hook, S.J., Markham, B.L. et al., 2003, **Landsat TM and ETM+ Thermal Band Calibration**, Canadian Journal of Remote Sensing, 29(2), PP. 141–153.
- Buyantuyev, A. & Wu, J., 2010, **Urban Heat Islands and Landscape Heterogeneity: Linking Spatiotemporal Variations in Surface Temperatures to Land-cover and Socioeconomic Patterns**, Landscape Ecology, 25(1), PP. 17–33.
- Cao, X., Onishi, A., Chen, J. & Imura, H., 2010, **Quantifying the Cool Island Intensity of Urban Parks Using ASTER and IKONOS Data**, Landscape and Urban Planning, 96(4), PP. 224–231.
- Carlson, T.N. & Arthur, S.T., 2000, **The Impact of Land Use—Land Cover Changes Due to Urbanization on Surface Microclimate and Hydrology: A Satellite Perspective**, Global and Planetary Change, 25(1), 49–65.
- Chander, G. & Groeneveld, D.P., 2009, **Intra-annual NDVI Validation of the Landsat 5 TM Radiometric Calibration**, International Journal of Remote Sensing, 30(6), PP. 1621–1628.
- Chander, G. & Markham, B., 2003, **Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(11), PP. 2674–2677.
- Chen, X.L., Zhao, H.M., Li, P.X. & Yin, Z.Y., 2006, **Remote Sensing Image-based Analysis of the Relationship between Urban Heat Island and Land Use/Cover Changes**, Remote Sensing of Environment, 104(2), PP. 133–146.
- Connors, J.P., Galletti, C.S. & Chow, W.T., 2013, **Landscape Configuration and Urban Heat Island Effects: Assessing the Relationship between Landscape Characteristics and Land Surface Temperature in Phoenix, Arizona**, Landscape Ecology, 28(2), PP. 271–283.
- Deng, C. & Wu, C., 2012, **BCI: A Biophysical Composition Index for Remote Sensing of Urban Environments**, Remote Sensing of Environment, 127, PP. 247–259.
- Deng, C. & Wu, C., 2013, **Examining the Impacts of Urban Biophysical Compositions on Surface Urban Heat Island: A Spectral Unmixing and Thermal Mixing Approach**, Remote Sensing of Environment, 131, PP. 262–274.
- Fallah Ghalhari, G., Dadashi Roudbari, A. & Asadi, M., 2016, **Identifying the Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Precipitation in Iran**, Arabian Journal of Geosciences, 9(12), PP. 1–12, Doi: 10.1007/s12517-016-2606-4.
- Feyisa, G.L., Dons, K. & Meilby, H., 2014, **Efficiency of Parks in Mitigating Urban Heat Island Effect: An Example from Addis Ababa**, Landscape and Urban Planning, 123, PP. 87–95.
- Fischer, M.M. & Getis, A. (Eds.), 2009, **Handbook of Applied Spatial Analysis: Software Tools, Methods and Applications**, Springer Science & Business Media.

- Gillies, R.R., Kustas, W.P. & Humes, K.S., 1997, **A Verification of The 'Triangle' Method for Obtaining Surface Soil Water Content and Energy Fluxes from Remote Measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Surface e**, International Journal of Remote Sensing, 18(15), PP. 3145–3166.
- Griffith, D., 1987, **Spatial Autocorrelation: A Primer**, Resource Publication in Geography, Association of American Geographers.
- Guo, G., Wu, Z., Xiao, R., Chen, Y., Liu, X. & Zhang, X., 2015, **Impacts of Urban Biophysical Composition on Land Surface Temperature in Urban Heat Island Clusters**, Landscape and Urban Planning, 135, PP. 1–10.
- Li, J., Song, C., Cao, L., Zhu, F., Meng, X. & Wu, J., 2011, **Impacts of Landscape Structure on Surface Urban Heat Islands: A Case Study of Shanghai, China**, Remote Sensing of Environment, 115(12), PP. 3249–3263.
- Lu, D. & Weng, Q., 2009, **Extraction of Urban Impervious Surfaces from an IKONOS Image**, International Journal of Remote Sensing, 30(5), PP. 1297–1311.
- Mohapatra, R.P. & Wu, C., 2008, **Subpixel Imperviousness Estimation with IKONOS Imagery: An Artificial Neural Network Approach** (PP. 21–37), Taylor & Francis Group: London, UK.
- Mohapatra, R.P. & Wu, C., 2010, **High Resolution Impervious Surface Estimation**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 76(12), PP. 1329–1341.
- Powell, S.L., Cohen, W.B., Yang, Z., Pierce, J.D. & Alberti, M., 2008, **Quantification of Impervious Surface in the Snohomish Water Resources Inventory Area of Western Washington from 1972–2006**, Remote Sensing of Environment, 112(4), PP. 1895–1908.
- Pu, R., Gong, P., Michishita, R. & Sasagawa, T., 2008, **Spectral Mixture Analysis for Mapping Abundance of Urban Surface Components from the Terra/ASTER Data**, Remote Sensing of Environment, 112(3), PP. 939–954.
- Scott, L.M. & Janikas, M.V., 2010, **Spatial Statistics in ArcGIS**, In Handbook of Applied Spatial Analysis (PP. 27–41), Springer Berlin Heidelberg.
- Small, C., 2005, **A Global Analysis of Urban Reflectance**, International Journal of Remote Sensing, 26(4), PP. 661–681.
- Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C. & Paolini, L., 2004, **Land Surface Temperature Retrieval from LANDSAT TM 5**, Remote Sensing of Environment, 90(4), PP. 434–440.
- Song, Y. & Wu, C., 2016, **Examining the Impact of Urban Biophysical Composition and Neighboring Environment on Surface Urban Heat Island Effect**, Advances in Space Research, 57(1), PP. 96–109.
- Voogt, J.A. & Oke, T.R., 2003, **Thermal Remote Sensing of Urban Climates**, Remote Sensing of Environment, 86(3), PP. 370–384.
- Weng, Q., 2012, **Remote Sensing of Impervious Surfaces in the Urban Areas: Requirements, Methods, and Trends**, Remote Sensing of Environment, 117, PP. 34–49.
- Weng, Q., Lu, D. & Schubring, J., 2004, **Estimation of Land Surface Temperature–Vegetation Abundance Relationship for Urban Heat Island Studies**, Remote Sensing of Environment, 89(4), PP. 467–483.
- Wilderjans, T.F., Ceulemans, E. & Meers, K., 2013, **CHull: A Generic Convex-hull-based Model Selection Method**, Behavior Research Methods, 45(1), PP. 1–15.
- Yang, X., 2006, **Estimating Landscape Imperviousness Index from Satellite Imagery**, Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 3(1), PP. 6–9.
- Yang, X. & Liu, Z., 2005, **Use of Satellite-derived Landscape Imperviousness Index to Characterize Urban Spatial Growth**, Computers, Environment and Urban Systems, 29(5), PP. 524–540.

Yuan, F. & Bauer, M.E., 2007, **Comparison of Impervious Surface Area and Normalized Difference Vegetation Index as Indicators of Surface Urban Heat Island Effects in Landsat Imagery**, Remote Sensing of Environment, 106(3), PP. 375–386.

Yue, W., Xu, J., Tan, W. & Xu, L., 2007, **The Relationship between Land Surface Temperature and NDVI with Remote Sensing: Application to Shanghai Landsat 7 ETM+ Data**, International Journal of Remote Sensing, 28(15), PP. 3205–3226.

Zha, Y., Gao, J. & Ni, S., 2003, **Use of Normalized Difference Built-up Index in Automatically Mapping Urban Areas from TM Imagery**, International Journal of Remote Sensing, 24(3), PP. 583–594.

Zhao, H. & Chen, X., 2005, **Use of Normalized Difference Bareness Index in Quickly Mapping Bare Areas from TM/ETM+**, in Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'05. Proceedings. 2005 IEEE International (Vol. 3, PP. 1666–1668), IEEE.

Zhou, W., Huang, G. & Cadenasso, M.L., 2011, **Does Spatial Configuration Matter? Understanding the Effects of Land Cover Pattern on Land Surface Temperature in Urban Landscapes**, Landscape and Urban Planning, 102(1), PP. 54–63.

