

The Identification of Urban Thermal Islands based on an Environmental Approach, Case Study: Isfahan Province

Mahmoud Ahmadi ^{1*}, AbbasAli Dadashi Roudbari ²

¹ Assistant Professor, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

² PH.D Student Urban Climatology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

Today, urbanization and environmental impacts have been revealed to everyone. Among the harmful effects of urbanization, thermal islands have been considered by politicians and researchers in the field of environmental science more than any other factor. The aim of this research is to identify the critical environmental zones of Isfahan urban thermal islands. In order to achieve this goal, the first 9 images were downloaded from Landsat 8 satellite for the warm period of the year 2013 through 2015. Then, the required pre-processing schemes, land surface temperature (LST) and normalized difference vegetation index (NDVI) were calculated. Then, the Environmental Criticality Index (ECI) was used to identify sensitive areas. The results showed that there is a sharp thermal slope between the city center and the suburbs due to the existence of a cool thermal island in the city center. The largest urban thermal islands were identified in the 6th district. Focal thermal islands and urban thermal islands strip are two types of thermal islands after the peripheries accounted for most regions in this study. The highest environmental sensitivity was in the southern part of the city (6th district of the city) and the lowest environmental sensitivity was in the center of the city (urban areas 1 to 3) were identified. In order to solve this crisis, the upcoming proposal to develop green roof vegetation organized and tailored to the indigenous climate can be considered as the best practice for thermal island mitigation.

Key words: Urban Thermal Islands, Land Surface Temperature (LST), Environmental Criticality Index (ECI), Isfahan.

* ma_ahmadi@sbu.ac.ir

شناسایی جزایر حرارتی شهری مبتنی بر رویکرد زیست‌محیطی (مطالعه موردی: کلان‌شهر اصفهان)

محمود احمدی*، استادیار آب و هواشناسی دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران
عباسعلی داداشی رودباری، دانشجوی دکتری آب و هواشناسی شهری دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

وصول: ۱۳۹۵/۰۶/۱۴ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱/۲۵، صص ۲۰-۱

چکیده

امروزه شهرنشینی و پیامدهای زیست‌محیطی آن بر همگان آشکار شده است. از میان عوامل ویرانگر شهری، سیاستمداران و پژوهشگران حوزه علوم محیطی، بیش از هر عامل دیگری به جزایر حرارتی توجه داشته‌اند. هدف از این پژوهش، شناسایی مناطق بحرانی زیست‌محیطی جزایر حرارتی شهری اصفهان است. برای دستیابی به این هدف، ابتدا ۹ تصویر مربوط به دوره گرم سال، طی دوره آماری ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ از ماهواره لندست ۸ بارگیری و سپس پیش‌پردازش‌های لازم، دمای سطح زمین (LST) و شاخص تفاضل بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI) محاسبه شد. در ادامه از شاخص قیاسی وضع بحرانی زیست‌محیطی (ECI) برای شناسایی مناطق حساس استفاده شد. نتایج نشان داد به دلیل وجود جزایر حرارتی سرد (UCI^۱) بین مرکز شهر و حومه، شیب حرارتی تندی وجود دارد و بزرگ‌ترین جزیره حرارتی شهری در منطقه ۶ شناسایی شد. جزایر حرارتی کانونی و جزایر حرارتی نواری، دو گونه دیگر از جزایر حرارتی شهری هستند که پس از مناطق پیرامونی، در بیشترین مناطق این شهر دیده شد. بیشترین حساسیت زیست‌محیطی در مناطق جنوبی شهر (منطقه ۶ شهری) و کمترین حساسیت زیست‌محیطی نیز در مرکز شهر (مناطق ۱ تا ۳ شهری) بود. بر این اساس، توسعه بام سبز و پوشش گیاهی سازمان‌یافته و متناسب با آب و هوای بومی، بهترین راهکار برای تعدیل جزیره حرارتی و برون‌رفت از بحران پیش‌روست. **واژه‌های کلیدی:** جزایر حرارتی شهری، دمای سطح زمین (LST)، شاخص وضع بحرانی زیست‌محیطی (ECI)، اصفهان.

مقدمه

رشد خود را ادامه می‌دهند؛ این توسعه ویرانگر زیست‌محیطی، تغییرات سریعی را در الگوی بهره‌گیری از زمین به همراه خواهد داشت.

شهرنشینی گسترده، پیامدهای مطلوب و نامطلوب بسیاری را به همراه دارد؛ تأمین زنجیره‌وار امکانات اولیه زندگی، دسترسی آسان به آموزش باکیفیت، خدمات پزشکی و اجتماعی، فعالیت‌های اوقات فراغت، تمرکز منابع، فرصت‌های مقرون به صرفه شغلی و صدها امکان دیگر در شهر وجود دارد. گذشته از این مزایای جالب توجه، شهرنشینی مدرن پیامدهای نامطلوبی دارد که اگر بیش از پیامدهای مطلوب نباشد، کمتر از آن نیست. پیامدهای نامطلوب شهرنشینی به دو دسته کلی زیست‌محیطی و اجتماعی طبقه‌بندی می‌شود؛ پژوهش پیش رو به نقش پیامد اول پرداخته است.

یکی از عمده‌ترین دلایل آثار نامطلوب زیست‌محیطی، حذف و جایگزینی پوشش گیاهی با ساختمان‌هاست که این امر به فروپاشی چرخه زیست‌محیطی منجر می‌شود و همچنین نقش عمده‌ای در شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری خواهد داشت (ونگ^۷، ۲۰۰۱: ۲۰۰۰). بسیاری از این آثار نامطلوب زیست‌محیطی امکان شناسایی دارد و با پیاده‌سازی سامانه‌های به‌روز برنامه‌ریزی شهری پایدار به کمترین حد ممکن می‌رسد.

جزایر حرارتی شهری تأثیر منفی بر کیفیت هوای منطقه شهری خواهند داشت؛ زیرا با توجه به تولید گازهای آلاینده همچون ازن، واکنش شیمیایی بین ترکیبات عالی آمیزه و اکسیدهای مختلف نیتروژن

اختلاف بین پوشش سطوح در مناطق شهری و غیرشهری از لحاظ ساختار سه‌بعدی مناطق ساخته‌شده از یک‌سو و جذب حرارت مصالح ساختمانی به کار برده شده، بازتاب سطح و مقدار پوشش گیاهی از سوی دیگر، تغییرات بنیادینی را در ماهیت منطقه ساخته‌شده شهری به وجود می‌آورد (کامارزامی و همکاران^۱، ۲۰۱۰: ۲). این افزایش دما در مناطق شهری و تغییر خرد آب و هواشناسی آن به منزله جزیره حرارتی شهری (UHI^۲) شناخته می‌شود (فارینا^۳، ۲۰۱۲: ۴۲). در مقابل، مناطق ساخته‌شده شهری که در آب و هوای خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته‌اند، دمای سطحی کمتری را نسبت به محیط اطراف خشک غیرشهری خود دارند (فری و همکاران^۴، ۲۰۰۹: ۳؛ شیتا و همکاران^۵، ۲۰۰۹: ۴۸)؛ این پدیده با عنوان «جزایر حرارتی سرد (UCI^۶)» شناخته می‌شود.

صنعتی‌شدن و مهاجرت گسترده روستایی به مناطق شهری به رشد جمعیت شهری و گسترش بناهای شهری منجر شد. در سال ۲۰۱۰ میلادی، ۵۰/۵ درصد از جمعیت جهان را ساکنان مناطق شهری تشکیل می‌دادند. با روند فعلی رشد جمعیت و شهرنشینی پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ میلادی این جمعیت دو برابر شود (سازمان ملل متحد، ۲۰۱۱). همراه با رشد جمعیت شهری پیرو آن زیرساخت‌های شهری، همانند جاده‌ها، پل‌ها و ساختمان‌های مسکونی نیز،

¹ Comarazamy et al.

² Urban Heat Island (UHI)

³ Farina

⁴ Frey et al.

⁵ Shigeta et al.

⁶ Urban Cool Island (UCI)

⁷ Weng

رسیدند که مناطق ساحلی و بندر کلمبو، حساس‌ترین مناطق زیست‌محیطی جزایر حرارتی شهری هستند.

«تجزیه و تحلیل فضای سبز شهری برای برنامه‌ریزی توسعه در کلمبو» و «بررسی فضای سبز مورد نیاز برای تجزیه و تحلیل سایت شهری کلمبو»، عناوین پژوهش‌های دیگری است که همین نویسندگان (۲۰۱۳a و ۲۰۱۳b) انجام داده‌اند. این پژوهشگران به این نتیجه دست یافتند که بندر کلمبو، کمترین پوشش گیاهی و بیشترین مراقبت را داراست.

«تغییرات زمانی - مکانی جزایر حرارتی شهری کلان‌شهر کانو^۵ در نیجریه»، عنوان پژوهشی است که اومار و کومار^۶ (۲۰۱۴) انجام دادند. آنها با استفاده از شاخص قیاسی وضع بحرانی زیست‌محیطی^۷، دریافتند دریافتند شدت جزایر حرارتی شهری با پوشش گیاهی رابطه منفی دارد و فرودگاه بین‌المللی شهر کانو، بزرگ‌ترین جزایر حرارتی شهری را به خود اختصاص داده که در دوره گرم سال، طاقت‌فرساست.

بررسی گائو و همکاران^۸ (۲۰۱۵) در گوانگژو^۹، مرکز استان گوانگدونگ^{۱۰} چین نشان داد فقر پوشش گیاهی و تمرکز مناطق ساخته شهری، مهم‌ترین عوامل بیوفیزیکی شهری هستند که بیشترین تأثیر را بر خوشه‌ای شدن جزایر حرارتی شهری داشته و مناطق غربی، بیشترین ویرانی زیست‌محیطی را دارند؛ در این راستا همچین یانگ و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۵)، اسکله‌ورن و همکاران^{۱۲} (۲۰۱۶)، مورابیتو و همکاران^{۱۳} (۲۰۱۶)

(همچون NO₂ و NO) در آب و هوای گرم به تولید گازهای سمی منجر می‌شود (آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا^۱، ۲۰۱۲)؛ علاوه بر این، تأثیر بر کیفیت آب شهری، ناهنجاری‌های دمایی، امواج گرمای تولیدشده، الگوهای آب و هوایی مانند ویژگی‌های بارش باران و باد، سایر آثار سوء جزایر حرارتی شهری هستند (تن و همکاران، ۲۰۱۰: ۷۶)؛ تمامی این آثار، تولید گازهای آلاینده، فشارهای روانی بر شهروندان و فرآیند افزایش هزینه تولید انرژی را در سطح شهر به همراه خواهد داشت (دوانتان و دوانتان^۲، ۲۰۱۱: ۱۷۷).

گذشته از تمامی پیامدهای سوء جزایر حرارتی شهری که پژوهشگران داخلی و خارجی تا به امروز بررسی کرده‌اند، این پدیده، آثار ویرانگر زیست‌محیطی دیگری را نیز به همراه دارد که در پژوهش‌های داخلی کمتر به آنها توجه شده و صرفاً خود جزایر حرارتی شهری را به شکل سنتی تحلیل کرده‌اند. مرور منابع پژوهش‌های جدید جزایر حرارتی شهری، مؤید این امر بوده است که این پدیده به منزله پدیده‌ای پیچیده، به نقش‌آفرینی ویرانگر خود در سطح شهر ادامه می‌دهد و انسان شهرنشین بدون توجه به آنچه خود پدیدآور و تشدیدکننده آن بوده است، به سوی فروپاشی محیط زیست خود گام برمی‌دارد.

سینانیک و همکاران^۳ (۲۰۱۳) در ارزیابی جزایر حرارتی شهری با بهره‌گیری از پوشش گیاهی در شهر کلمبو^۴ سریلانکا براساس سنجش دمای سطح زمین و شاخص قیاسی بین LST و NDVI، به این نتیجه

⁵ Kano

⁶ Umar & Kumar

⁷ Environmental Criticality Index

⁸ Guo and et al.

⁹ Guangzhou

¹⁰ Guangdong

¹¹ Yang and et al.

¹² Skelhorn and et al.

¹³ Morabito and et al.

¹ US Environmental Protection Agency

² Devanathan and Devanathan

³ Senanayake and et al.

⁴ Colombo

نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، نقشی مؤثر در پروژه‌های برنامه‌ریزی شهری آینده شهر اصفهان به منظور اقدامات زیرساختی و همچنین به کمترین حد رساندن آثار سوء جزایر حرارتی شهری (UHI) دارد.

داده و روش‌شناسی

منطقه بررسی شده در این پژوهش، شهر اصفهان به منزله سومین کلان‌شهر ایران است. این شهر طی سال‌های ۱۰۵۰ تا ۱۷۲۲ میلادی، به‌ویژه در قرن شانزدهم (حکومت صفویان) رونق فراوانی یافت. در این زمان، اصفهان برای دومین بار (پس از دوران سلجوقیان) پایتخت ایران شد. بناهای تاریخی متعددی در شهر وجود دارد که تعدادی از آن‌ها در یونسکو به ثبت رسیده‌اند. اصفهان در سال ۲۰۰۶، پایتخت فرهنگی جهان اسلام و در سال ۱۳۸۸، پایتخت فرهنگ و تمدن ایران اسلامی و همچنین پایتخت صنعتی ایران پس از تهران شد. این شهر در آذر ۱۳۹۴ (دسامبر ۲۰۱۵) به همراه رشت به منزله نخستین شهرهای ایران، به شبکه شهرهای خلاق جهان زیر نظر یونسکو پیوست. براساس آمارهای جمعیتی مرکز آمار ایران، جمعیت اصفهان در سال ۱۳۹۰ هجری خورشیدی، ۹۰۸,۹۶۸,۱ تن بوده است. شکل (۱) موقعیت منطقه بررسی شده را نشان می‌دهد.

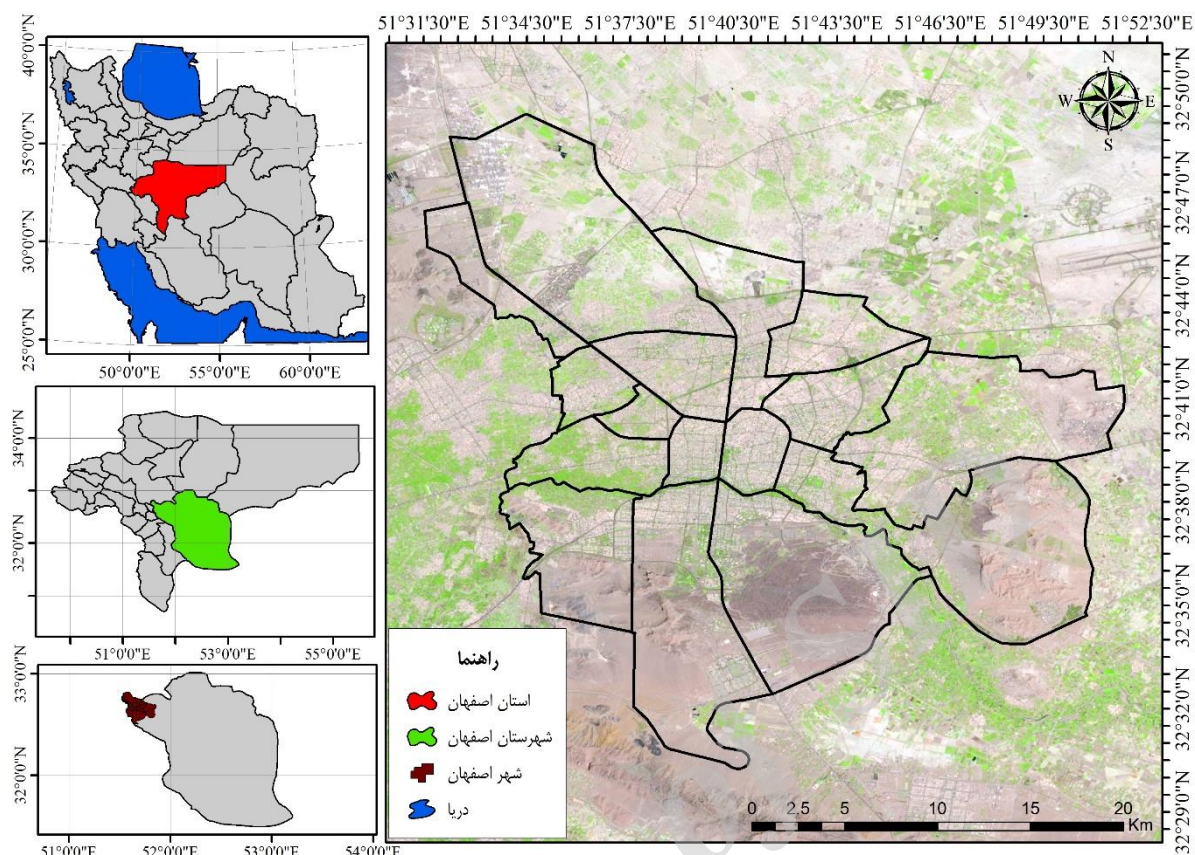
و زیبر و همکاران^۱ (۲۰۱۶) پژوهش‌هایی را انجام داده‌اند.

در ایران کمتر پژوهشگری جزایر حرارتی شهری را با رویکرد زیست‌محیطی ارزیابی کرده است. در یکی از این معدود پژوهش‌ها، خسروی و قبادی (۱۳۹۰) جایگاه سامانه بام سبز را در تعدیل جزیره حرارتی شهری کرج تبیین کرده‌اند؛ یافته‌های آنان نشان داد کاهش چشمگیری در ظرفیت حرارتی وجود دارد. این نویسندگان پیشنهاد دادند برنامه‌ریزان، جزیره حرارتی کلان‌شهر کرج را با توسعه بام سبز کاهش دهند.

«توپوکلیمای و وارونگی شهر اصفهان» نیز، پژوهشی است که درویش محمدی (۱۳۹۱) انجام داد و به این نتیجه رسید که سلول‌های بسته حرارتی یا فشاری شایان تأملی بر فراز شهر اصفهان تشکیل نمی‌شود. همچنین وی با مقایسه داده‌های به‌دست‌آمده از فضای توپوگرافیک و حجمی اتمسفریک به این نتیجه رسید که ارتفاعات محلی، تأثیر بیشتری در میزان تغییرات دمایی محیط دارد و کمتر بر میزان فشار تأثیر می‌گذارد.

تمرکز پژوهش حاضر بر شناسایی و توزیع مکانی الگوی دمای سطح زمین (LST) شهر اصفهان با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره لندست ۸ در دوره گرم سال برای دوره آماری ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ میلادی است. هدف از این پژوهش، شناسایی مناطق بحرانی زیست‌محیطی جزایر حرارتی شهری اصفهان و رابطه بین پوشش گیاهی و توزیع (LST) است.

^۱ Zipper and et al.



شکل ۱. موقعیت شهر اصفهان در ایران

روش پژوهش

برای انجام این پژوهش چهار مرحله اصلی به شرح زیر دنبال شد:
 ۱- داده‌ها و پیش‌پردازش:

الف) اطلاعات تصاویر استفاده‌شده: از ۹ تصویر حرارتی مادون قرمز (TIRS) ماهواره لندست ۸، استفاده (جدول ۱) و تصاویر ردیف ۱۳۴ و مسیر ۳۷ سطح (LIT) در شرایط جوی صاف (پوشش ابری کمتر از ۱ درصد) از تارنمای سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا به آدرس <http://glovis.usgs.gov/> بارگیری شد (در جدول (۱)، تصاویر ردیف ۴ و ۷، آسمان شهر اصفهان بدون ابر بوده است).

ب) ارزیابی ترکیبی تصاویر: به منظور ارزیابی ترکیبی اقدام به سنجش میانگین مبتنی بر یاخته‌های ۹ تصویر منتخب شد. این تصویر ترکیبی برای ارزیابی‌های جزایر حرارتی شهری استفاده شد.

ج) اصلاح اتمسفری^۱: برای تصویر حرارتی از اصلاح اتمسفری (TAC^۲) استفاده شد؛ این تدبیر به دلیل دو کاناله بودن تصاویر حرارتی به کار برده شد. علاوه بر این از روش اصلاح جوی سریع^۳ (QUAC) برای اصلاحات جوی گروه‌های بانندی OLI استفاده شد.

^۱ thermal atmospheric correction

^۲ Thermal Atmospheric Correction (TAC)

^۳ Quick Atmospheric Correction

ه) مرز مناطق شهری: داده‌های اشاره شده از مرکز فناوری اطلاعات شهرداری اصفهان به دست آمده است؛ مرز مناطق ۱۵ گانه شهرداری اصفهان برای سال ۱۳۹۴ هجری خورشیدی و سیستم تصویر WGS-1984 UTM zone 39N برای محاسبه کمترین، بیشترین و میانگین دمای سطح زمین شهر از ابزار آمار منطقه‌ای^۱ نرم‌افزار ArcMap استفاده شد. معابر شهری از تارنمای <http://www.openstreetmap.org> به دست آمده است.

د) داده‌های ایستگاه زمینی: عناصر دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)، دید افقی (متر)، دمای نقطه شبنم (درجه سانتی‌گراد)، سرعت باد (متر بر ثانیه) و بارندگی ۲۴ ساعت گذشته (میلی‌متر) ایستگاه همدید اصفهان برای ساعت ۱۰ تا ۱۲ به وقت تهران براساس زمان گرفتن تصاویر از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد تا ضمن آشکار شدن نقش عوامل آب و هوایی، درستی داده‌های ماهواره‌ای نیز ارزیابی شود.

جدول ۱. اطلاعات تصاویر به کار رفته

ردیف	تاریخ	زمان ^۲	پوشش ابری %	کیفیت تصویر	مسیر / ردیف	تفکیک مکانی (متر)
۱	۲۰۱۳/۰۶/۱۲	۷:۱۰:۵۴	۰	۹	۱۶۴/۳۷	30 OLI/100 TIRS
۲	۲۰۱۳/۰۷/۱۴	۷:۱۰:۵۳	۱	۹	۱۶۴/۳۷	30 OLI/100 TIRS
۳	۲۰۱۳/۰۹/۱۶	۷:۱۰:۵۲	۰	۹	۱۶۴/۳۷	30 OLI/100 TIRS
۴	۲۰۱۴/۰۶/۱۵	۷:۰۸:۳۶	۲	۹	۱۶۴/۳۷	30 OLI/100 IRS
۵	۲۰۱۴/۰۸/۰۲	۷:۰۸:۵۳	۰	۹	۱۶۴/۳۷	30 OLI/10 TIRS
۶	۲۰۱۴/۰۹/۰۳	۷:۰۹:۰۱	۰	۹	۱۶۴/۳۷	30 OLI/100 TIRS
۷	۲۰۱۵/۰۷/۰۴	۷:۰۸:۲۰	۴	۹	۱۶۴/۳۷	30 OLI/100 TIRS
۸	۲۰۱۵/۰۸/۰۵	۷:۰۸:۳۱	۱	۹	۱۶۴/۳۷	30 OLI/100 TIRS
۹	۲۰۱۵/۰۹/۰۶	۷:۰۸:۴۴	۱	۹	۱۶۴/۳۷	30 OLI/100 TIRS

۲- محاسبه دمای سطح زمین (LST)
 الف) محاسبه دمای سطح زمین: ارزش‌های رقومی تصاویر حرارتی ($TIRS$) به رادیانس طیفی تبدیل شد (USGS, 2013). معادله (۱).
 ب) تبدیل مقادیر به دمای روشنایی: در گام بعدی این مقادیر با بهره‌گیری از معادله (۲) به دمای روشنایی تبدیل شدند.

$$TB = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{k_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (2)$$

TB ، دمای درخشندگی به کلوین و $k_1 = 774.89$ و $k_2 = 1321.08$ ، مقادیر ثابت

رادیانس، L_λ ، رادیانس طیفی حسگر $(W / M^2 srad \mu m)$ ؛ $gain = (0.0003342)$ ، عامل تغییر مقیاس خاص برای هر بانده از فراداده^۳؛

$$L_\lambda = gain \times DN + offset \quad (1)$$

زمان به وقت UTC است.^۲
^۳ metadata

^۱ Zonal Statistics

^۲ زمان به وقت UTC است.

^۳ metadata

د) ارزیابی شاخص وضعیت پوشش گیاهی: شاخصی که به شکل گسترده‌ای در پژوهش‌های شهری به کار می‌رود، NDVI است. نتایج پژوهش رسول و همکاران^۵ (۲۰۱۵) نشان داده این شاخص در مقایسه با *GVI* به دلیل ترکیب طیفی چندخطی، نتایج بهینه‌تری را ارائه می‌دهد. همچنین کارنیلی و همکاران^۶ (۲۰۱۰) و وو^۷ (۲۰۱۴) تایید کردند که این شاخص پوشش گیاهی دارای جذب قوی در باند قرمز و بازتاب قوی از تابش در باند مادون قرمز است. برای محاسبه NDVI از معادله سوبرینو^۸ (سوبرینو و همکاران، ۲۰۰۴: ۴۳۶) استفاده شده است.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (4)$$

ρ_{NIR} ، بیان‌کننده میزان بازتاب در باند مادون قرمز و ρ_{RED} ، بیان‌کننده میزان بازتاب در باند قرمز است. شاخص وضع بحرانی زیست‌محیطی (ECL)^۹ توسعه پوشش گیاهی، نقش مهمی را در کاهش چالش‌ها و مسائل زیست‌محیطی شهری ایفا می‌کند. در مقابل حذف پوشش گیاهی منجر به حساسیت‌های زیست‌محیطی در سطح شهر می‌شود؛ بر این اساس بررسی شاخص پوشش گیاهی، یکی از عوامل اصلی در مطالعات جزایر حرارتی شهری (*UHI*) به‌شمار می‌رود. پیرو آن پوشش گیاهی به منزله شاخصی برای پایداری اکولوژیکی در جامعه‌ای شهری در نظر گرفته می‌شود.

کالیبراسیون هستند که از قرارداد در دسترس است (USGS, 2013). دمای روشنایی محاسبه‌شده از رابطه (۲)، برحسب جسم سیاه خواهد بود. نسبت بین گسیلمندی از یک جسم به گسیلمندی جسم سیاه، در دمای ثابت را گسیلمندی یا تابندگی می‌نامند. مقدار گسیلمندی برای تبدیل دمای روشنایی به دمای جنبشی سطح ضروری است؛ زیرا دقت *LST* استخراج‌شده به این امر بستگی دارد. این روش را برای نخستین بار گیلسپی^۱ (۱۹۸۶) توصیف کرد و کمی بعد لی و همکاران^۲ (۱۹۹۹)، آن را برای محاسبه گسیلمندی به کار بردند. روش محاسباتی گسیلمندی بدین شرح است: بیشترین درجه حرارت هر پیکسل به دست می‌آید (لی و همکاران، ۲۰۱۳: ۳۰۸۵) و سپس برای اصلاح گسیلمندی به کار گرفته می‌شود (ژانگ و همکاران^۳، ۲۰۱۳: ۱۲۴).

ج) تصحیح گسیلمندی دمای سطح زمین: براساس معادله (۳) محاسبه شد.

$$T_s = \frac{TB}{(1 + (\lambda TB / \rho) \ln \varepsilon)} \quad (3)$$

T_s ، دمای سطح زمین (به کلونین)؛ T_B ، دمای روشنایی؛ λ ، طول‌موج رادیانس ساطع‌شده (11.5μ)؛ ρ ، معادل است با $h \times c / \sigma = 1/438 * 10^{-2} (mk)$ ، ثابت پلانک با مقدار $6.626 * 10^{-34} (j.sec)$ ؛ C ، معادل سرعت نور، یعنی $2.998 * 10^8 (m/s)$ ؛ σ ، ثابت بولتزمن با مقدار $1/38 * 10^{-23} (j/k)$ و ε ، گسیلمندی است (فارینا^۴، ۲۰۱۲).

⁵ Rasul and et al.

⁶ Karnieli et al.

⁷ Wu

⁸ Sobrino

⁹ Environmental Criticality Index

¹ Gillespie

² Li et al.

³ Zhang et al.

⁴ Farina

در این رابطه $ECL_{(LST-Veg)}$ ، شاخص وضع بحرانی زیست‌محیطی بوده که برای مقادیر LST و $NDVI$ با روش هیستوگرام از ۱ تا ۲۵۵ کشیده شده است.

به منظور تعریف مقادیر آستانه تقریبی برای شاخص، مقادیر کمتر از لایه اول آستانه به دست آمده از کسر هیستوگرامی به منزله مناطق پایین یا مناطق غیرحساس نسبت به مناطق هم‌جوار در طول دوره آماری بررسی شده شناسایی شدند. این روش شناسایی مبتنی بر روش طبقه‌بندی چندک در سه طبقه بحرانی (در مجموع با مقدار کم در چهار طبقه) بر اساس مقدار ارزشی هیستوگرام LST و در دسترس بودن پوشش گیاهی ($NDVI$) است.

ارزیابی تغییرات دمای سطح زمین و همبستگی LST با دمای جعبه اسکرین هواشناسی

برای همبستگی دمای سطح زمین با دمای جعبه استاندارد ایستگاه همدید اصفهان از دیاگرام تیلور استفاده شده است. نمودار تیلور به صورت دو نیم‌دایره (نمایش همبستگی منفی و مثبت) و ربع‌دایره (فقط نمایش همبستگی مثبت) ارائه می‌شود که در هر دور، صورت مقادیر همبستگی به صورت شعاع دایره روی قوس آن، مقادیر انحراف معیار به صورت دایره متحدالمرکز نسبت به مرکز دایره و مقادیر $RMSD$ به صورت دایره متحدالمرکز نسبت به نقطه مرجع (دایره توخالی روی محور افقی)، ترسیم می‌شود (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۵: ۴۲).

برای تغییرات دمای سطح زمین هر جفت تصاویر برای ماههای مشابه بررسی شده و تابع چگالی دمایی شبیه‌سازی شده است. در این روش، تابع چگالی

از آنجا که فقر پوشش گیاهی و افزایش دمای سطح زمین، تأثیری منفی بر سطح شهر دارد، شناسایی مناطق حساس زیست‌محیطی از نظر دمایی ضروری است. با در نظر گرفتن این دیدگاه، یک شاخص قیاسی با بهره‌گیری از مقادیر LST و شاخص پوشش گیاهی $NDVI$ به منظور شناسایی وضع بحرانی زیست‌محیطی در شهر اصفهان تعریف شد. در این شاخص، مناطقی بحرانی خواهند بود که مقدار LST زیاد و $NDVI$ کم داشته باشند. طیف ارزشی شاخص $NDVI$ از -۱ برای مناطق بدون پوشش گیاهی تا +۱ برای مناطق با پوشش گیاهی متراکم در نوسان است؛ از این رو بیشترین حساسیت زیست‌محیطی در مقادیر $NDVI$ با ارزش کم و کمترین حساسیت زیست‌محیطی در مقداری بالعکس مشاهده می‌شود؛ از سوی دیگر، $LSTs$ بیشتر که معرف $UHIs$ شدیدتری است، به شرایط نامطلوب زیست‌محیطی اختصاص دارد؛ بر این اساس مقادیر LST و $NDVI$ به طور مستقیم و معکوس - متناسب با روابطی که پیش‌تر شرح آن آمده - وضع بحرانی زیست‌محیطی شهری را ارائه می‌دهند. (سینانیک و همکاران^۱، ۲۰۱۳: ۲۶). بر اساس این واقعیت، شاخص قیاسی تعریف شده در رابطه ۵ نشان داده شد. در این روش، مقادیر LST و $NDVI$ در دسترس با بهره‌گیری از روش هیستوگرام از ۱ تا ۲۵۵ کشیده شده‌اند.

$$ECL_{(LST-Veg)} = \frac{LST_{(stretched\ 1-255)}}{NDVI_{(stretched\ 1-255)}} \quad (5)$$

¹ Senanayake and et al.

زمین ۵۸/۷۷ درجه سانتی‌گراد و میانگین کمینه آن نیز، ۳۰/۹۳ درجه سانتی‌گراد به دست آمده است. مناطق ۵، ۶ و ۱۲ شهر اصفهان، گرم‌ترین مناطق شهری و مناطق ۱ و ۳، سردترین مناطق شهری هستند. از آنجایی که اندازه و شکل‌شناسی این پدیده، حاصل ویژگی‌های آب و هواشناسی محلی است، بنابراین از این منظر وجود تغییرات زمانی- مکانی محرز خواهد بود. اطلاعات آب و هوایی اندازه‌گیری شده ایستگاه همدید اصفهان در جدول (۲) برای ۹ روز برگزیده به شرح زیر ارائه شده است.

جدول ۲. اطلاعات آب و هوایی ایستگاه همدید اصفهان برای ۹ روز برگزیده

ردیف	تاریخ	دمای ایستگاه (درجه سانتی‌گراد)	دید افقی متر	دمای نقطه شبنم (درجه سانتی‌گراد)	سرعت باد (متر بر ثانیه)	بارندگی ۲۴ ساعت گذشته (میلی‌متر)
۱	۲۰۱۳/۰۶/۱۲	۳۳	۶۰۰۰	-۸	۳	۰
۲	۲۰۱۳/۰۷/۱۴	۳۵	۵۰۰۰	۷	۲	۰
۳	۲۰۱۳/۰۹/۱۶	۳۱	>۱۰۰۰۰	-۹	۲	۰
۴	۲۰۱۴/۰۶/۱۵	۳۰	>۱۰۰۰۰	۳	۵	۰
۵	۲۰۱۴/۰۸/۰۲	۳۵	>۱۰۰۰۰	-۱	۵	۰
۶	۲۰۱۴/۰۹/۰۳	۳۱	>۱۰۰۰۰	-۱	۲	۰
۷	۲۰۱۵/۰۷/۰۴	۳۶	>۱۰۰۰۰	-۲	۲	۰
۸	۲۰۱۵/۰۸/۰۵	۳۲	>۱۰۰۰۰	-۴	۴	۰
۹	۲۰۱۵/۰۹/۰۶	۳۱	>۱۰۰۰۰	۰	۲	۰

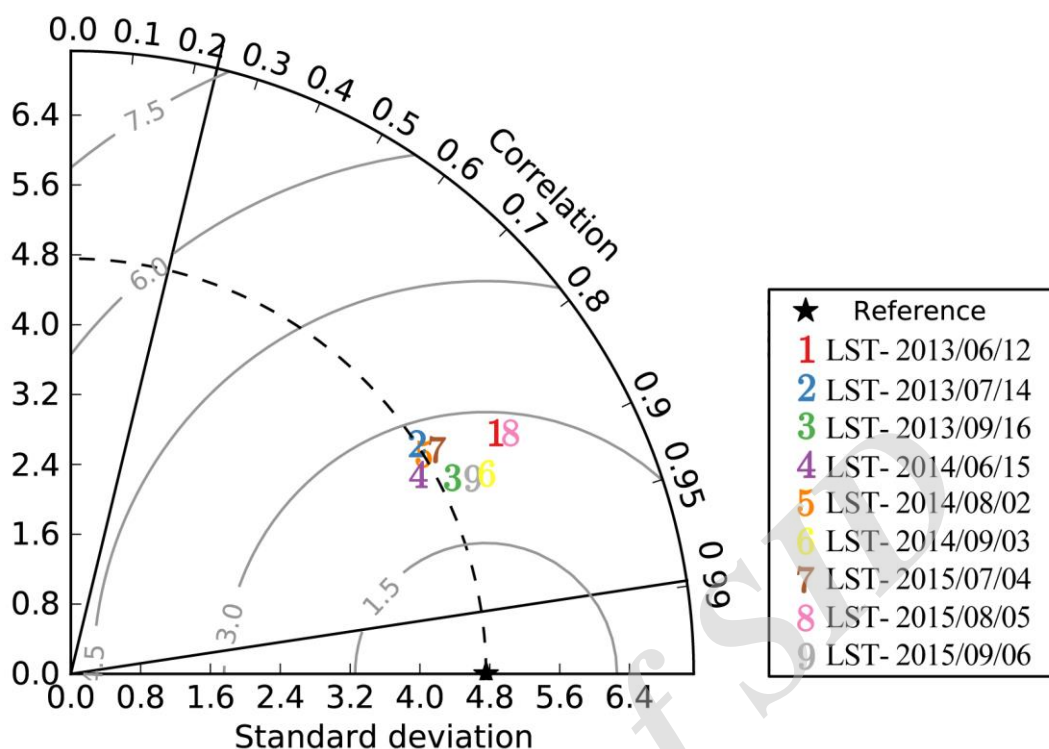
دمای سطح زمین با دمای جعبه استاندارد هواشناسی ایستگاه همدید اصفهان، براساس دیاگرام تیلور در شکل (۲) ارائه شده است. با توجه به نتایج، داده‌های دمای سطح زمین محاسبه شده برای ۹ روز، دارای دقت زیادی است. مقدار همبستگی به دست آمده (مشخص در نمودار) به‌طور میانگین برای ۹ روز برگزیده، ۰/۹۱۲ است.

واحد بوده و تابعی از مقدار میانگین و واریانس است (باباییان و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۰۷).

نتایج و بحث

نتایج محاسبه دمای سطح زمین ۹ تصویر برگزیده برای شهر اصفهان، نشان داد بیشینه دمایی شهر اصفهان با ۶۲/۶۷ درجه سانتی‌گراد در ماه ژوئن سال ۲۰۱۳ و کمینه دمای سطح زمین با ۲۸/۷۰ درجه سانتی‌گراد در همین ماه اتفاق افتاده است. میانگین دمای سطح زمین شهر اصفهان در دوره گرم سال ۴۷/۲۳ درجه سانتی‌گراد، میانگین بیشینه دمای سطح

براساس جدول بالا، در ۲۴ ساعت گذشته هیچ‌گونه بارشی ثبت نشده و سرعت باد نیز ملایم بوده است؛ از سوی دیگر همان‌طور که در جدول (۱) آمده، هوای شهر اصفهان طی ۹ روز برگزیده کاملاً صاف بوده است (مقدار ابری بودن اشاره شده برای بعضی روزها برای کل شیت است و آسمان شهر اصفهان بدون ابر بوده است)؛ دید افقی نیز مقادیر جالب توجهی داشته است. نتایج ارزیابی داده‌های



شکل ۲. نمودار تیلور برای دمای سطح زمین و ایستگاه همدید اصفهان

نمودارهای مربوط به همین دو ماه، حاکی است دم منحنی به سمت راست متمایل شده که بر این اساس، داده‌ها چوله به راست است؛ در این حالت فراوانی مقادیر کمتر از میانگین، بیشتر از فراوانی مقادیر بیشتر از میانگین است.

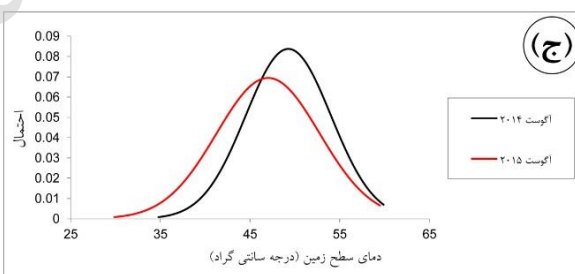
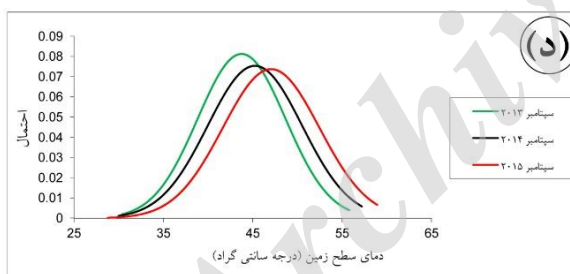
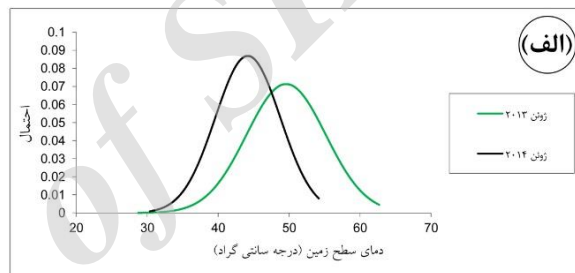
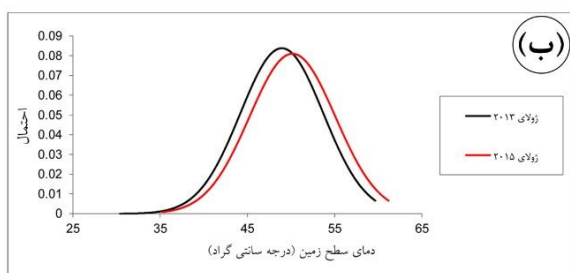
شکل‌شناسی تابع نشان داده بیشترین تغییرات پراش مربوط به ماه آگوست با ۱۰/۳۰ واحد و پس از آن ماه ژوئن با ۱۰/۱۷ واحد بوده است. برخلاف دو ماه جولای و سپتامبر که تابع به سمت راست (افزایش دمای سطح زمین) در حرکت است، در دو ماه ژوئن و آگوست، تابع به سمت چپ (کاهش دمای سطح زمین) جابه‌جا شده است؛ به طوری که در ژوئن ۲۰۱۳، میانگین دمای سطح زمین ۴۹/۵۶ درجه سانتی‌گراد به دست آمده است؛ این در حالی است که در ژوئن ۲۰۱۴، این مقدار به ۴۴/۷۴ درجه سانتی‌گراد رسیده

تابع چگالی دمای سطح زمین با بهره‌گیری از توزیع نرمال در شکل (۳) ارائه شده است. برای مقایسه بهتر، ماه‌های مشابه جداگانه در دوره‌های مختلف نشان داده شده‌اند. از آنجایی که مساحت تابع چگالی واحد و تابعی از مقدار میانگین و پراش بوده (بابایان و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۰۷)، بنابراین با توجه به افزایش پراش یا پهن‌شدگی تابع گوس، ارتفاع منحنی (چگالی) کاهش یافته است.

نکته مهمی که در شبیه‌سازی‌ها دیده می‌شود، افزایش پراش تمامی ماههای بررسی شده به جز ژوئن است که نبود شرایط ثابت دمایی را نشان می‌دهد؛ به طوری که با گذشت زمان، ناهنجاری‌های دمایی حول و حوش میانگین خود، دارای نوسان بیشتری در مقایسه با دوره پیشین خود است؛ این امر، خطری جدی برای وضع زیست‌محیطی شهر اصفهان در آینده به‌شمار می‌آید.

شبنم را معادل ۸- درجه سانتی‌گراد گزارش کرده است؛ این در حالی است که ۱۵ ژوئن ۲۰۱۴، مقدار گزارش این پارامتر ۳ درجه سانتی‌گراد بوده است. سرعت باد نیز برای سال ۲۰۱۴ نسبت به تصویر متناظر خود در سال ۲۰۱۳ میلادی، ۲ متر افزایش داشته؛ در مجموع باید گفت عوامل آب و هوایی بر تغییرات دمایی این دو روز تأثیر گذاشته است؛ به طوری که حتی با جابه‌جایی زمانی سه‌روزه تصویر، شاهد کاهش ۵/۴۰ درجه سانتی‌گرادی در دمای سطح زمین هستیم.

است؛ همچنین در آگوست ۲۰۱۴ میلادی، میانگین دمای سطح زمین ۴۹/۲۷ درجه سانتی‌گراد و در آگوست ۲۰۱۵ میلادی، این مقدار با کاهش ۲/۲۵ درجه سانتی‌گرادی به ۴۷/۰۱ درجه سانتی‌گراد رسیده است. در توضیح این کاهش دمایی به جدول (۲) اشاره می‌شود. همان‌طور که پیداست در ژوئن ۲۰۱۳، مسیر ۱۶۴ و ردیف ۳۷ برداشت‌شده با ماهواره، هیچ‌گونه ابری نداشته است؛ در حالی که برای سال ۲۰۱۴، پوشش ابری به ۲ درصد رسیده است؛ از سوی دیگر، ایستگاه همدید اصفهان در ۱۲ ژوئن ۲۰۱۳، دمای نقطه



شکل ۳. شبیه‌سازی تابع چگالی دمای سطح زمین شهر اصفهان (الف) ماه ژوئن؛ (ب) ماه جولای؛ (ج) ماه آگوست و (د) ماه سپتامبر

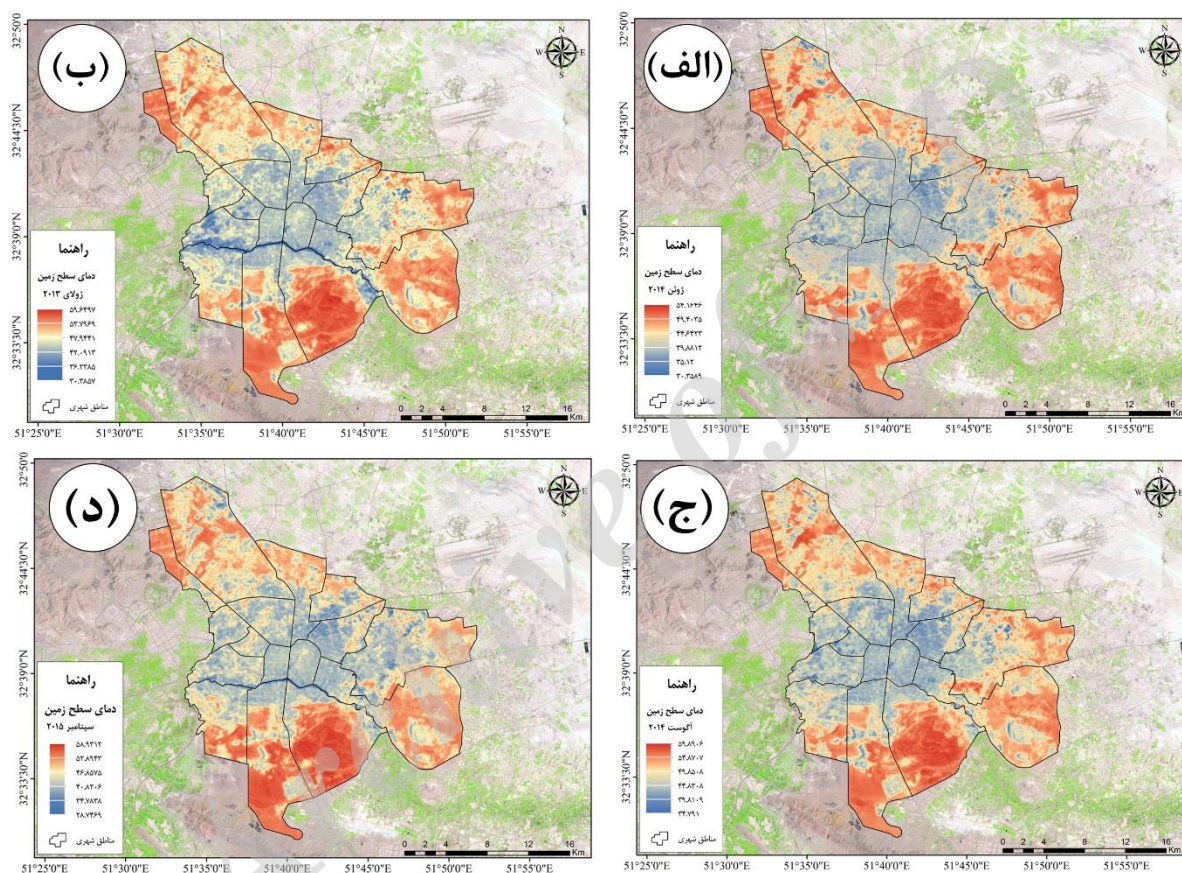
محیط اطراف خشک غیرشهری دارد که به‌خوبی مؤید وجود جزایر حرارتی سرد (UCI)^۱ در این شهر است. مرز بین مرکز شهر و حومه از شیب حرارتی تندی برخوردار است. قسمت مرکزی شهر شامل مناطق ۱، ۲، ۳، ۸، ۹ و ۱۰، از تمام جهات با جزایر حرارتی

شکل (۴) تغییرات دمای سطح زمین را در سطح شهر اصفهان نشان می‌دهد. براساس این اشکال، دمای اطراف شهر بیش از مرکز آن است و اطراف شهر ویژگی یک جزیره حرارتی گرم (UHI) را دارد. از آنجایی که اصفهان در یک منطقه نیمه‌خشک قرار گرفته، مرکز شهر دمای سطحی کمتری را نسبت به

^۱ Urban Cool Island (UCI)

که جهت آن به سمت خارج از مرز مناطق شهرداری اصفهان است. در حالت مقابل، یکنواختی بخش مرکزی شهر با آثار کاربری‌های مختلف درون شهر، مانند پارک‌ها، دریاچه‌ها و آب‌نماهای مصنوعی، فضای باز خنک، وجود منبع آبی زاینده‌رود و انشعابات آن، باعث قطع مناطق گرم شده است.

پیرامونی محاصره‌شده است. بخش‌های شمالی مناطق ۴، ۶، ۵ و ۱۳ که با مناطق ۱، ۳ و ۹ هم‌مرز هستند نیز، دمای کمی دارند. همچنین در قسمت‌های شرقی مناطق ۱۵ و ۱۰، مناطق غربی ۹ و ۱۱ و مناطق جنوبی ۷، ۸، ۱۱ و ۱۴، بیشترین قسمت باقی‌مانده شهر نیز با هوای گرم و گرادیان افزایشی نسبتاً ضعیف اشغال شد

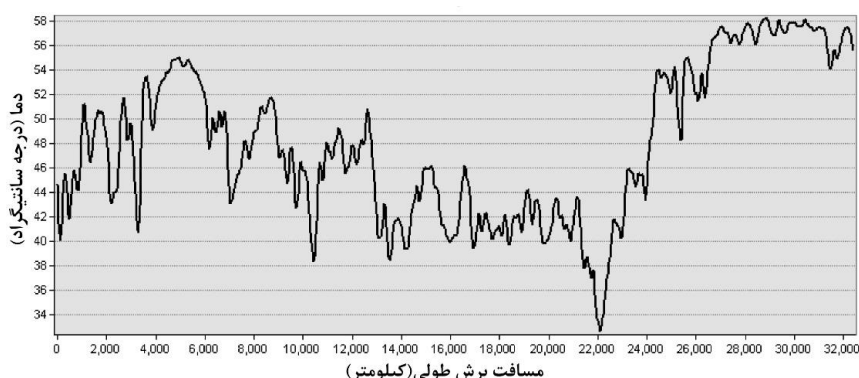


شکل ۴. دمای سطح زمین شهر اصفهان

(الف) ژوئن ۲۰۱۴؛ (ب) جولای ۲۰۱۳؛ (ج) آگوست ۲۰۱۴ و (د) سپتامبر ۲۰۱۵

کیلومتری از مبدأ ترسیم پروفیل است. این نقطه، گرانیگاه مناطق شهری ۱، ۳، ۵ و ۶ است که زاینده‌رود در آنها جریان دارد. این کاهش چشمگیر دما در مرز مناطق ۹ و ۱۳، ۱ و ۵، ۳ و ۶ و ۴ به دلیل وجود زاینده‌رود، صادق بوده و نتیجه توان ظرفیت گرمایی بین آب و سطح زمین است.

اگر یک برش طولی از دمای شمالی‌ترین مناطق شهری اصفهان (منطقه ۱۲) به سوی جنوبی‌ترین مناطق آن (منطقه ۶) ترسیم کنیم، به‌خوبی پیداست که دمای سطح زمین شهر اصفهان از حالتی سینوسی پیروی می‌کند. آنچه در این نمودار بیش از پیش خودنمایی می‌کند، کاهش چشمگیر دما در ۲۲



شکل ۵. برش طولی دمای سطح زمین شهر اصفهان از سمت راست به چپ شمالی‌ترین بخش منطقه ۱۲، جنوبی‌ترین بخش منطقه ۶

شکل (۶)، شاخص تفاضل بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI) ۴ تصویر برگزیده را از ۹ تصویر پژوهشی نشان می‌دهد. نقشه پوشش گیاهی مشتق شده از شاخص (NDVI) و مقایسه آن با توزیع دمای سطح زمین (LST)، نشان از انطباق زیاد جزایر حرارتی شهری با سطوح پایین و بالای پوشش گیاهی دارد؛ مثال بارز کاهش دما به علت پوشش گیاهی، بخش غربی شهر اصفهان و مرز مناطق ۹ و ۱۳ است. زندگی گیاهی دمای محیط اطراف خود را از طریق مکانیسم تبدیلی با هوا و خاک کاهش می‌دهد. مهم‌ترین اثر پوشش گیاهی در سطح شهر با پدید آمدن یک زیست‌بوم پایدار، جذب گازهای گلخانه‌ای همچون CO_2 است. کاهش دمای محیط با تبخیر و تعرق نیز، از دیگر آثار پوشش گیاهی است که در مناطق ۲، ۹، ۱۰، ۱۴ و ۱۵ به خوبی دیده می‌شود.

پوشش گیاهی متمرکز، جزایر حرارتی سردی را در دل مناطق گرم شهری اصفهان ایجاد کردند؛ برای نمونه در بخش شمالی منطقه ۱۵، در بخش شرقی شهر، دما در منطقه‌ای بسیار کوچک از ۵۷ درجه سانتی‌گراد به ۳۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است. مقایسه شکل (۴-ب) و (۵-ب) نشان می‌دهد علت

بررسی دمای سطح زمین شهر اصفهان بیانگر این واقعیت است که با توجه به قرارگیری شهر در منطقه نیمه‌خشک، شاهد شکل‌گیری جزایر حرارتی سرد (UCI) در آن هستیم. بزرگ‌ترین جزیره حرارتی گرم این شهر در منطقه ۶، ناحیه‌ای نظامی شکل گرفته است. هرچه از مناطق جنوبی به سمت مناطق شمالی پیش برویم، به دلیل وجود فضاهای سبز و منبع آبی (زاینده‌رود) دما کاهش می‌یابد. به دلیل وجود پایانه‌های اتوبوس، ایستگاه‌های راه‌آهن، شرکت‌ها و ادارات دولتی بزرگ، جزایر حرارتی کانونی در جای‌جای شهر مشاهده می‌شود. مناطق نواری متمایل به زرد در سطح شهر شامل راه‌آهن، بزرگراه‌های بین شهری، جاده‌های درون‌شهری و کوچه‌های شهری است که با آسفالت پوشیده شده‌اند. تک‌یاخته‌های موجود نیز ساختمان‌ها، پارکینگ‌ها و زمین‌هایی لم‌یزرع هستند که به شکل یاخته‌هایی با دمای زیاد در سطح شهر خودنمایی می‌کنند. کاهش دما در اطراف زاینده‌رود که به رنگ آبی کم‌رنگ نشان داده شده، از یک سو به دلیل وجود پوشش گیاهی متنوع و متراکم و از سوی دیگر نسیم ساحلی و سرمایش تبخیری^۱ زاینده‌رود است.

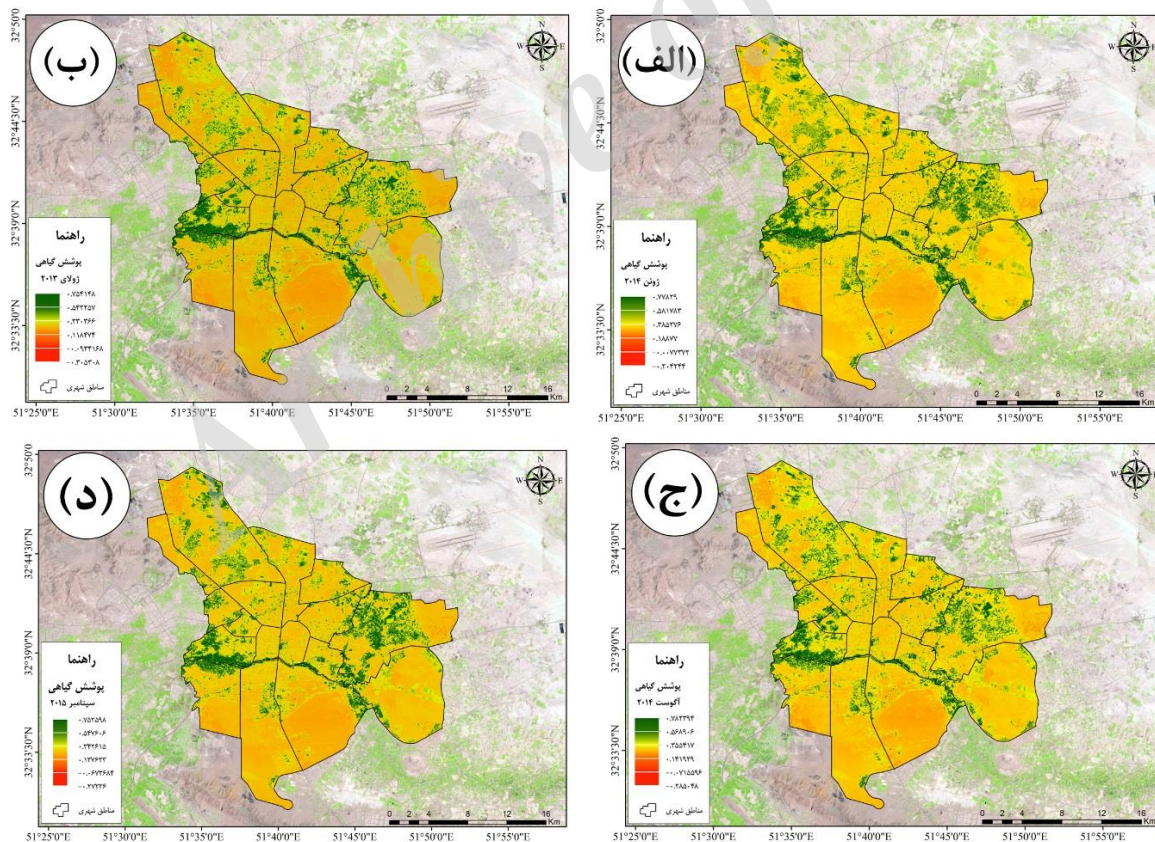
^۱ Evaporative Cooling

آسان نیست؛ زیرا این تغییرات نتیجه عوامل بسیاری از قبیل نشستن گرد و خاک بر روی گیاه، در دسترس نبودن آب کافی، بیماری گیاه و ده‌ها عامل دیگر بوده و نیازمند پژوهش‌های آزمایشگاهی است؛ اما آنچه مشخص است اینکه تغییرات کاهشی یا افزایشی در یک دوره زمانی پیوسته در یک محیط مصنوعی همچون شهر، پیامد دخالت‌های انسان است و اگر این دخالت از نوع تخریب و کاهش پوشش گیاهی باشد، آثاری سوء به همراه دارد. البته بیان این نکته ضروری است که در سال‌های اخیر، تغییر دبی زاینده‌رود و حتی خشک‌شدن آن در مقاطعی از سال، در تغییر دمای شهر اصفهان و پوشش گیاهی آن بی‌تأثیر نبوده است.

این امر، وجود پوشش گیاهی متراکم با مقدار عددی ۰/۷۵ در مقیاس عددی شاخص NDVI است.

در بررسی ماه سپتامبر، مقدار شاخص NDVI، هرسال کاهش را نشان داده است؛ به طوری که از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ به ترتیب بیشینه شاخص ۰/۸۳، ۰/۸۰ و ۰/۷۵ را ارئه داده است. ماه جولای ۲۰۱۳، شاخص عدد ۰/۷۵۴ و برای جولای ۲۰۱۵ شاخص عدد ۰/۷۵۱ است؛ به همین ترتیب برای آگوست ۲۰۱۴، شاخص ۰/۷۸ و آگوست ۲۰۱۵، شاخص ۰/۸۴ به دست آمده است. همین مقدار برای ژوئن ۲۰۱۳، عدد ۰/۸۰ و ژوئن ۲۰۱۴، عدد ۰/۷۷ را نشان داده است.

تغییرات آستانه‌های کمینه و بیشینه پوشش گیاهی در سطح یک شهر با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای



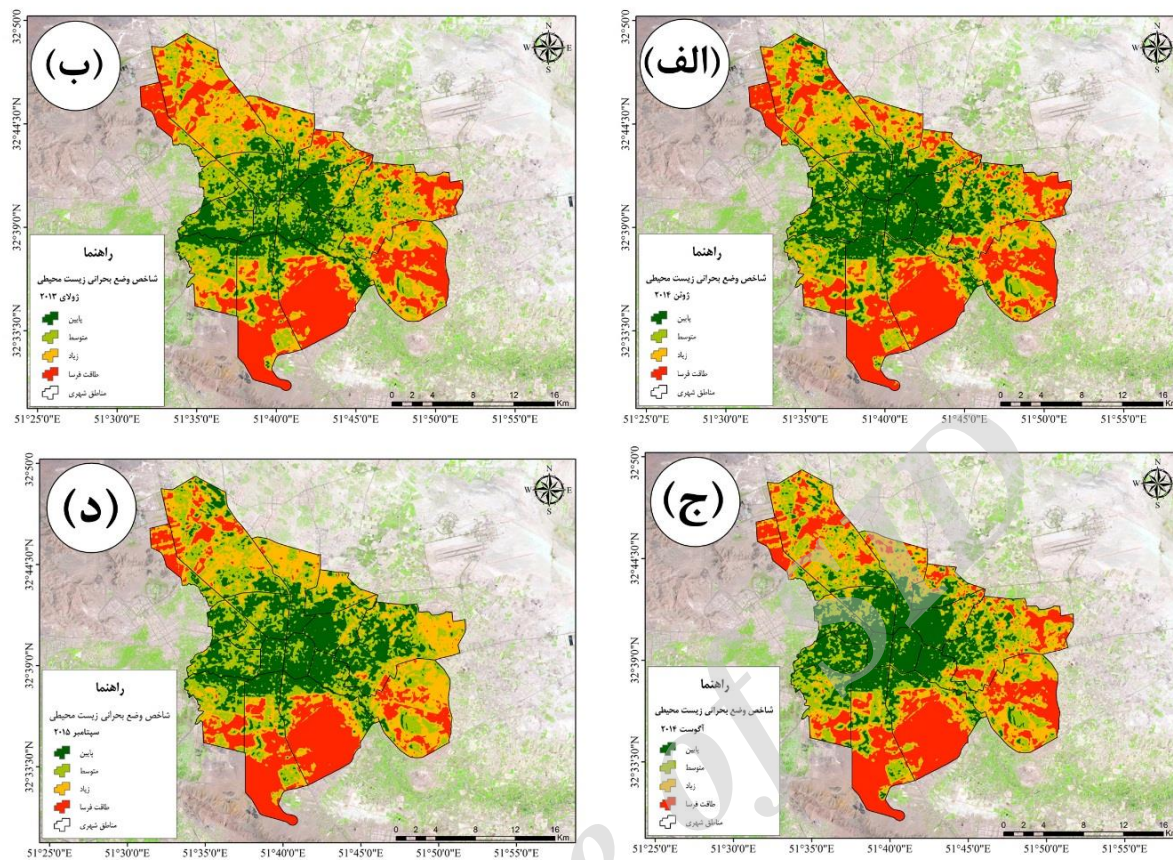
شکل ۶. شاخص تفاضل بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI)

(الف ژوئن ۲۰۱۴؛ ب) جولای ۲۰۱۳؛ ج) آگوست ۲۰۱۴ و د) سپتامبر ۲۰۱۵

در بین تصاویر برگزیده، جولای ۲۰۱۵ با ۲۹/۸۷ درصد مناطق طاقت‌فرسا، بحرانی‌ترین ماه دوره پژوهش بوده است (جدول ۳). هر یک از طیف‌های بررسی‌شده، تغییر با یک‌چهارم از سطح شهر را اشغال کرده‌اند. شناسایی جزایر حرارتی شهری و مناطق بحرانی شهر اصفهان، کمک شایان توجهی به پروژه‌های برنامه‌ریزی شهری آینده می‌کند. همان‌طور که بحث شده، یکی از منابع اصلی جزایر حرارتی شهری اصفهان، زمین‌های خشک اطراف شهر هستند که به شکل جزایر حرارتی پیرامونی ایفای نقش می‌کنند؛ بنابراین با اعمال سیاست‌های ایجاد مناطق سبز با گیاهان بومی و سازگار با آب و هوای خشک و نیمه‌خشک، تا حد بسیار زیادی از آثار سوء این پدیده ویرانگر جلوگیری می‌شود. همچنین ردپای ساختمان‌های بزرگ شهری و بناهای بزرگ مسقف پوشانده با بتن یا ورق‌های فولادی نیز، در سطح شهر به صورت کانون‌های طاقت‌فرسا و زیاد خودنمایی می‌کند؛ با اعمال سیاست‌های بام سبز، آثار سوء این عامل نیز به کمترین میزان می‌رسد؛ علاوه بر این، با کاشت درختان بومی و آبیاری بسامان، آثار زیان‌بار بازتاب سطح جاده‌ها و پارکینگ‌های بزرگ شهری کاهش چشمگیر می‌یابد.

براساس نتایج محاسبات شاخص وضع بحرانی زیست‌محیطی، این شاخص برای هر ۹ تصویر بررسی‌شده، ۱۲ کلاس با ارزش ۰ تا ۲۹ به‌دست آمده است. مناطقی با ارزش صفر به منزله مناطق غیرحساس و سایر مناطق با بهره‌گیری از روش چندک و فواصل برابر تقسیم‌بندی شدند. شکل (۷) نتایج به‌دست‌آمده از این شاخص، وضع بحرانی زیست‌محیطی را برای چهار روز برگزیده ارائه داده است. بر این اساس بیشترین حساسیت زیست‌محیطی در مناطق جنوبی شهر و پس از آن در مناطق شمالی شهر است. نبود پوشش گیاهی و وجود جزایر حرارتی گرم بر افزایش حساسیت‌های زیست‌محیطی این مناطق تأثیر گذاشته است.

مناطق مرکزی شهر اصفهان به دلیل وجود پوشش گیاهی خوب و دمای کم از یکسو و اثر تعدیلی زاینده‌رود در دمای این ناحیه از شهر اصفهان از سوی دیگر، نمره کم را در شاخص کسب کردند؛ بنابراین ضروری است برای حفظ و بقای زاینده‌رود اقدامات لازم صورت گیرد؛ زیرا با خشک‌شدن زاینده‌رود و کاهش سطح آب، حیات بیولوژیکی شهر اصفهان به مخاطره می‌افتد و این مناطق نیز همچون مناطق جنوبی و شمالی، شرایط طاقت‌فرسایی را تجربه خواهند کرد.



شکل ۷. نتایج به‌دست‌آمده از شاخص وضع بحرانی زیست‌محیطی (ECI) (الف) ژوئن ۲۰۱۴؛ (ب) جولای ۲۰۱۳؛ (ج) آگوست ۲۰۱۴ و (د) سپتامبر ۲۰۱۵

جدول ۳. درصد مناطق به‌دست‌آمده از شاخص وضع بحرانی زیست‌محیطی

ردیف	تاریخ	کم	متوسط	زیاد	طاقة فرسا
۱	۲۰۱۳/۰۶/۱۲	۲۴/۷۸	۲۷/۶۸	۲۴/۲۹	۲۳/۲۴
۲	۲۰۱۳/۰۷/۱۴	۱۹/۵۱	۲۶/۵۵	۲۷/۲۹	۲۶/۶۶۳
۳	۲۰۱۳/۰۹/۱۶	۲۶/۸۳	۲۴/۳۱	۲۴/۱۳	۲۴/۷۱
۴	۲۰۱۴/۰۶/۱۵	۲۴/۶۸	۲۴/۷۶	۲۳/۲۹	۲۷/۲۵
۵	۲۰۱۴/۰۸/۰۲	۲۵/۹۹	۲۳/۹۶	۲۵/۱۲	۲۴/۹۰
۶	۲۰۱۴/۰۹/۰۳	۲۵/۹۰	۲۴/۳۷	۲۷/۱۷	۲۲/۵۴
۷	۲۰۱۵/۰۷/۰۴	۲۲/۸۰	۲۱/۸۵	۲۵/۴۷	۲۹/۸۷
۸	۲۰۱۵/۰۸/۰۵	۲۲/۷۰	۲۲/۰۷	۲۷/۱۶	۲۸/۰۴
۹	۲۰۱۵/۰۹/۰۶	۲۶/۶۶	۲۷/۰۹	۲۶/۴۰	۱۹/۸۲

نتیجه‌گیری

آثار نامطلوب محیطی جزایر حرارتی شهری در بلندمدت منجر به تغییر چشم‌انداز شهری می‌شود؛ بنابراین درک درست از ویژگی‌های پویای شهری و پیکربندی آنها برای کاهش آثار جزایر حرارتی شهری (UHI)، گامی بلند در مسیر توسعه پایدار شهری به شمار می‌آید. هدف از این پژوهش، شناسایی مناطق بحرانی زیست‌محیطی جزایر حرارتی شهری در شهر اصفهان است.

شبیه‌سازی تابع چگالی دمای سطح زمین شهر اصفهان نشان داد پراش تمامی ماه‌های بررسی شده به جز ژوئن افزایش یافته است. این امر، نشان‌دهنده شرایط بی‌ثبات دمایی است؛ به طوری که با گذشت زمان، ناهنجاری‌های دمایی در حول و حوش میانگین خود دارای نوسان بیشتری در مقایسه با دوره پیشین خود است.

تغییرات دمای سطح زمین در سطح شهر اصفهان حاکی است دمای اطراف شهر بیش از مرکز آن است و اطراف شهر ویژگی یک جزیره حرارتی گرم (UHI) را دارد. در ادامه، وجود جزایر حرارتی سرد (UCI)^۱ در مرکز شهر اصفهان شناسایی شد که به دلیل قرارگیری اصفهان در آب و هوای نیمه‌خشک و وجود پارک‌ها، دریاچه‌ها و آب‌نماهای مصنوعی، فضای باز خنک و منبع آبی زاینده‌رود در مرکز شهر، شکل‌گیری چنین پدیده‌ای طبیعی است.

بین مرکز شهر و حومه، شیب حرارتی تندی وجود دارد. بزرگ‌ترین جزیره حرارتی شهر اصفهان در منطقه ۶، ناحیه‌ای نظامی، شکل گرفته است. دو نوع

اصلی دیگر از جزایر حرارتی شهری نیز در اصفهان شناسایی شد: ۱- جزایر حرارتی کانونی که در جای‌جای شهر دیده می‌شود؛ به دلیل وجود پایانه‌های اتوبوس، ایستگاه‌های راه‌آهن، شرکت‌ها و ادارات دولتی بزرگ. ۲- جزایر حرارتی نواری شامل راه‌آهن، بزرگراه‌های بین شهری، جاده‌های درون‌شهری و کوچه‌های شهری که با آسفالت پوشیده شده‌اند. همچنین وجود تک‌یاخته‌هایی با دمای بسیار زیاد نیز شناسایی شد که مبین وجود ساختمان‌ها، پارکینگ‌ها و زمین‌هایی لم‌یزرع است.

نتایج به‌دست‌آمده از شاخص قیاسی زیست‌محیطی (ECI) نشان داد که بیشترین حساسیت زیست‌محیطی در مناطق جنوبی شهر و پس از آن در مناطق شمالی شهر است. نبود پوشش گیاهی و وجود جزایر حرارتی گرم به افزایش حساسیت‌های زیست‌محیطی این مناطق دامن زده است. مناطق مرکزی شهر اصفهان به دلیل برخورداری از پوشش گیاهی خوب و دمای کم از یک سو و اثر تعدیلی زاینده‌رود (نسیم ساحلی و سرمایش تبخیری) از سوی دیگر، از نظر زیست‌محیطی شرایط مناسبی داشته‌اند.

به منظور برون‌رفت از شرایط نابهنجار زیست‌محیطی و توسعه پایدار شهری اصفهان، پیشنهاد می‌شود برنامه‌ریزان با اجرای کاشت درختان بومی و آبیاری بسامان آن از یک سو و اعمال سیاست‌های تعدیلی همچون بام سبز از سوی دیگر، آثار این پدیده سوء شهری را به کمترین میزان کاهش دهند.

مقایسه این پژوهش با پژوهش‌های مشابه جزایر حرارتی کلان‌شهرهای مشهد (موسی بایگی و همکاران، ۱۳۹۱)، تهران (شکیبا و همکاران، ۱۳۸۸؛ صادقی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۲) و شیراز (احمدی و

¹ Urban Cool Island (UCI)

رضوی تحت سناریوهای تغییر اقلیم، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، سال ۵، شماره ۱۱۲، ۱۸-۹۵.

خسروی، محمود؛ قبادی، اسدالله، (۱۳۹۰). تبیین جایگاه سامانه بام سبز در تعدیل جزیره حرارتی شهری (نمونه موردی: کرج)، دو فصلنامه پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری، سال ۲، شماره ۴، ۶۷-۷۸.

درویش محمدی، مرضیه، (۱۳۹۱). توپوکلیمیا و پدیده وارونگی (مطالعه موردی: شهر اصفهان-۱۳۸۹)، استاد راهنما: دکتر رامشت، محمدحسین، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی.

شکیبا، علیرضا؛ ضیائیان فیروزآبادی، پرویز؛ عاشور لو، داوود؛ نامداری، سودابه، (۱۳۸۸). تحلیل رابطه کاربری و پوشش اراضی جزایر حرارتی شهر تهران با استفاده از داده‌های ETM^+ ، سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱، شماره ۱، ۳۹-۵۶.

صادقی‌نیا، علیرضا؛ علیجانی، بهلول؛ ضیائیان فیروزآبادی، پرویز، (۱۳۹۲). کاربرد تکنیک خودهمبستگی فضایی در تحلیل جزیره حرارتی شهر تهران، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال ۱۳، شماره ۳۰، ۶۷-۹۰.

عزیزی، قاسم؛ صفر راد، طاهر؛ محمدی، حسین؛ فرجی سبکبار، حسنعلی، (۱۳۹۵). ارزیابی داده‌های بازکاوی شده بارش برای استفاده در ایران، پژوهش جغرافیای طبیعی، دوره ۴۸، شماره ۱، ۳۳-۴۹.

کاویانی، محمدرضا، (۱۳۹۱). میکرو کلیماتولوژی، سمت، چاپ ششم، تهران، ۳۴۶ صفحه.

موسوی بایگی، محمد؛ اشرف، بتول، فرید حسینی، علیرضا؛ میان‌آبادی، آمنه، (۱۳۹۱). بررسی جزیره حرارتی شهر مشهد با استفاده از تصاویر ماهواره‌ها

همکاران، (۱۳۹۱)، نشان می‌دهد برخلاف بیشتر کلان‌شهرهای ایران، اصفهان الگوی دیگری از جزایر حرارتی شهری را ارائه می‌دهد؛ به طوری که مرکز جغرافیایی این شهر با ناحیه‌ای سرد مربوط به پارک‌ها و سازه‌ها و جریان‌های آبی اشغال شده است.

مقایسه الگوی اصفهان با سه کلان‌شهر تهران، مشهد و شیراز، مبین آن است که ساختار جزایر حرارتی شهری با ویژگی‌های محلی به شدت کنترل می‌شوند. مقایسه نتایج به دست آمده از شهر اصفهان با مونترال کانادا (کاویانی، ۱۳۹۱: ۲۳۵) بیانگر پیروی از الگویی مشابه است.

جزایر حرارتی شهری، آثاری را در فرآیندهای زیستی، اقتصادی و هواشناسی بر جای می‌گذارند. همچنین گرمای شهری به تغییرات طول دوره رشد گیاهان شهری (طولانی‌تر شدن فصل رشد) و در پی آن جابه‌جایی گونه‌های زیستی شهری، رشد و نمو قارچ‌ها و سایر عوامل میکروبی منجر می‌شود. این شکل از گرما در مناطق آب و هوایی خشک و نیمه‌خشکی همچون اصفهان، عاملی نامطلوب و فشاردهنده به شمار می‌آید.

منابع

احمدی، محمود؛ عاشورلو، داوود؛ نارنگی‌فرد، مهدی، (۱۳۹۱). تغییرات زمانی - مکانی الگوهای حرارتی و کاربری شهر شیراز با استفاده از داده‌های سنجنده $TM&ETM^+$ ، سنجش از دور و GIS ایران، سال ۴، شماره ۴، ۵۵-۶۸.

بابائیان، ایمان؛ رضایی‌پور، آذر؛ آهنگرزاده، زهرا، (۱۳۹۳). شبیه‌سازی نمایه آسایش اقلیمی در استان خراسان

- Li, Z. L., Becker, F., Stoll, M. P., & Wan, Z. (1999). Evaluation of six methods for extracting relative emissivity spectra from thermal infrared images. *Remote Sensing of Environment*, 69(3), 197-214.
- Li, Z. L., Wu, H., Wang, N., Qiu, S., Sobrino, J. A., Wan, Z., & Yan, G. (2013). Land surface emissivity retrieval from satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(9-10), 3084-3127.
- Morabito, M., Crisci, A., Messeri, A., Orlandini, S., Raschi, A., Maracchi, G., & Munafò, M. (2016). The impact of built-up surfaces on land surface temperatures in Italian urban areas. *Science of the Total Environment*, 551, 317-326.
- Rasul, A., Balzter, H., & Smith, C. (2015). Spatial variation of the daytime surface urban cool island during the dry season in Erbil, Iraqi Kurdistan, from Landsat 8. *Urban Climate*, 14, 176-186.
- Senanayake, I. P., Welivitiya, W. D. D. P., & Nadeeka, P. M. (2013). Remote sensing based analysis of urban heat islands with vegetation cover in Colombo city, Sri Lanka using Landsat-7 ETM+ data. *Urban Climate*, 5, 19-35.
- Senanayake, I. P., Welivitiya, W. D. D. P., & Nadeeka, P. M. (2013a). Urban green spaces analysis for development planning in Colombo, Sri Lanka, utilizing THEO's satellite imagery—A remote sensing and GIS approach. *Urban forestry & urban greening*, 12(3), 307-314.
- Senanayake, I. P., Welivitiya, W. D. D. P., & Nadeeka, P. M. (2013b). Urban green spaces analysis for development planning in Colombo, Sri Lanka, utilizing THEO's satellite imagery—A remote sensing and GIS approach. *Urban forestry & urban greening*, 12(3), 307-314.
- Shigeta, Y., Ohashi, Y., & Tsukamoto, O. (2009, June). Urban Cool Island in daytime— analysis by using thermal image and air temperature measurements. In *The Seventh International Conference on Urban Climate* (Vol. 29).
- و نظریه فرکتال، مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۱، ۴۹-۳۵.
- Comarazamy, D. E., González, J. E., Luvall, J. C., Rickman, D. L. & Mulero, P. J. (2010). **A land-atmospheric interaction study in the coastal tropical city of San Juan, Puerto Rico.** *Earth Interactions*, 14(16), 1-24.
- Devanathan, P., Devanathan, K., (2011). Heat island effects. In: Sabnis, Gajanan M. (Ed.), *Green Building with Concrete: Sustainable Design and Construction*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 175-226.
- Farina, A. (2011). Exploring the relationship between land surface temperature and vegetation abundance for urban heat island mitigation in Seville, Spain.
- Farina, A. (2012). Exploring the relationship between land surface temperature and vegetation abundance for urban heat island mitigation in Seville, Spain. *LUMA-GIS Thesis*.
- Frey, C. M., Rigo, G., & Parlow, E. Investigation of the daily Urban Cooling Island (UCI) in two coastal cities in an arid environment: Dubai and Abu Dhabi (UAE). *City*, 81, 2-06.
- Gillespie, A. R. (1986). Lithologic mapping of silicate rocks using TIMS.
- 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, 1-10.
- Hung, W. C., Chen, Y. C., & Cheng, K. S. (2010). Comparing landcover patterns in Tokyo, Kyoto, and Taipei using ALOS multispectral images. *Landscape and Urban Planning*, 97(2), 132-145.
- Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R. T., Anderson, M., Imhoff, M. L., Gutman, G. G., & Goldberg, A. (2010). Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. *Journal of Climate*, 23(3), 618-633.

- USGS. (2013). Using the USGS Landsat 8 Product. 2015.
- Weng, Q. (2001). A remote sensing? GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. *International journal of remote sensing*, 22(10), 1999-2014.
- Wu, W. (2014). The generalized difference vegetation index (GDVI) for dryland characterization. *Remote Sensing*, 6(2), 1211-1233.
- Yang, J., Wang, Z. H., & Kaloush, K. E. (2015). Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a 'silver bullet' for mitigating urban heat island?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 830-843.
- Zhang, H., Qi, Z. F., Ye, X. Y., Cai, Y. B., Ma, W. C., & Chen, M. N. (2013). Analysis of land use/land cover change, population shift, and their effects on spatiotemporal patterns of urban heat islands in metropolitan Shanghai, China. *Applied Geography*, 44, 121-133.
- Zipper, S. C., Schatz, J., Singh, A., Kucharik, C. J., Townsend, P. A., & Loheide II, S. P. (2016). Urban heat island impacts on plant phenology: intra-urban variability and response to land cover. *Environmental Research Letters*, 11(5), 054023.
- Skelhorn, C. P., Levermore, G., & Lindley, S. J. (2016). Impacts on cooling energy consumption due to the UHI and vegetation changes in Manchester, UK. *Energy and Buildings*, 122, 150-159.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of environment*, 90(4), 434-440.
- Tan, J., Kalkstein, A., Yuan, D., Zhen, X., Song, G., Li, L., Guo, C., Tang, C., Zheng, C., Li, F., (2010). The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International Journal of Biometeorology* 54 (1), 75-84. <http://dx.doi.org/10.1007/s00484-009-0256-x>.
- Umar, U. M., & Kumar, J. S. (2014). Spatial and Temporal Changes of Urban Heat Island in Kano Metropolis, Nigeria. *International Journal of Research in Engineering Science and Technology*, 1(2).
- United Nations, (2011). Population, Distribution, Urbanization, Internal Migration and Development: An international Perspective. Department of Economic and Social Affairs, Population Division, United Nations.
- US Environmental Protection Agency, (2012). Heat Island Impacts. US Environmental Protection Agency. Available at: <<http://www.epa.gov/hiri/impacts/index.htm>>.