

جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره بیست و پنج، بهار ۱۳۹۷

صص ۱۱۵-۱۲۹

DOI: 10.22067/geo.v7i1.64590

## بررسی جزیره حرارتی در ارتباط با آلودگی هوا در شهر اصفهان

دکتر عباسعلی آروین<sup>۱</sup> - دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۲ تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۸/۲۹

### چکیده

آلودگی هوا یکی از علل ایجاد جزیره حرارتی شهر است که در شهرهای بزرگ از جمله اصفهان به دلیل تراکم بالای جمعیت و به دنبال آن افزایش تعداد روزهای آلوده، رخداد آن در سالهای اخیر رو به افزایش بوده است. در این پژوهش به دلیل فقدان داده‌های دمایی سطح شهر، ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و با بهره‌گیری از روش الگوریتم پنجره مجزای سوپرینو دمای سطح زمین (LST) محاسبه گردید و در ادامه جزیره حرارتی شهر با استفاده از روابط آماری بدست آمد. نتایج نشان داد اختلاف دمای LST با دمای خاک در عمق ۵ سانتی متری در موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی به‌طور متوسط ۴/۱ سلسیوس است و در حداکثر مقدار به ۵/۹ درجه می‌رسد. بررسی دمای هوای تخمین زده شده برای شهر اصفهان نشان داد اختلاف دمای جزیره حرارتی هوای شهری و دمای پیرامونی شهر در زمان رخداد حداکثر آلودگی بیشتر است. نقشه‌های جزیره حرارتی و نقشه‌های توزیع آلودگی بر یکدیگر انطباق داشته و نواحی آلوده‌تر دارای دماهای بالاتری بوده‌اند. همچنین روابط همبستگی بین نقشه توزیع آلودگی و نقشه جزیره حرارتی شهر اصفهان در سطح معناداری تأیید شد و در روزهای با آلودگی بیشتر، ضرایب همبستگی مذکور قوی‌تر هستند.

واژگان کلیدی: جزیره حرارتی، اصفهان، تصاویر ماهواره‌ای، آلودگی هوا، تخمین دما

### ۱- مقدمه

جزیره حرارتی شهر به منطقه‌ای اطلاق می‌گردد که دمای آن ناحیه بیشتر از محیط اطراف باشد؛ به عبارت دیگر دمای هوا در سطح شهر از دمای هوای محیط پیرامون شهر که از دمای یکنوخت و همگنی برخوردار می‌باشد، بیشتر است. از این رو به این جزیره گرمایی قابل تفکیک و تمیز از محیط پیرامون شهر، جزیره حرارتی شهر اطلاق می‌-

گردد. جزیره حرارتی شهر معلول افزایش جمعیت و تراکم آن در مراکز شهری و به دنبال آن افزایش میزان آلودگی هوا است (Peterson & Owen, 2005). برای مثال دمای متوسط شهر مشهد قبل و بعد از سال ۱۳۶۰ بر اثر تشکیل جزیره حرارتی ۱/۶ درجه افزایش داشته است و ارتباط خطی بین لگاریتم جمعیت و دمای هوای شهر مشهد وجود دارد (فرزندی و همکاران، ۱۳۹۳). حدود سه میلیارد نفر در مناطق شهری در جهان به طور مستقیم با مشکل جزیره حرارتی شهر مواجه هستند که به طور قابل توجهی در آینده نزدیک افزایش خواهد یافت. گرمای ساطع شده از سازه‌های شهری مهم‌ترین نقش را در گرمایش شهری به ویژه جزیره حرارتی شهر (UHI) ایفا می‌کند و لازم است راه‌های کاهش جزیره حرارتی شهر را به طور جدی مورد توجه قرار داد (Memon Rizvan et al., 2008). اثر ناحیه متروپلیتن نه تنها گسترش افقی دما بلکه به گسترش عمودی جزیره حرارت شهری نیز منجر می‌گردد. بصورتی که باعث می‌شود ناحیه شهری به ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر و حتی ۵۰۰ بالاتر از شهر گسترش یابد (Sham, 1984) بطوری که ماگزیم دمای جزیره حرارتی شهر کوالالامپور بین ۶ تا ۷ درجه افزایش یافته است (Sham, 1986). مطالعه دیگر بر روی جزیره حرارتی این شهر نشان داد بروز جزیره حرارتی دارای شش علت بافت شهری، طبیعت ساختار شهر و تولید گرمای مصنوعی است. بر این اساس بخشی از دمای افزایش یافته شهر کوالالامپور مربوط به سیستم‌های خنک کننده منازل و ادارات، رفت و آمد اتومبیل‌ها و کارخانجات محدوده شهر است (Elsayed, 2012). معمولاً قسمت‌های عمده جزیره حرارتی شهر مبتنی بر نواحی مرکزی شهر است و شدت جزایره حرارتی در مرکز شهر نانجو از ۳/۲ در سال ۱۹۹۵ تا ۴/۱ در سال ۲۰۰۶ افزایش داشته است (Lio Du et al., 2014). تغییر در کاربری اراضی یکی از علل رخداد جزیره حرارت شهری است. با تغییر کاربری اراضی از سطوح باغی به سطوح شهری میزان دمای شهر افزایش یافته است. با این حال کمترین دما مربوط به مناطق باغی بوده است (موسوی بایگی و همکاران، ۱۳۹۱). در شهر تهران توزیع دمای سطحی آن در دوره زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۰ روند افزایشی داشته و این تغییر و دگرگونی به نفع افزایش مساحت دماهای بسیار گرم و کاهش وسعت دماهای بسیار خنک پیش رفته است. در حالی که از وسعت دماهای متوسط و بسیار خنک به طور قابل توجهی کاسته شده، نواحی بسیار گرم گسترش چشمگیری داشته‌اند (صادقی نیا و همکاران، ۱۳۹۱). با عنایت به قابلیت تصاویر ماهواره‌ای برای برآورد دما در هر نقطه، استفاده از این تصاویر برای تخمین پارامترهای مختلف سطح زمین از جمله دما و منابع زمینی کاربرد زیادی پیدا کرده است. برای مثال مقایسه مدل رقومی ارتفاعی حاصل از نقشه‌های توپوگرافی با مدل رقومی ارتفاعی تصاویر ماهواره‌ای نشان داد مدل‌های رقومی مبتنی بر داده‌های رستری بخصوص برای نقشه‌های با مقیاس بزرگتر از دقت پایین‌تری برخوردار است که ناشی از ضعف الگوریتم‌های رایانه‌ای است. اما همین الگوریتم‌ها در نقشه‌های کوچک مقیاس از دقت مطلوبی برخوردار است (حسین زاده و نداف سنگانی، ۱۳۹۱). کاربرد الگوریتم پرایس برای محاسبه دمای سطح زمین از تصاویر NOAA/AVHRR و الگوریتم کی‌ین برای برآورد دما از تصاویر MODIS نشان داد دمای تخمینی

از تصاویر AVHRR به دمای اندازه‌گیری شدن در عمق ۵ سانتی‌متری زمین نزدیک‌تر است (حجازی زاده و همکاران، ۱۳۹۲). با این حال استفاده از داده‌های ماهواره لندست ۸ به دلیل قدرت تفکیک بالاتر می‌تواند تخمین بهتری از دمای سطح زمین ارائه نماید (جویباری مقدم و همکاران، ۱۳۹۴). کاربرد و مقایسه دو باند حرارتی ۱۰ و ۱۱ تصویر لندست ۸ برای برآورد دمای سطح زمین نشان داد باند ۱۱ از قابلیت بهتری برای برآورد دمای سطح زمین برخوردار است (المدرسی و همکاران، ۱۳۹۳) و استفاده از الگوریتم پنجره مجزا برای تصاویر ماهواره لندست ۸ برآورد بهتری از دمای سطح زمین نشان می‌دهد و می‌توان برای برآورد دما در مناطقی که امکان ایجاد ایستگاه هواشناسی وجود ندارد استفاده نمود (فیضی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵). بررسی و مقایسه اثر سطوح غیر قابل نفوذ شهر و پوشش گیاهی شهری در تعیین شاخص جزیره گرمایی شهری با استفاده از تصاویر ماهواره لندست، نشان می‌دهد که یک رابطه قوی خطی بین دمای سطح زمین (LST) و درصد سطوح غیر قابل نفوذ شهری (آسفالت معابر و پشت‌بام‌ها) برای تمام فصول وجود دارد، در حالی که رابطه بین دمای سطح زمین (LST) و شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی (NDVI) بسیار کمتر است و با فصل تغییر می‌کند (Yan & Bauer, 2007). در این زمینه کاربرد سنجش از دور مادون قرمز با توان تفکیک بالا می‌تواند نقش مهمی برای دست‌یابی به اثرات جزیره حرارتی شهر داشته باشد (Quattrochi & Luvall, 2010). بررسی رفتار حرارتی چشم‌انداز شهری و جزیره حرارتی شهر را با استفاده از مدل‌های رقومی داده‌های حسگرهای راداری نشان داد پیکربندی و چشم‌انداز شهری اثر قابل توجهی بر جزیره حرارت شهر دارد (Goward, 2013). ارتباط بین کاربری اراضی و جزیره حرارتی شهر با استفاده از داده‌های ماهواره-ای لندست ۸ نشان داد که اثرات مخرب‌ترین موج گرما با افزایش جمعیت که دارای وضعیت اجتماعی-اقتصادی پایین‌تری هستند ارتباط دارد. بیشترین تنوع گرمایی سطحی مبتنی بر نواحی متنوع از پوشش گیاهی و نواحی مسکونی است و ارتباط معناداری بین دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی وجود دارد (Alhawiti & Mitsova, 2016). دمای در نواحی مرکزی شهری داغ‌تر از نواحی جنگلی خارج شهری است و اثرات جزیره حرارتی شهری باعث گردیده دمای شهری از ۵/۶ درجه سال ۲۰۰۱ به ۶/۹ درجه تا سال ۲۰۱۴ افزایش پیدا کند (Aslan & Koc-San, 2016).

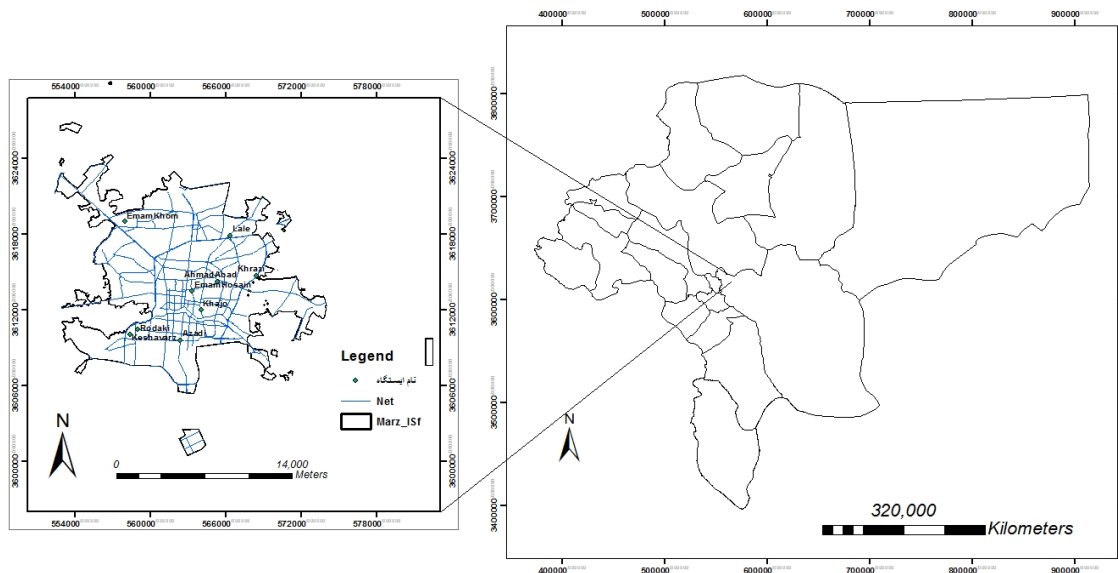
آلودگی‌های مکرر شهر اصفهان در سال‌های اخیر، فرض ارتباط جزیره حرارتی و آلودگی شهری را دامن می‌زند. در این میان افزایش تراکم جمعیت و گسترش عمودی شهر و نیز توسعه سطوح شهری به شکل‌گیری این ایده انجامید که مطالعه جزیره حرارت شهری در ارتباط با آلودگی هوا می‌تواند راه مقابله و کاهش شدت جزیره حرارت شهری را هموار سازد. اگرچه با اقداماتی همچون تغییر در نوع سوخت خودروها و نیروگاه‌ها و نیز اعمال محدودیت‌های ترافیکی تا حدی از شدت آلودگی و جزیره حرارتی شهر کاسته شده ولی تا حد مطلوب راه‌درازی در پیش است. افزایش شدت جزیره حرارتی شهر ناشی از آلودگی هوا، علاوه بر اثر نامطلوب بر سلامتی انسان، می-

تواند به فرسوده شدن آثار ارزشمند تاریخی در این شهر توریستی منجر شود. امید است نتایج این تحقیق بتواند در کاهش اثرات جزیره گرمایی شهر و در نهایت ایجاد یک محیط بهتر زندگی در شهر اصفهان کمک نماید.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعه در این پژوهش شهر اصفهان است که بین عرض جغرافیایی  $32^{\circ} 24' 22''$  تا  $32^{\circ} 48' 18''$  و طول جغرافیایی  $51^{\circ} 27' 22''$  تا  $51^{\circ} 52' 50''$  قرار یافته است (شکل ۱). جمعیت این شهر از ۱/۷۹۶۷۹۶۷ در سال ۱۳۹۰ به ۲/۲۴۹/۲۴۳ در سال ۱۳۹۵ افزایش داشته است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی شهر اصفهان در استان اصفهان

### ۲-۲- استخراج داده‌ها

جزیره حرارتی شهر اصفهان، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ که از قدرت تفکیک مناسبی برخوردار است، صورت گرفت. این ماهواره در ۱۱ باند طیفی تصویر برداری می‌نماید که باندهای ۱ تا ۹ معروف به باندهای OLI<sup>۱</sup> است و در محدوده طیف‌های رنگی و مادون قرمز نزدیک تصویر برداری می‌کند. باندهای ۱۰ و ۱۱ به باندهای حرارتی TIRS<sup>۲</sup> مشهور است و در محدوده طیفی امواج مادون قرمز بلند تصویر برداری می‌کند (زنتسر، ۲۰۱۶). در این

1 Operational Land Imager

2 Thermal Infrared Sensor

تحقیق از باندهای ۴ یا قرمز و ۵ یا مادون قرمز نزدیک استفاده شد. همچنین برای مطالعه جزیره حرارتی شهر اصفهان از باندهای حرارتی ۱۰ و ۱۱ استفاده شده است که مشخصات آن در جدول شماره ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات تصاویر استفاده شده

مسیر/ردیف Path/Row	قدرت تفکیک	طول موج	باند طیفی
۳۷/۱۶۴	۳۰ متر	۰/۶۳۰ - ۰/۶۸۰ نانومتر	باند ۴- قرمز
		۰/۸۴۵ - ۰/۸۸۵ نانومتر	باند ۵ مادون قرمز نزدیک
	۱۰۰ متر	۱۰/۳ - ۱۱/۳ نانومتر	باند ۱۰ مادون قرمز با طول موج بلند
		۱۱/۳ - ۱۲/۳ نانومتر	باند ۱۰ مادون قرمز با طول موج بلند

همچنین از داده‌های مربوط به شاخص کیفیت هوا<sup>۱</sup> (AQI) شهر اصفهان از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ استفاده شد. شاخص کیفیت هوا معیار است که غلظت ترکیبات مختلف آلاینده موجود در هوا نظیر منوکسید کربن، دی اکسید گوگرد، ترکیبات نیتروژن، اوزون و ذرات معلق را که دارای حدود مجاز متفاوت با واحدهای مختلف می‌باشند، تبدیل به یک عدد بدون واحد کرده و وضعیت آلودگی هوا را بصورت کیفی در شش سطح پاک - سالم - ناسالم - بسیار ناسالم - خطرناک و بحرانی نمایش می‌دهد (جدول ۲).

جدول ۲. مقادیر شاخص کیفیت هوا AQI و وضعیت‌های متناظر با آن

AQI	۰-۵۰	۵۱-۱۰۰	۱۰۱-۱۵۰	۱۵۱-۲۰۰	۲۰۱-۳۰۰	بالتر از ۳۰۰
وضعیت	پاک	سالم	ناسالم	بسیار ناسالم	خطرناک	بحرانی

اگرچه تعداد این روزهای آلوده زیاد بود، ولی با توجه به محدودیت گذر ماهواره با پریود ۱۶ روزه از روی شهر اصفهان و محدود بودن تعداد روزهای با شدت آلودگی بالا در اصفهان و عدم انطباق روزهای آلوده با زمان گذر ماهواره، در نهایت تصاویر سه روز با وضعیت هوای بسیار ناسالم (وضعیت قرمز)، و ناسالم (وضعیت نارنجی) و سالم (وضعیت زرد) استفاده شد، لذا از تعداد ۳۰ مجموعه تصویر از ۲۰۱۴/۰۳/۱۱ تا ۲۰۱۵/۱۰/۲۴ تا ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ در مسیر ۱۶۴ و ردیف ۳۷ که شهر اصفهان را پوشش می‌داد سه روز برای تحلیل نهایی انتخاب شد (جدول ۳).

جدول ۳. روزهای با شدت متفاوت آلودگی که زمان عبور ماهواره بوده است

وضعیت آلودگی	شاخص AQI	شمسی	میلادی
قرمز	۱۵۱-۲۰۰	۲ بهمن ۱۳۹۲	۲۲ ژانویه ۲۰۱۴
نارنجی	۱۰۱-۱۵۰	۱۸ بهمن ۱۳۹۲	۷ فوریه ۲۰۱۴
زرد	۱۱۲-۱۴۱	۱ آذر ۱۳۹۳	۲۲ نوامبر ۲۰۱۴

نوع سوم داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، داده‌های مربوط به دمای هوا و دمای خاک در عمق ۵ سانتیمتری خاک در محل ۴ ایستگاه؛ ازون سنجی اصفهان، فرودگاه اصفهان، کبوتر آباد و نجف آباد جهت اعتبارسنجی و کالیبراسیون دمای محاسبه شده و دمای اندازه‌گیری شده در محل ایستگاه است.

### ۳-۲- روش کار

روش‌های مختلفی برای محاسبه دمای سطح زمین از روی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ وجود دارد. در این پژوهش از روش الگوریتم پنجره مجزا سوبرینو برای محاسبه دمای سطح زمین استفاده شد. روش الگوریتم پنجره مجزای سوبرینو<sup>۱</sup> (SWA-S) دمای سطح زمین را بر مبنای پارامترهای باند ۱۰ و ۱۱ لندست ۸ شامل محاسبه محتوای بخار آب اتمسفر، دمای روشنایی و انتشار گرمای سطح زمین محاسبه می‌کند (تسو و همکاران ۲۰۱۷). روش الگوریتم پنجره مجزا با برآورد دمای سطح زمین نزدیک به دمای اندازه‌گیری شده ایستگاه هواشناسی، توانایی و دقت این الگوریتم را نشان می‌دهد (فیضی زاده و همکاران ۱۳۹۵). روش الگوریتم پنجره مجزا سوبرینو بر اساس محاسبه دمای روشنایی باندهای ۱۰ و ۱۱ و محاسبه شاخص پوشش گیاهی از روی باندهای ۴ و ۵ استوار است. در این پژوهش از نرم افزار ENVI برای تصحیحات اتمسفری و از نرم افزار Arc\_GIS10.3 جهت محاسبات دمای سطح زمین و دمای هوای استفاده شد. ترسیم نقشه توزیع آلودگی نیز با روش میانبایی IDW در نرم افزار Arc\_GIS10.3 صورت گرفت.

### ۳- نتایج و بحث

از نظر اقلیمی شهر اصفهان دارای جو نسبتاً آرامی در بیشتر اوقات سال است و دارای توپوگرافی نسبتاً همواری نیز می‌باشد. اگرچه کوه صفه در جنوب غرب شهر اصفهان قرار گرفته، لیکن به دلیل اینکه این کوه یک قله منفرد کم ارتفاع است، فقط می‌تواند در کاهش سرعت بادهای غربی بر روی شهر مؤثر واقع شود. همچنین گسترش عمودی ساختمان‌ها در تمام نقاط شهر موجب کندی سرعت باد به دلیل افزایش اصطکاک شده است و بلند مرتبه‌سازی‌هایی که بخصوص در غرب اصفهان با ارتفاع بیشتر نسبت به سایر نقاط ساخته شده بر کاهش سرعت باد مناسب بر روی شهر تأثیر بیشتری دارد. از دیگر سو افزایش جمعیت و تمرکز بالای آن در داخل شهر، شدت جزیره حرارتی شهر را

1 Sobrino's Split-Window Algorithm

افزایش داده است. وجود این معضل انگیزه کار برای بررسی جزیره حرارتی شهر اصفهان شد. البته بررسی جزیره حرارتی شهری بر اساس داده‌های دمایی اندازه‌گیری شده با دقت بالاتری می‌تواند صورت پذیرد. لیکن به دلیل عدم وجود ایستگاه‌های اندازه‌گیری دما در داخل شهر این امر میسر نبود. البته پیشنهاد می‌شود در محل ایستگاه‌های آلوده-سنجی از دماسنج‌های خودکار استفاده گردد تا بتوان از نتایج آن در تحلیل جزیره حرارتی شهر استفاده کرد. از این رو برای تحلیل جزیره حرارتی شهری به دلیل اهمیت مقیاس مکانی و افزایش دقت در برآورد جزیره حرارتی از آخرین ورژن تصاویر ماهواره‌ای یعنی لندست ۸ استفاده شد. این تصاویر در باند ۱ تا ۷ دارای قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و در باند حرارتی (باندهای ۱۰ و ۱۱) دارای قدرت تفکیک ۱۰۰ متر هستند (Zanter, 2016).

به منظور بررسی جزیره حرارتی شهر اصفهان شرایط دمای سطح و دمای هوا در سه روز منتخب مطالعه گردید. با توجه به محدودیت حجم مقاله از تصاویر هر سه روز برای اعتبار سنجی و از تصاویر روز دوم و ۱۸ بهمن برای ایضاح مطلب و تحلیل استفاده شده است (جدول ۳). بررسی دمای محاسبه شده از تصویر ماهواره‌ای سطح شهر در روز دوم بهمن ۱۳۹۲ بین ۱۷ تا ۳- درجه سلسیوس در نوسان بوده است. بطور کلی دمای بیشتر نقاط بین ۵ تا ۹ درجه در نوسان بوده و خط همدمای ۷ درجه بیشتر نقاط شهر را دور می‌زند. در روز ۱۸ بهمن ۹۲ دمای سطح بین ۸/۹- تا ۱۸/۹ درجه سلسیوس در نوسان بوده است.

از داده‌های چهار ایستگاه هواشناسی جهت اعتبارسنجی مدل برآورد دمای سطح زمین (LST) استفاده شد. مقایسه دمای اندازه‌گیری شده در محل چهار ایستگاه هواشناسی در عمق ۵ سانتی‌متری خاک و LST در محل ایستگاه‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است. بر این اساس اختلاف دمای خاک و LST از حداکثر ۶ در روز ۲ بهمن ۹۲ در ایستگاه فرودگاه تا حداقل ۱/۸ در ایستگاه کبوترآباد در روز یک آذر ۹۳ تغییر می‌کند. متوسط اختلاف LST با دمای سطح خاک در عمق ۵ سانتی‌متری ۳/۷ درجه سلسیوس است. میانگین اختلاف دمای LST با دمای هوا ۵/۲ درجه سلسیوس است و دمای LST در بالاترین میزان خود ۷/۵ درجه سلسیوس در ایستگاه کبوترآباد در روز ۱۸ بهمن ۹۲ بیشتر از دمای هوا است در حداقل مقدار ۰/۶ بیشتر از دمای ایستگاه در روز یک آذر در همین ایستگاه می‌باشد.

با عنایت به اینکه جزیره حرارت شهری مبتنی بر دمای اتمسفر شهری و نه دمای سطح زمین و هیچ ایستگاهی در سطح شهر مبادرت به اندازه‌گیری دما نمی‌کند. لذا بر اساس روابط همبستگی بین LST محاسبه شده از تصاویر ماهواره‌ای و دمای هوای اندازه‌گیری شده در محل چهار ایستگاه هواشناسی؛ آزون سنجی، کبوترآباد، فرودگاه اصفهان و نجف‌آباد در ۳ روز سال (چهار سری تصویر) رابطه ۱ برای محاسبه دمای هوا پیشنهاد می‌گردد. ارتباط بین دمای اندازه‌گیری شده ایستگاه‌ها و LST در محل ایستگاه با ضریب تبیین ۰/۷۱۱ در سطح اطمینان ۹۹ درصد تأیید می‌گردد. لذا با اطمینان قابل قبولی می‌توان دمای هوا را از رابطه ۱۰ برآورد کرد.

$$Ta = -11.5 + 1.61 \times LST \quad \text{رابطه (۱)}$$

محاسبه دمای هوا در سطح شهر اصفهان در روزهای ۲ و ۱۸ بهمن ۹۲ و ۱ آذر ۹۳ در ایستگاه‌های استان نشان داد حداکثر و حداقل اختلاف دمای برآورد شده و دمای اندازه‌گیری شده در محل ایستگاه به ترتیب ۳/۱ در روز یک آذر ۹۳ در ایستگاه کبوتر آباد تا ۰/۴۳ در روز ۲ و ۱۸ بهمن در ایستگاه‌های نجف‌آباد و فرودگاه متغیر است که نتایج آن در جدول ۶ نشان داده شده است.

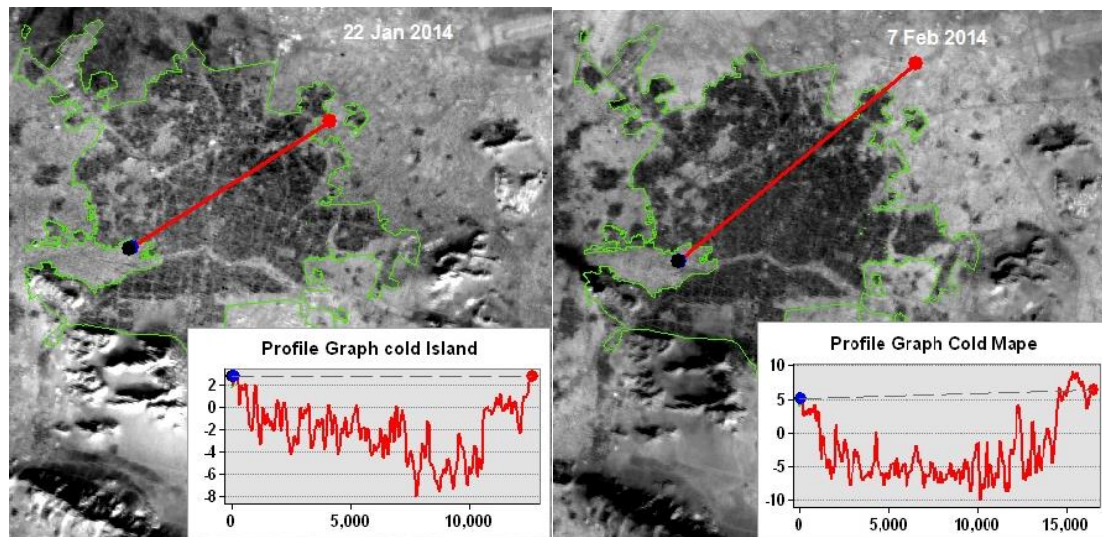
جدول ۶. مقایسه دمای هوا و دمای خاک ایستگاه‌ها با دمای برآورد شده سطح زمین (LST) و دمای هوای برآورد شده در محل ایستگاه‌ها و اختلاف LST با دمای خاک و دمای ایستگاه در سه روز منتخب

Ta	ΔSoil,LST	ΔST,LST	LST	Soil	Staion_T		
۰/۸۸	۵/۳	۶/۲	۷/۸	۲/۵	۱/۶	اصفهان	دوم بهمن ۱۳۹۲
۱	۶	۶/۴	۸	۲	۱/۶	فرودگاه	
-۱/۱	۵/۹	۵/۸	۷	۱/۱	۱/۲	کبوترآباد	
۱/۶۳	۳/۶	۷/۱	۸/۳	۴/۷	۱/۲	نجف‌آباد	
۰/۱۶	۳/۱	۷/۴	۵/۶	۲/۴۵	-۱/۸	اصفهان	هجدهم بهمن ۱۳۹۲
-۲/۵۷	۳/۲	۷/۳	۴/۳	۱/۱	-۳	فرودگاه	
-۲/۱۵	۵/۷	۷/۵	۴/۵	-۱/۲	-۳	کبوترآباد	
۰/۱۶	۲/۶	۶/۷	۴/۷	۲/۱	-۲	نجف‌آباد	
۱۳/۳۹	۱/۲	۳	۱۴	۱۱/۹	۱۱	اصفهان	یک آذر ۱۳۹۳
۷/۳	۲/۲	-۲	۱۱	۸/۸	۱۳	فرودگاه	
۷/۳	۱/۸	۰/۶	۱۱	۹/۲	۱۰/۴	کبوترآباد	
۱۱/۳	۳/۳	۲/۳	۱۲/۹	۹/۶	۹/۶	نجف‌آباد	

ترسیم نقشه دمایی شهر بر اساس رابطه ۱ بیش از آنکه جزیره حرارتی شهر را به نمایش بگذارد، جزیره سرمایی شهر را نشان می‌دهد که البته منطقی نیز به نظر می‌رسد. زیرا اساس کار محاسبه دمای سطح زمین بوده است و با عنایت به اینکه سطوح لخت و سفید رنگ شفاف شهری، دمایی کمتر از محیط اطراف خواهند داشت لذا جزیره سرمایی شهر نمود پیدا می‌کند. ترسیم نیمرخ دمایی شهر در شکل ۲ همین موضوع را نشان می‌دهد. برای مثال در روز ۷ فوریه در حالی که دما در بیشتر گستره شهر به ۶- درجه سلسیوس می‌رسد. در ناحیه پیرامونی دمای ۵+ درجه سلسیوس مشاهده می‌شود. یعنی دمای سطح شهر ۱۱ درجه سردتر از محیط پیرامونی است. یادآور می‌شود در روز ۷



فوریه دما در هر چهار ایستگاه منفی و حداقل ۳- درجه سلسیوس اندازه گیری شده است (جدول ۶). همچنین در روز ۲۲ ژانویه در بیشتر محدوده شهر دما ۴- درجه سلسیوس بوده، در ناحیه پیرامونی ۱/۲+ درجه سلسیوس افزایش یافته و دمای داخل شهر ۵/۲ درجه سردتر از محیط پیرامون شهر است (شکل ۲).



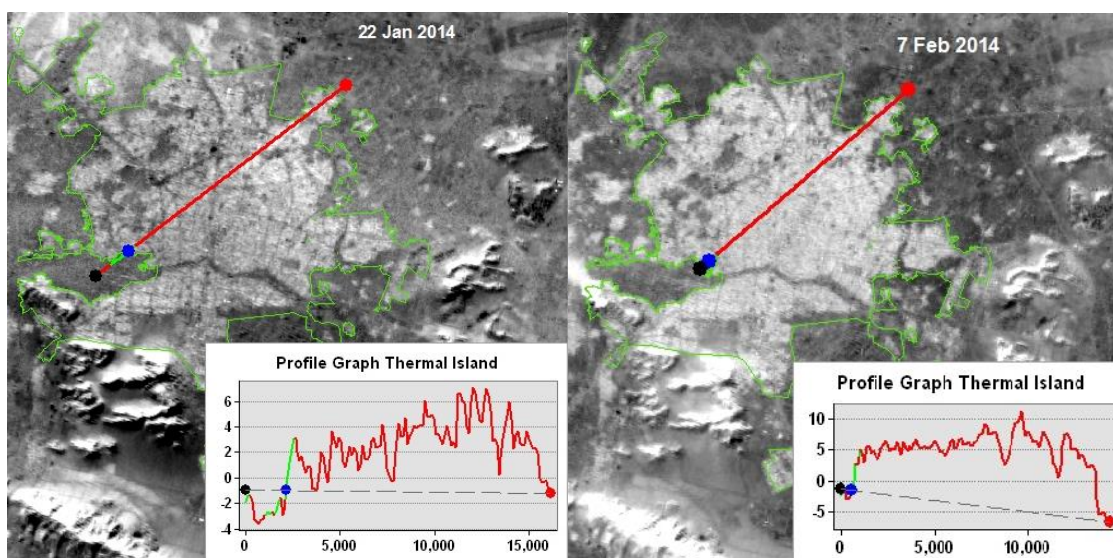
شکل ۲. نیمرخ توپوگرافی جزیره سرمای شهر در روز ۲۲ ژانویه ۲۰۱۴ (۲ بهمن ۹۲) و ۷ فوریه ۲۰۱۴ (۱۸ بهمن ۲۰۱۴)

با این حال واضح است که جزیره حرارتی شهر معلول آلودگی هوای شهری و تمرکز جمعیت است و دمای آن بیش از ناحیه پیرامون شهر است و در بسیاری تحقیقات این موضوع نشان داده شده است (جاجرمی، ۱۳۹۱). لذا برای ارتباط یابی شدت آلودگی و جزیره حرارتی شهر و ترسیم موقعیت جزیره حرارتی شهر از معکوس رابطه ۱۰ یعنی رابطه ۲ استفاده شد. البته بررسی آماری نیز نشان داد شدت آلودگی هوا با جزیره سرمای شهر رابطه معکوس دارد.

$$Ta = 11.5 - 1.61 \times LST \quad \text{رابطه (۲)}$$

محاسبه جزیره حرارت شهر با استفاده از رابطه ۲ بخوبی جزیره حرارت شهر را نشان می دهد. بررسی نیمرخ دمایی در شکل شماره ۳ برآمدگی جزیره حرارت شهری را در امتداد نیمرخ خط به نمایش می گذارد. بررسی دمای سطح شهر و پیرامون آن برای مثال در روز ۲۲ ژانویه نشان می دهد دما در بیشتر محدوده داخل شهر به ۵/۵+ درجه سلسیوس و در خارج از شهر به ۱/۸- درجه سلسیوس می رسد یعنی دما در حداکثر اختلاف دما، ۷/۳ درجه سلسیوس گرمتر از محیط پیرامون شهر است که بخوبی بیانگر جزیره حرارت شهری است. در روز ۷ فوریه در حالی

که دما بیشتر گستره شهر به  $+4$  درجه می‌رسد، در خارج از شهر به  $-0.5$  کاهش پیدا می‌کند و عمدتاً دما در جزیره حراتی شهر حدود  $9/5$  درجه سلسیوس گرمتر از محیط پیرامون خود است.



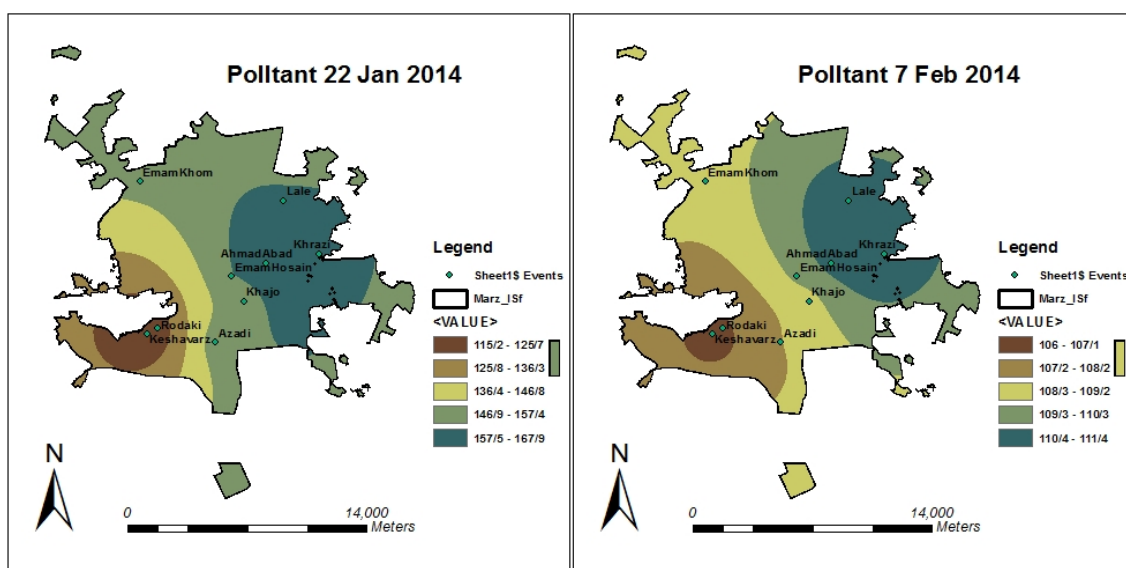
شکل ۳. نیمرخ توپوگرافی جزیره حراتی شهر در روز ۲۲ ژانویه ۲۰۱۴ (۲ بهمن ۹۲) و ۷ فوریه ۲۰۱۴ (۱۸ بهمن ۲۰۱۴)

میانگین شاخص کیفیت هوا AQI در روز عبور ماهواره (۲ بهمن) در ایستگاه‌های شهر اصفهان برابر با ۱۵۲ بوده است و در شرایط بسیار ناسالم یا وضعیت قرمز قرار دارد. بر اساس جدول ۷ کلیه ایستگاه‌ها بجز بلوار کشاورز در روز ۲ بهمن در وضعیت قرمز و بوده‌اند. بالاترین میزان آلودگی در ایستگاه‌های مستقر در شرق اصفهان، میدان احمد آباد و بزرگراه خرازی بوده است. متوسط شاخص کیفیت هوا AQI در روز ۱۸ بهمن برابر با ۱۰۹ یا وضعیت نارنجی بوده است و ایستگاه‌های چهارباغ خواجه و بلوار کشاورز دارای وضعیت زرد یا هوای سالم بوده‌اند.

جدول ۷. شاخص آلودگی ایستگاه‌های شهر اصفهان دوم و هجدهم بهمن ماه ۹۲

میدان امام حسین	میدان لاله	بلوار کشاورز	امام خمینی	بزرگراه خرازی	چهارباغ خواجه	میدان آزادی	میدان احمد آباد	
۱۵۷	۱۵۹	۱۱۵	۱۵۰	۱۶۸	۱۵۱	۱۵۳	۱۶۵	۲ بهمن
۱۱۶	۱۱۷	۸۷	۱۰۶	۱۲۲	۹۴	۱۱۲	۱۱۸	۱۸ بهمن

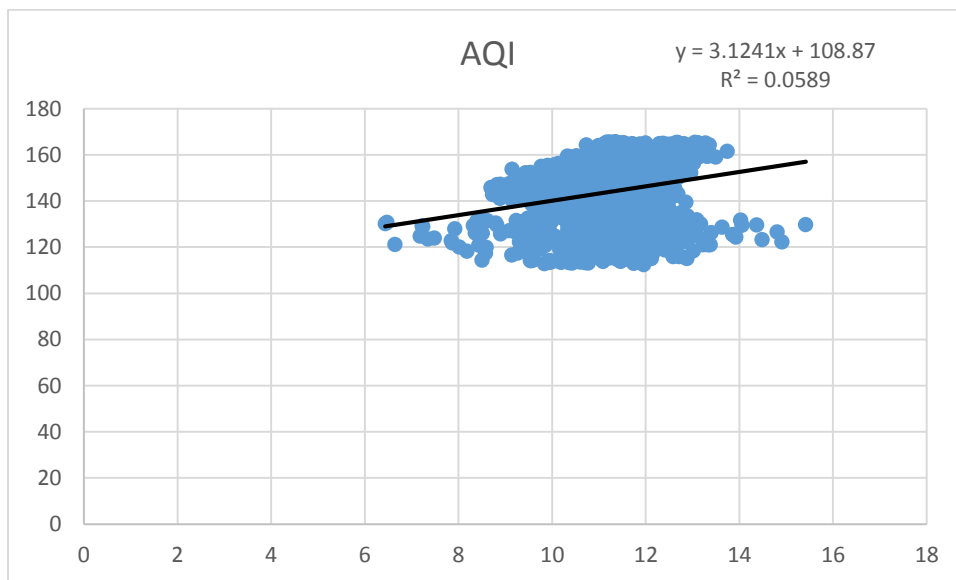
بررسی نقشه توزیع آلودگی در شکل ۴ اثر آلودگی بر افزایش دمای هوای شهری را تأیید می‌کند. بطوری که بیشترین آلودگی متمرکز یافته در شرق و شمال شرق اصفهان منطبق با مناطق با دمای هوای بیشتر است. در این روز هوای اصفهان در بیشتر ایستگاه‌ها توأم با شرایط نارجی یا وضعیت خطرناک برای گروه‌های حساس است (جدول ۷). انطباق نقشه دمای هوای روز ۲ بهمن (شکل ۳) با نقشه آلودگی همان روز (شکل ۴)، اثر شدت بیشتر آلودگی هوا بر دمای هوا در روز ۲ بهمن است که با رنگ آبی تیره نشان داده شده است.



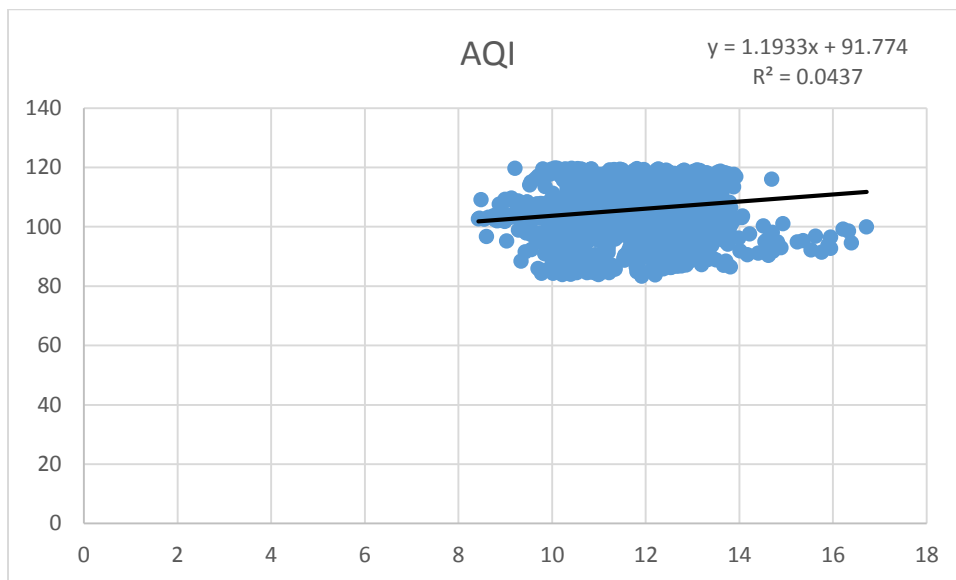
شکل ۴. نقشه توزیع شاخص آلودگی شهر اصفهان در روزهای ۲۲ ژانویه و ۷ فوریه ۲۰۱۴

شرایط دمایی محیط شهری از آلودگی تأثیر می‌پذیرد و روابط همبستگی بین نقشه دمای هوای محاسبه شده از رابطه ۱۱ و نقشه توزیع شاخص کیفیت هوا شهر اصفهان در روز ۲ بهمن ۱۳۹۲ با ضریب همبستگی  $0.242793$  در سطح اطمینان ۹۹ درصد تأیید شد. در این روز شاخص کیفیت هوای AQI بین ۱۱۷ تا ۱۶۹ (وضعیت قرمز) در دمای هوای حدود بین  $8/5$  تا  $13/7$  درجه سلسیوس رخ داده است. شکل ۵ نمودار همبستگی بین نقشه توزیع آلودگی و نقشه دمایی شهر اصفهان را نشان می‌دهد. همچنین بررسی روابط همبستگی بین نقشه دمای هوا و نقشه توزیع شاخص کیفیت هوا شهر اصفهان در روز ۱۸ بهمن ۹۲ با وضعیت نارجی نشان داد ارتباط همبستگی این دو با ضریب همبستگی  $0.209082$  در سطح اطمینان ۹۹ درصد تأیید می‌گردد. بر این اساس در روز ۱۸ بهمن با وضعیت نارجی از نظر شدت آلودگی، شاخص AQI بین ۸۵ تا ۱۲۲ در دمای هوای بین  $8/5$  تا  $14$  درجه سلسیوس رخ داده است (شکل ۵). قوی‌تر بودن روابط همبستگی بین شاخص کیفیت هوا و دمای هوا در شکل در روز ۲ بهمن در

مقایسه با ضریب همبستگی در روز ۱۸ بهمن حاکی از اثر بیشتر آلودگی هوا بر افزایش شدت جزیره حرارت شهری است.



شکل ۵. نمودار همبستگی بین نقشه دمای هوا شهر و نقشه شاخص کیفیت هوا در روز ۲ بهمن ۹۲



شکل ۶. نمودار همبستگی بین نقشه دمای هوای شهر و نقشه شاخص کیفیت هوا در روز ۱۸ بهمن ۹۲

## ۴- جمع‌بندی

شهر اصفهان به دلیل شرایط پایدار اقلیمی در بیشتر اوقات سال و انتشار آلودگی، از جمله شهرهای با هوای آلوده ایران محسوب می‌گردد که شکل‌گیری جزیره حرارت شهری در آن غیر قابل اجتناب است. در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ که از قدرت تفکیک بالایی برخوردارند برای برآورد دمای سطح زمین استفاده شد و دمای محاسبه شده توسط مدل با دمای خاک در محل ایستگاه‌های هواشناسی با هم مقایسه شد. اختلاف اندک دمای خاک در عمق ۵ سانتیمتری زمین و دمای برآورد شده سطح زمین LST از طریق تصاویر ماهواره‌ای که بین حداکثر ۶ تا حداقل ۱/۸ تغییر می‌کند نشان داد روش پنجره مجزای سوپرینو، روشی مناسب برای برآورد دمای سطح زمین است. متوسط اختلاف LST با دمای سطح خاک در عمق ۵ سانتی متری ۳/۷ درجه سلسیوس است. در نهایت جزیره حرارتی شهر بر اساس روابط آماری بین دمای محاسبه شده سطح زمین (LST) و دمای هوا در محل ایستگاه‌ها بدست آمد. تحلیل نیمرخ توپوگرافی دمای جزیره حرارتی، برآمدگی جزیره حرارتی در محل شهر نسبت به ناحیه پیرامونی نشان می‌دهد. برای مثال در روز ۲۲ ژانویه ۲۰۱۴ و ۷ فوریه ۲۰۱۴ دما در بیشتر محدوده داخل شهر به ترتیب ۵/۵+ و ۴+ درجه سلسیوس و در خارج از شهر به ۱/۸- و ۵/۵- درجه سلسیوس می‌رسد. به این ترتیب دما داخل شهر به ترتیب ۷/۳ و ۹/۵ درجه سلسیوس گرم‌تر از محیط پیرامون شهر است که بخوبی بیانگر جزیره حرارت شهری است. اختلاف دمای جزیره حرارت هوای شهری و دمای پیرامونی شهر در زمان رخداد حداکثر آلودگی بیشتر است. مقایسه نقشه‌های دمایی شهر اصفهان و نقشه‌های توزیع آلودگی، انطباق حداکثرهای دما بر نواحی آلوده-تر را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی بین نقشه توزیع آلودگی و نقشه دمای شهری مثبت و معنادار است و در روزهای با آلودگی بیشتر، ارتباط خطی بین افزایش آلودگی و افزایش دمای هوای شهری قوی‌تر است. به این ترتیب با افزایش آلودگی هوا بر شدت جزیره حرارتی شهر افزوده می‌گردد. بررسی توزیع آلودگی هوا در شهر اصفهان نشان داد، نواحی شرقی شهر اصفهان از میزان آلودگی بیشتری برخوردار است. این نکته متأثر از توپوگرافی شهری است. زیرا مناطق جنوبی و غربی اصفهان به دلیل وجود کوه صفا مرتفع‌تر است و آلودگی نیز به دلیل وزن جرمی در مناطق پست‌تر شمالی و شرقی اصفهان میل به فرونشینی دارد. از دیگر سو با عنایت به جریان آرام باد غالب که غربی است، شدت آلودگی در مناطق شرقی تمرکز می‌یابد. انطباق نقشه‌ی دمایی جزیره حرارتی شهر اصفهان با نقشه توزیع آلودگی اثر آلودگی بر افزایش دمای هوای شهری را تأیید می‌کند. بطوری که بیشترین آلودگی متمرکز یافته در شرق و شمال شرق اصفهان منطبق با مناطق با دمای هوای بیشتر است. حداکثر دمای مشاهده شده به حداکثر ۱۳/۸ درجه می‌رسد و در حاشیه اصفهان دمای هوا به ۱۰/۶ درجه می‌رسد

## تشکر و قدردانی

از رئیس اداره آزمایشگاه‌های حفاظت محیط زیست اصفهان جناب آقای مهندس بابک صادقیان به خاطر همکاری در زمینه در اختیار قرار دادن داده‌ها و آمار مورد نیاز تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

## منابع

امینی‌بازبانی، سمیرا؛ زارع‌ایبانه، حمید؛ اکبری، مهدی؛ ۱۳۹۳. برآورد دما و شاخص پوشش گیاهی سطح زمین با استفاده از داده‌های سنجنش از دور (مطالعه موردی: استان همدان). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال ۴۶ شماره ۳، ۳۳۳-۳۴۸.

جاجرمی، کاظم؛ ۱۳۹۱. اقلیم و شهر، تألیف ژیزل اسکورو. اندیشه‌های گوهربار. تهران. جویباری‌مقدم، یاسر؛ آخوندزاده، مهدی؛ سراجیان، محمدرضا؛ ۱۳۹۴. ارائه یک الگوریتم پنجره مجزا نوین به منظور تخمین دمای سطح زمین از داده‌های ماهواره لندست ۸. نشریه علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره پنجم شماره ۱، ۲۱۵-۲۲۶.

حجازی‌زاده، زهرا؛ ضیائیان، پرویز؛ شیرخانی‌ریا، علیرضا؛ ۱۳۹۲. مقایسه تخمین دمای سطح با استفاده از داده‌های باند حرارتی سنجنده‌های ماهواره‌ای در غرب استان تهران قزوین. فصلنامه جغرافیا (انجمن جغرافیای ایران)، سال یازدهم شماره ۳۸، ۳۳-۴۹.

حسین‌زاده، سیدرضا؛ نداف‌سنگانی، مهوش؛ ۱۳۹۱. ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) حاصل از نقشه‌های توپوگرافی و مقایسه‌ی تطبیقی آن با DEM های ماهواره‌ای (مطالعه‌ی موردی DEM های توپوگرافی و ASTER منطقه‌ی آبه در خراسان رضوی). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال ۴۵ شماره ۱، ۷۱-۸۶. صادقی‌نیا، علیرضا؛ علیجانی، بهلول؛ ضیائیان، پرویز؛ ۱۳۹۱. تحلیل فضایی- زمانی جزیره حرارتی کلان شهر تهران با استفاده از سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره چهارم، ۱۷-۱. فرزندی، محبوبه؛ رضائی‌پژند، حجت؛ سیدنزادگلختمی، نفیسه؛ ۱۳۹۳. تعیین نقطه‌ی شکست دمای سالانه با الگوی وابستگی سیستم خاکستری برای تحلیل جزیره حرارتی مشهد. مجله مخاطرات محیطی، سال سوم شماره چهارم، ۴۹-۵۹.

فیضی‌زاده، بختیار؛ دیده‌بان، خلیل؛ غلام‌نیا، خلیل؛ ۱۳۹۵. برآورد دمای سطح زمین و الگوریتم پنجره مجزا با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ مطالعه موردی: حوضه آبریز مهاباد. فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره ۲۵ شماره ۹۸، ۱۷۱-۱۸۱.

المدرسی، سیدعلی؛ رحیم‌آبادی، ابوالفضل؛ خضری، صادق؛ ۱۳۹۳. پهنه‌بندی و مقایسه دمای سطح زمین با استفاده از دو باند حرارتی ۱۰ و ۱۱ تصویر لندست ۸ (مطالعه موردی شهرستان بهشهر). نخستین همایش کاربرد مدل‌های پیشرفته تحلیل فضایی (سنجنش از دور و GIS در آمایش سرزمین). دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد.



موسوی بایگی، محمد؛ اشرف، بتول؛ فرید، حسین؛ علیرضامیان آبادی، آمنه؛ ۱۳۹۱. بررسی جزیره حرارتی شهر مشهد با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و نظریه فرکتال. مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره اول، ۴۹-۳۵.

- Alhawiti RH, Mitsova D., 2016. Using Landsat-8 Data to Explore The Correlation Between Urban Heat Island and Urban Land Uses. *IJRET. International Journal of Research in Engineering and Technology* 5 (3): 457-466.
- Aslan N, Koc-San D., 2016. Analysis of Relationship Between Urban Heat Island Effect and Land USE/COVER Type Using Landsat 7 ETM+ and Landsat 8 OLI Image. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Congress, 12-19 July, Prague, Czech Republic, XLI-B8*, 821-288.
- Elsayed ISM., 2012. Mitigation of the Urban Heat Island of the City of Kuala Lumpur, Malaysia. *Middle-East Journal of Scientific Research* 11 (11): 1602-1613.
- Karenia CSG., 2015. Spatial Geo-technologies and GIS tools for urban planners applied to the analysis of urban heat island. Case Caracas city, Venezuela, ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment, 1-5.
- Lio Du T, Zhou MSLI, Gong DY., 2014. Urban heat island effects derived from dense Landsat thermal observations in Nanjing, China, 35th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE35)
- Lo CP, Quattrochi DA, Luvall JC., 2010. Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing* 18(2).
- Memon RA, Leung YCD, Chunho LIU., 2008. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences* 20(1).
- Qihao W, Dengsheng L, Jacquelyn S., 2004. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment* 89: 467-483.
- Samuel NG., 2013. THERMAL BEHAVIOR OF URBAN LANDSCAPES AND THE URBAN HEAT ISLAND. *Physical Geography*, 2(1), 19-33.
- Sham S., 1986. Application of Climatology to Urban Planning and Building Design in Malaysia. *Sumber* 2: 63-79.
- Thomas CP, Timothy WO., 2005. Urban Heat Island Assessment. *Journal of climate* 81: 2637-2646.
- Tsou J. Zhuang, J., Yu Li & Zhang, Y., 2017. Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong. *Urban Science* 1(10): 1-22.
- Yuan F, Marvin EB., 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: 375-386.
- Zanter K., 2016. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. USGS Science for Changing World, EROS, Sioux Falls, South Dakota.