



نسخه از دور

GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال یازدهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۸
Vol.11, No. 1, Spring 2019

۹۵-۱۱۴



پایش جزایر حرارتی شهری با رویکرد تکاملی فرکتال ویژه (FNEA) (مطالعه موردی: کلان‌شهر تهران)

محمود احمدی^{۱*}، عباسعلی داداشی رودباری^۲، ندا اسفندیاری^۳

۱. دانشیار آب‌وهواشناسی، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، تهران، ایران.
۲. دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی شهری، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، تهران، ایران.
۳. دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی همدید، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، تهران، ایران.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۹/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۱۷

چکیده

جزیره حرارتی، نتیجه آب و هوای شهری و یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی در قرن بیست و یکم است. هدف از این پژوهش، ارزیابی توانمندی عوارض بیوفیزیکی و دمای سطح زمین با رویکرد تکاملی فرکتال ویژه (FNEA)، به منظور استخراج جزیره حرارتی شهری در تهران است. نخست، با استفاده از تصاویر سنجنده TIRS ماهواره لندست ۸، در ماه اوت سالهای ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ مقادیر دمای سطح زمین (LST) محاسبه و جزایر حرارتی شهری با اتخاذ رویکرد تکاملی فرکتال ویژه (FNEA) استخراج شد. همچنین به منظور ارزیابی نقش عوامل بیوفیزیکی در شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری، شاخص‌های BI، MNDWI، NDBI، NDVI، SAVI و UI محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد بین پوشش گیاهی و جزایر حرارتی شهری، همبستگی خطی منفی وجود دارد. همچنین یک رابطه مثبت قوی، بین سطح غیر قابل نفوذ با جزایر حرارتی شهری در کلان‌شهر تهران به دست آمد. جزایر حرارتی کلان‌شهر تهران با رویکرد FNEA به ۵ دسته جزایر حرارتی سرد، سرد درجه دوم، مناطق حرارتی متوسط، جزایر حرارتی گرم درجه دوم و جزایر حرارتی گرم دسته‌بندی شدند که به طور متوسط جزایر حرارتی گرم، ۹۵ کیلومتر مربع و جزایر حرارتی سرد ۷۳ کیلومتر مربع از کل مساحت کلان‌شهر تهران را به خود اختصاص داده‌اند. مهم‌ترین کانون‌های حرارتی شناسایی شده نیز به ترتیب در ۱- منطقه ۲۱ به جهت تمرکز شدید اکثر کارخانه‌ها، کارگاه‌های صنعتی و انبارها؛ ۲- منطقه ۹ به دلیل قرارگیری فرودگاه مهرآباد، پایانه‌های حمل‌ونقل مسافری و گذرگاه اصلی دسترسی؛ ۳- منطقه ۲۲ و شمال منطقه ۱۹ به جهت تمرکز زمین‌های لم‌بزرع و ۴- منطقه ۱۳ (زمین‌های بدون پوشش اطراف فرودگاه سابق دوشان تپه) و مناطق جنوبی تهران (به دلیل وجود کارگاه‌های آموزشی و صنعتی) قرار گرفته‌اند.

کلیدواژه‌ها: جزایر حرارتی شهری، شاخص‌های بیوفیزیکی، رویکرد FNEA، کلان‌شهر تهران

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، اوین، میدان شهید شهریار، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، گروه جغرافیای طبیعی، تلفن: ۰۲۱۲۹۹۰۲۶۸۲

Email: Ma_ahmadi@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

شهرنشینی به عنوان یک فرآیند ویژه اجتماعی، پویایی جمعیتی و اقتصادی را در جامعه به همراه دارد، اما فارغ از این امتیاز ویژه، شهرنشینی باعث دگرگونی محیط زیست در مقیاس محلی و همچنین جهانی می شود (هوانگ و همکاران^۱، ۲۰۱۰). با توجه به رشد سریع جمعیت و مهاجرت به شهرها، شهرنشینی نرخ بی سابقه ای را تجربه کرده است و انتظار می رود این روند در دهه های آتی نیز همچنان ادامه داشته باشد (آسیاکور و همکاران^۲، ۲۰۱۲). به طوریکه مطابق با گزارش اتحادیه بین المللی نقشه برداران^۳ (۲۰۱۰)، ۷۰ درصد رشد شهری در کشورهای در حال توسعه، برنامه ریزی نمی شود. ادامه روند پرشتاب شهرنشینی، باعث دگرگونی مشخصه های فیزیکی سطح زمین از جمله رطوبت خاک، ظرفیت گرمایی و هدایت انرژی می شود (چادنووسکی^۴ و همکاران، ۲۰۰۴). جزیره حرارتی شهری (UHI)^۵ نخستین بار توسط مانلی^۶ (۱۹۵۸) مورد استفاده قرار گرفت. علت این نامگذاری از آن جهت است که الگوی پهنه های دمایی شکل گرفته با استفاده از خطوط هم دما به شکل جزایر ظاهر می شوند. این پدیده، در حقیقت از افزایش دما در مناطق شهری نسبت به مناطق اطراف حکایت دارد (ووجت و اوکی^۷، ۲۰۰۳). پیش بینی های آب و هوایی بلندمدت نشان می دهد که در طی ۳۰ تا ۴۰ سال آینده، افزایش دما با شدت بیشتری ادامه خواهد داشت (بولر و همکاران^۸، ۲۰۱۰) لذا بایسته است برای کاهش روند فعلی درجه حرارت از توسعه استراتژی های انطباق استفاده شود.

جزایر حرارتی شهری می توانند به عنوان یک تله، برای آلاینده های جوی عمل کنند که در نتیجه آن، به افزایش تشکیل مه دود شهری کمک خواهند کرد (الگام و اکانتی^۹، ۲۰۱۲). همچنین از اثرات سوء دیگر جزایر حرارتی شهری می توان به تنش حرارتی (ژو و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۰)، آزون تروپوسفری (کوپر و همکاران^{۱۲}، ۲۰۱۴)، مشکلات بهداشتی (چون و گولدمن^{۱۳}، ۲۰۱۴) و تبعات منفی اجتماعی و اقتصادی

بی شماری بر زندگی شهرنشینان (گوباکیس و همکاران^{۱۴}، ۲۰۱۱) اشاره کرد.

جزایر حرارتی شهری سه مشخصه بنیادین دارند: ۱- شکل و پیکربندی، ۲- شدت ۳- هسته اصلی. با توجه به وقوع زمانی (روز، ماه، فصل و سال)، چگونگی شرایط آب و هوایی، موقعیت عوارضی همچون تپه ها، آب و فضای سبز، ویژگی حرارتی و شکل مواد موجود در منطقه شهری، این سه مشخصه رفتار متفاوتی را نشان خواهند داد (دلوسینا و همکاران^{۱۵}، ۲۰۱۳). تغییرات روزانه و فصلی دما دو عامل مهم دیگری هستند که شناسایی مناسب آن ها می تواند کمک شایان توجهی به مقابله با این پدیده کند. به طور مثال، در مقیاس روزانه، ساعات روز برای ظهور جزایر حرارتی شهری بسیار مناسباند (سان و همکاران^{۱۶}، ۲۰۰۹) در صورتی که در مقیاس فصلی این پدیده بسته به سامانه های جوی می تواند به ایفای نقش گوناگونی بپردازد، به طوریکه یک موج گرم یا شرایط جوی خشک، شدت جزایر حرارتی شهری را افزایش و در مقابل شرایط مرطوب تر می توانند از شدت جزایر حرارتی بکاهند (رات^{۱۷}، ۲۰۰۷).

رشد و توسعه جزایر حرارتی شهری در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بخش قابل توجهی از این پژوهش ها، تفاوت دمای سطحی با پوشش گیاهی و سطوح غیرقابل نفوذ که از یکسو احتمالاً به دلیل خواص حرارتی لایه زیرین (خاک مرطوب یا خشک) بوده و از سوی دیگر به دلیل تنوع پارامترهای ذکر شده پتانسیل تعیین ویژگی های دمای سطحی را منعکس می کنند؛ تکیه داشته اند (فریدل^{۱۸}، ۲۰۰۲؛

- | | |
|----------------------------|----------------------|
| 1. Huang et al. | 2. As-Syakur et al. |
| 3. FIG | 4. Chudnovsky |
| 5. Urban Heat Island (UHI) | 6. Manley |
| 7. Voogt & Oke | 8. Bowler et al. |
| 9. Alghannam & Al-Qahtnai | 10. Zhou et al. |
| 11. Cooper et al. | 12. Chun & Guldman |
| 13. Gobakis et al. | 14. De Lucena et al. |
| 15. Sun et al. | 16. Roth |
| 17. Roth | 18. Freidel |

همکاران، ۲۰۱۶؛ بوکائی و همکاران، ۲۰۱۶) در ارزیابی جزایر حرارتی شهر تهران به نتیجه رسیدند که نقش پوشش گیاهی در تعدیل جزایر حرارتی شهری و سطوح نفوذناپذیر در تشدید این پدیده بسیار موثر است. این نتیجه توسط مهدیان ماهفروزی و همکاران (۱۳۹۴) در بوستان ولایت تهران و احمدی و همکاران (۱۳۹۴) در شهر اردبیل نیز مورد تأیید قرار گرفته است. مطالعه جزایر حرارتی شهری در کلانشهرهای مهم دیگر ایران همچون مشهد (احمدی و داداشی رودباری، ۱۳۹۵) و اصفهان (احمدی و داداشی رودباری، ۱۳۹۶) نیز نشان داده است که رشد بی‌رویه مناطق ساخته‌شده شهری و از بین رفتن پوشش گیاهی، باعث تشدید جزایر حرارتی شهری می‌شود. در پژوهش انجام‌شده در شهر مشهد (احمدی و داداشی رودباری، ۱۳۹۵) آثار ترکیبات بیوفیزیکی در شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری با استفاده از لندست ۸ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد سه نوع جزیره حرارتی شهری پیرامونی، کانونی و خطی را برای شهر مشهد وجود دارد. پژوهشی که در شهر اصفهان (احمدی و داداشی رودباری، ۱۳۹۶) با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و بکارگیری شاخص قیاسی وضع بحرانی زیست‌محیطی (ECI) انجام شده است، بیشترین حساسیت زیست‌محیطی را در مناطق جنوبی شهر (منطقه ۶ شهری) و کمترین حساسیت زیست‌محیطی نیز در مرکز شهر (مناطق ۱ تا ۳ شهری) شناسایی کردند.

جمع‌بندی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که پژوهش‌های جزایر حرارتی شهری در کشور و به‌ویژه کلان‌شهر تهران، به‌عنوان مهم‌ترین و بزرگ‌ترین کلانشهر ایران نتوانسته است هماهنگ با مرز دانش پژوهش‌های جزایر حرارتی شهری گام بردارد. لذا این پژوهش، افزون بر آنکه به ارزیابی همزمان عوارض بیوفیزیکی با دمای سطح زمین می‌پردازد، برای نخستین بار با رویکرد تکاملی فرکتال ویژه (FNEA) در ایران جزایر حرارتی شهری را شناسایی و دسته‌بندی نموده است.

ونگ و همکاران، ۲۰۰۴ و رابرت و همکاران^۱، ۲۰۱۲) مورد تأیید قرار گرفته است. الگام و اکانتی (۲۰۱۲) در ارزیابی تفاوت دمای هوای بین مناطق شهری و روستایی واحه آل‌حسا در شرق عربستان سعودی، با اثبات وجود یک جزیره حرارتی شهری به این نتیجه رسیدند که پوشش گیاهی نقش موثری را در کاهش شدت جزایر حرارتی دارد. نقش آب‌وهوای شهری، در بروز جزایر حرارتی منطقه شهری ریودوژانیرو پژوهشی است که دلوسینا و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat5-TM برای زمستان سال‌های ۱۹۸۰، ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰ بدان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که هسته‌های گرم در مناطق مرکزی شهری و برخی از مناطق فاقد پوشش سطح در حومه شهری رخ داده‌اند و مناطقی با دمای پایین تحت تأثیر پوشش گیاهی قرار دارند. شنگ و همکاران^۲ (۲۰۱۷) به مقایسه شدت جزایر حرارتی شهری با استفاده از دمای هوا و سطح زمین برآورد شده با ماهواره لندست در Hangzhou چین به این نتیجه رسیدند که شدت UHI می‌تواند متاثر از عوامل بیوفیزیکی سطح زمین و شرایط آب و هوایی باشد. استوک و موررایما^۳ (۲۰۱۷) شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری در شهر کوهستانی Baguio در فیلیپین را با استفاده از تصاویر ماهواره لندست (۲۰۱۵-۱۹۸۷) مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج پژوهش آنان نشان داده است دمای سرد منطقه کوهستانی، مانعی برای شکل‌گیری UHI قلمداد نمی‌شود. ارزیابی جزایر حرارتی شهری در شهر Ho Chi Minh کشور ویتنام پژوهشی است که سان و همکاران^۴ (۲۰۱۷) به آن پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شدت جزایر حرارتی شهری به‌شدت تحت تأثیر ساختار سطوح شهری است.

در ایران نیز پژوهش‌های بسیاری، جزایر حرارتی شهری را مورد ارزیابی قرار دادند که در این بین با توجه به اهمیت کلان‌شهر تهران حجم پژوهش‌های انجام شده برای این شهر به نسبت سایر شهرهای کشور، قابل توجه است؛ به‌طوریکه (شکیبا و همکاران، ۱۳۸۸؛ صادقی نیا و همکاران، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲؛ هاشمی و

1. Roberts et al. 2. Sheng et al.
3. Estoque & Murayama 4. Son et al.

۲- روش تحقیق

الف) منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش کلان شهر تهران است. این شهر در کوهپایه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز قرار گرفته و فاصله‌ای میان طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲ دقیقه شرقی تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی، به طول تقریبی ۵۰ کیلومتر و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه شمالی تا ۳۵ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی، به عرض تقریبی ۳۰ کیلومتر را در بر گرفته است. ارتفاع این شهر، در شمالی‌ترین نقطه حدود ۱۸۰۰ متر و جنوبی‌ترین نقطه ۹۵۰ متر از سطح دریا است.

ب) داده‌های پژوهش

برای محاسبه شاخص‌های بیوفیزیکی و دمای سطح زمین (LST) از ۳ تصویر ماهواره لندست ۸ سنجنده‌های (OLI^۱) و (TIRS^۲) در روزهای ۲۰۱۳/۰۸/۱۵، ۲۰۱۴/۰۸/۲ و ۲۰۱۵/۰۸/۰۵ میلادی استفاده شد (جدول ۱). این تصاویر از ردیف ۱۶۴ و مسیر ۳۵ سطح (LIT) تحت شرایط جوی صاف از سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا به آدرس <http://Glovis.usgs.gov> و با سیستم تصویر WGS-1984 UTM zone 39N دانلود شدند (اطلاعات مربوط به هر یک از تصویرها در جدول ۱ آمده است). برای صحت‌سنجی و ارزیابی شرایط جوی تصاویر منتخب از اطلاعات آب‌وهوایی ایستگاه‌های هواشناسی

فرودگاه مهرآباد، فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، ژئوفیزیک و دوشان تپه استفاده شد.

ج) پیش پردازش تصاویر (آماده سازی جهت محاسبه دمای سطح زمین و شاخص‌های بیوفیزیکی)

پیش از شروع کار با تصاویر و استخراج اطلاعات مورد نیاز باید تصاویر مورد مطالعه از نظر رادیومتریکی و هندسی مورد پردازش قرار گیرند (رضائی و همکاران، ۱۳۹۴). از آنجایی که تصاویر مورد استفاده از نظر هندسی هم‌مختصات (Co-register) هستند لذا از جهت رادیومتریکی تصحیح شدند. تصاویر ماهواره لندست ۸ بر اساس مقادیر رقومی پیکسل ارائه می‌شوند (فاطمی و صدقی، ۱۳۹۵). برای محاسبه مقادیر بازتابندگی و بازتابش از روی این تصاویر از فایل متادیتا همراه تصاویر استفاده می‌شود که در آن ضرایب تصحیح رادیومتریکی موجود است. همچنین مقادیر توابع اتمسفری Ψ_1 ، Ψ_2 و Ψ_3 که از معادلات $\Psi_1 = \frac{1}{\tau}$ ، $\Psi_2 = -L_d - \frac{L_u}{\tau}$ و $\Psi_3 = L_d$ استخراج می‌شوند برای تصاویر مورد مطالعه محاسبه شد. در معادلات فوق τ ضریب عبور اتمسفری، L_u و L_d به ترتیب تابش اتمسفری رو به پایین و بالا هستند. این مقادیر برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار Atmospheric Correction Parameter Calculator محاسبه و در جدول (۲) ارائه شدند.

جدول ۱. ویژگی‌های تصاویر استخراج شده از شهر تهران توسط ماهواره لندست ۸

تفکیک مکانی	مسیر و ردیف	پوشش ابری (%)	زمان (به وقت تهران)	تاریخ (شمسی)	تاریخ (میلادی)
100*30 M	۳۵/۱۶۴	۱۳/۳۸	۰۶:۱۰:۴۰	۱۳۹۲/۰۵/۲۴	۲۰۱۳/۰۸/۱۵
		۴/۱۵	۰۵:۱۰:۳۸	۱۳۹۳/۰۵/۱۱	۲۰۱۴/۰۸/۰۲
		۰/۸۱	۱۰:۳۷:۴۳	۱۳۹۴/۰۵/۱۴	۲۰۱۵/۰۸/۰۵

OLI-TIRS

1. Operational Land Imager (OLI)
2. Thermal Infrared Sensor (TIRS)

جدول ۲. پارامترهای محاسبه شده تصحیح اتمسفری برای تصاویر مورد مطالعه ماهواره لندست ۸

تاریخ	τ	$L_{\eta}(W / m^2 / sr / \mu m)$	$L_d(W / m^2 / sr / \mu m)$
۲۰۱۳/۰۸/۱۵	۰/۶۷	۲/۳۶	۳/۷۴
۲۰۱۴/۰۸/۰۲	۰/۸۶	۱/۱۴	۱/۹۴
۲۰۱۵/۰۸/۰۵	۰/۷۳	۲/۱۴	۳/۴۵

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

که در آن T_s دمای سطح زمین (به کلوین)، T_B دمای روشنایی، λ طول موج رادیانس ساطع شده ($11.5 \mu m$)، ρ معادل است با $h \times c / \sigma = 1 / 438 * 10^{-2} (mk)$ 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 گسیل مندی است (فارینا^۳، ۲۰۱۲).

باتوجه به وجود آمیختگی پیکسل در واحد سطح در منطقه مطالعاتی، میزان گسیل مندی در هر پیکسل مطابق رابطه زیر محاسبه می شود (سویبرنو و همکاران، ۲۰۰۴):

$$\varepsilon = \varepsilon_v p_v + \varepsilon_s (1 - p_v) + d\varepsilon \quad (4)$$

که در رابطه فوق ε_v نشان دهنده میزان گسیل مندی پوشش گیاهی، ε_s نشان دهنده میزان گسیل مندی خاک و p_v نشان دهنده نسبت پوشش گیاهی است. $d\varepsilon$ مطابق با معادله (۵) محاسبه می شود:

$$d\varepsilon = (1 - \varepsilon_s)(1 - p_v)F\varepsilon_v \quad (5)$$

که F ضریب شکل بوده و مقدار آن برابر ۵۵٪ است (سویبرنو و همکاران، ۱۹۹۰). با توجه به مطالعات صورت گرفته، میزان گسیل مندی پوشش گیاهی ۹۹ درصد، خاک ۹۷ درصد و ساختار شهری ۹۲ درصد هست که بر این مبنای، میزان گسیل مندی با استفاده از معادله (۶) محاسبه خواهد شد (سویبرنو و همکاران، ۲۰۰۴؛ لی و همکاران^۴، ۲۰۱۱).

$$\varepsilon = 0.02644 p_v + 0.96356 \quad (6)$$

1. Li et al.
3. Farina

2. Zhang et al.
4. Li et al

ج) محاسبه دمای سطح زمین (LST)

به منظور محاسبه دمای سطح زمین، ارزش های رقومی تصاویر حرارتی (TIRS)، با استفاده از معادله (۱) به رادیانس طیفی تبدیل شدند (USGS, 2013).

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

که در آن L_λ رادیانس طیفی سنجنده $(W / M^2 srad \mu m)$ ؛ $gain$ عامل دگرگونی مقیاس خاص برای هر باند از متادیتا؛ $offset$ عامل دگرگونی مقیاس اضافه شده به هر باند از متادیتا و DN ارزش رقومی هر پیکسل است. در گام بعدی، این مقادیر با استفاده از معادله (۲)، به دمای روشنایی تبدیل شدند.

$$TB = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (2)$$

که در آن TB ، دمای درخشندگی به کلوین، $k_1 = 774.89$ و $k_2 = 1321.08$ مقادیر ثابت کالیبراسیون اند که از متادیتا قابل دسترسی است (USGS, 2013).

دمای روشنایی محاسبه شده بر حسب جسم سیاه خواهد بود. نسبت بین گسیل مندی از یک جسم به گسیل مندی جسم سیاه در دمای ثابت، گسیل مندی یا تابندگی نامیده می شود و برای تبدیل دمای روشنایی به دمای جنبشی سطح ضروری است (علی آبادی و داداشی رودباری، ۱۳۹۶). در مرحله بعد مقدار گسیل مندی محاسبه و در نهایت برای محاسبه دمای سطح زمین بکار برده شد (لی و همکاران^۱، ۲۰۱۳؛ ژانگ و همکاران^۲، ۲۰۱۳).

تصحیح گسیل مندی دمای سطح زمین، مطابق معادله (۳) محاسبه شد.

ماهواره لندست ۸، به شکل پیکسلی داده‌های دمای سطح زمین را در اختیار گذاشته است. لذا تا این مرحله، تنها دمای سطح زمین را در اختیار داریم و در مرحله بعد از رویکرد تکاملی فرکتال ویژه (FNEA^۱) برای تقسیم‌بندی LST استفاده شده است. این روش، بر پایه تقسیم‌بندی شی‌گرا تصویر، استوار است که از مجموعه فازی برای استخراج عارضه‌ها در مقیاس‌های خرد و کلان استفاده می‌کند. رویکرد FNEA، اطلاعات تصاویر را همانند فرکتال در طبیعت در نظر می‌گیرد. در رویکرد FNEA پیکسل‌ها دوبه‌دو در به‌حداقل رساندن عدم هماهنگی مکانی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. به‌طور مثال، با توجه به فضای مورد مطالعه دو تصویر پیکسل f_1 و f_2 شبیه یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند و در فضای n این ویژگی‌ها با (FND^۲) تعریف می‌شوند. عدم تجانس (h) به صورت زیر تعریف می‌شود (های و همکاران^{۱۳}، ۲۰۰۳):

$$h = \sqrt{\sum_d (f_{id} - f_{2d})^2} \quad (7)$$

د) شاخص‌های بیوفیزیکی مورد مطالعه

پارامترهای بیوفیزیکی مورد مطالعه (جدول ۳) در این پژوهش عبارت‌اند از: شاخص تفاضل نرمال شده مناطق ساخته‌شده شهری $NDBI$ ^۱ (چن و همکاران^۲، ۲۰۰۶)، شاخص لختی خاک BI ^۳ (زا و همکاران^۴، ۲۰۰۳) و شاخص شهری UI ^۵ (ژیانگ و همکاران^۶، ۲۰۱۲)، شاخص اصلاح‌شده تفاضل نرمال آب (MNDWI) (هان کیو^۷، ۲۰۰۵)، شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)^۸ (یانگو و همکاران^۹، ۲۰۱۵) و شاخص پوشش گیاهی تعدیل‌شده خاک (SAVI) (کندیگو و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۵).

در روابط فوق، $SWIR$ معرف باند طول موج کوتاه مادون قرمز، RED معرف باند قرمز، $BLUE$ باند آبی، NIR باند مادون قرمز نزدیک، $GREEN$ باند سبز و $TIRS$ باند مادون قرمز حرارتی است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۶).

ه) استخراج جزایر حرارتی شهری (UHI)

نقشه LST به دست آمده از باند حرارتی سنجنده TIRS

جدول ۳. شاخص‌های بیوفیزیکی مورد مطالعه

شماره	نام	شکل محاسباتی
۱	شاخص تفاضل نرمال شده مناطق ساخته‌شده شهری	$NDBI = \frac{SWIR1 - TIRS1}{SWIR1 + TIRS1}$
۲	شاخص لختی خاک	$BI = \frac{(SWIR1 + RED) - (NIR + BLUE)}{(SWIR1 + RED) + (NIR + BLUE)}$
۳	شاخص شهری	$UI = \frac{SWIR2 - NIR}{SWIR2 + NIR}$
۴	شاخص اصلاح‌شده تفاضل نرمال آب	$MNDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$
۵	شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$
۶	شاخص پوشش گیاهی تعدیل‌شده خاک	$SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} \times (L + 1)$ $0 < L < 1 \Rightarrow L = 0.5$

1. Normalized Difference Build-up Index (NDBI)

2. Chen and et al. 3. Bare Soil Index (BI)

4. Zha and et al. 5. Urban Index (UI)

6. Xiong et al. 7. Han-Qiu

8. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

9. Yengoh et al. 10. Candiago et al.

11. Fractal Net Evolution Approach (FNEA)

12. Fractal Net Dimensional (FND)

13. Hay et al.

شهری مهم‌ترین بخش پژوهش پیش رو را تشکیل داده است. به این منظور در جدول (۴) اطلاعات آب‌وهوایی تصاویر برگزیده ارائه شد (با توجه به حجم بالای اطلاعات، تنها اطلاعات ایستگاه مهرآباد تهران ارائه شد). همان‌گونه که پیداست در این سه روز شرایط جوی آرام در منطقه حاکم بوده است. لذا این شرایط جوی از دو جهت توانسته است برای مطالعه حاضر مفید واقع شود ۱- منجر به دریافت تصاویر مناسبی برای این سه روز شود و ۲- شرایط جوی پایدار، تفاوت‌های دمایی را به شکل بارزتری آشکار نموده است. همان‌طور که در جدول نیز آمده است سرعت باد در این سه روز منتخب کم است و اثر کاهندگی باد بر جزایر حرارتی شهری نیز به کمترین مقدار ممکن رسیده است لذا می‌توان اذعان داشت که نقش کاربری‌های گوناگون در ایجاد شرایط خرد آب و هواشناسی در این سه روز پررنگ‌تر شده است.

همان‌گونه که گفته شده شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری، وابستگی زیادی به سرعت وزش باد دارد چراکه با افزایش سرعت باد میزان درهمی هوای سرد با گرم افزایش می‌یابد و در چنین واداشت آب‌وهوایی تشکیل جزایر حرارتی شهری نیز تحت شعاع قرار خواهد گرفت. سرعتی از باد که شرایط تشکیل جزیره حرارتی در آن، به دلیل اثر اختلاط ممکن نیست را سرعت آستانه باد می‌گویند (شمسی و پور و همکاران، ۱۳۹۱). سرعت باد آستانه با جمعیت هر منطقه در ارتباط است بر اساس

ارزش فیوژن کلی که با f تعریف می‌شود بر اساس عدم تجانس طیفی (h_{color}) و عدم تجانس شکل (h_{shape}) به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$f = p.h_{color} + (1 - p).h_{shape} \quad (8)$$

در رابطه فوق p وزن تعریف‌شده طیف است (در برابر شکل) که بین $0 \leq p \leq 1$ قرار دارد. h_{color} معیار رنگ است که میانگین وزنی از تمام دگرگونی‌ها را در انحراف استاندارد برای هر کانال ارائه می‌دهد و h_{shape} معیار شکل است که خود شامل دو بخش است: همواری و فشردگی^۱ (پن^۲، ۲۰۱۶).

ی) صحت‌سنجی داده‌های دمای سطح زمین

برای صحت‌سنجی دمای سطح زمین (LST) برآوردشده از دمای اعماق ۵ و ۱۰ سانتی‌متری عمق خاک (کمیت‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی، نزدیک‌ترین مقدار به دمای سطح زمین هستند که می‌توان با یکدیگر آن‌ها را مقایسه کرد) در ایستگاه‌های هواشناسی فرودگاه مهرآباد، فرودگاه بین‌المللی امام‌خمينی(ره)، ژئوفیزیک و دوشان‌تپه برای روزها و ساعت منتخب استفاده شد و سپس از شاخص‌های آماری ضریب تعیین^۳ (R^2) و ریشه متوسط مربع خطا (RMSE)^۴ برای صحت‌سنجی بکار گرفته شدند.

نتایج و بحث

انتخاب روزهای مناسب برای ارزیابی جزایر حرارتی

جدول ۴. اطلاعات آب‌وهوایی ایستگاه همدید مهرآباد تهران برای ۳ تصویر منتخب

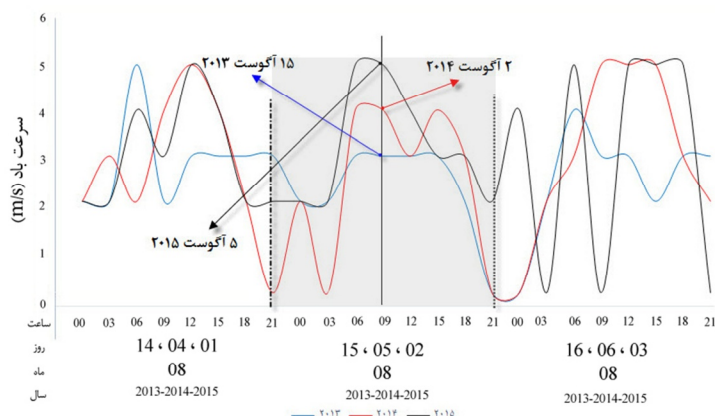
تاریخ	دما	دید افقی	دمای نقطه شبنم	سرعت باد (m/s)	جهت باد	فشار
۹۲/۵/۲۴	۳۲	۱۰>	-۱	۳	جنوبی	۸۰۰-۸۷۹
۹۳/۵/۱۱	۳۴	۱۰>	۱	۴	جنوب شرقی	۴۰۰-۸۷۷
۹۴/۵/۱۴	۳۳	۱۰>	۰	۵	جنوبی	۷۰۰-۸۷۹

1. Smoothness and Compactness
2. Pan
3. Coefficient of Determination (R2)
4. Root Mean Square Error (RMSE)

شکل (۱)، تغییرات سرعت باد را به شکل ساعتی برای ایستگاه همدید مهرآباد تهران ارائه داده است. در این نمودار سرعت باد با گام زمانی ۳ ساعته از یک روز قبل تا یک روز بعد از اخذ سه تصویر برگزیده شده در پژوهش پیش رو ارائه شده است (منطقه پررنگ شده روز گزینش تصویر در سه روز برگزیده است). همان گونه که پیداست در بازه زمانی که حدوداً تصویر توسط ماهواره اخذ شد، حداکثر سرعت باد در سال ۲۰۱۳؛ حدود ۳ متر بر ثانیه، ۲۰۱۴؛ حدود ۴ متر بر ثانیه و ۲۰۱۵؛ حدود ۵ متر بر ثانیه گزارش شده است. همان طور که انتظار می رود افزایش سرعت باد در سال ۲۰۱۵ میلادی باعث کاهش شدت جزایر حرارتی شهری در مقدار بیشینه می شود. لذا افزایش یا کاهش شدت جزایر حرارتی شهری به شدت تحت تاثیر عامل آب و هوایی باد است.

جدول ۵، برخی از مشخصه های رایج آماری را برای سه تصویر برگزیده ارائه داده است. همان گونه که در جدول نیز آمده است میانگین دمای سطح زمین برای این سه روز به ترتیب ۴۱/۱۷، ۴۵/۲۴ و ۴۵/۱۵ درجه سانتی گراد برای سال های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ بوده است. به منظور شناسایی آستانه های دمایی از آماره چارک ها استفاده گردید تا بر این اساس بتوان حدود بالا و پایین دمای سطح زمین در تهران را تشخیص داد. بر این اساس چارک اول برای سال های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵؛ ۴۳

رابطه لندزبرگ و همکاران^۱ (۱۹۸۱) سرعت باد آستانه برای تهران بیش از ۱۱ متر بر ثانیه خواهد شد. اما آنچه آشکار است، چنین سرعتی در تهران یک رویداد حداکثری محسوب خواهد شد، پژوهش های پیشین (قنبری و عزیری، ۱۳۸۸؛ شمسی پور و همکاران، ۱۳۹۱، عزیری و همکاران، ۱۳۹۲) باادهایی با سرعت ۵ متر بر ثانیه را به عنوان باد آستانه برای تهران در نظر گرفتند که در این پژوهش نیز همین میزان سرعت باد آستانه به عنوان عامل کاهنده در شدت جزایر حرارتی شهری در نظر گرفته خواهد شد. اکه و هانل^۲ (۱۹۷۰) باادهایی با سرعت حدود ۲ متر بر ثانیه را به عنوان آغاز کاهندگی باد و بادهایی با شدت حدود ۳ متر بر ثانیه را دارای اثر کاهندگی نسبتاً شدید برای جزایر حرارتی شهری در شهرهایی با بیش از ۸ میلیون نفر در نظر گرفتند. جمعیت شهر تهران از ۱۰ میلیون و ۴۱۸ هزار نفر در سال ۸۵ به ۱۱ میلیون و ۳۰۶ هزار نفر جمعیت در سال ۹۰ افزایش یافته است. برآورد کنونی مرکز آمار حاکی از آن است که تعداد شهرنشینان تهرانی در پایان سال ۹۳ به بیش از ۱۱ میلیون و ۶۹۰ هزار نفر و در انتهای سال ۹۵ به مرز ۱۲ میلیون نفر برسد (پایگاه خبری آفتاب، ۱۳۹۳). لذا با در نظر گرفتن سرعت آستانه ۵ متر بر ثانیه می توان اذعان داشت که شرایط جوی برای تشکیل جزیره حرارتی در کلان شهر تهران مهیا بوده است.



شکل ۱. میانگین سرعت باد (متر بر ثانیه) در ایستگاه همدید مهرآباد تهران در ساعت اخذ تصویر توسط ماهواره لندست ۸، خط آبی رنگ ۲۰۱۳/۰۸/۱۸؛ خط قرمز رنگ ۲۰۱۴/۰۸/۰۲ و خط سیاه ۲۰۱۵/۰۸/۰۵

1. Landsberg et al.

2. Oke and Hannell

می‌شود. سطوح نفوذناپذیر و دست‌ساخت بشر همچون سنگ‌فرش کوچه‌ها و پیاده‌روها، بتن و آسفالت در فضای شهری باعث به دام انداخته شدن گرما در سطح می‌شوند. این مواد به‌دلیل، جذب و نگه‌داشت بالای انرژی و آلودگی کمتر، میزان انرژی بالایی را جذب می‌کنند که یکی از عوامل اساسی افزایش دما هستند.

جدول ۶. مقادیر شاخص ریشه متوسط مربع خطا (RMSE) و

ضریب تعیین (R^2) بین دمای سطح زمین و ایستگاه‌های هواشناسی منتخب با عمق ۵ و ۱۰ سانتی متری خاک

ایستگاه	عمق خاک	RMSE	R^2
فرودگاه مهرآباد	۵ سانتی‌متری	۱/۷۴۵	۰/۹۱۲
	۱۰ سانتی‌متری	۱/۸۹۶	۰/۸۴۳
فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)	۵ سانتی‌متری	۲/۵۴۸	۰/۹۶۵
	۱۰ سانتی‌متری	۲/۶۵۸	۰/۹۳۶
ژئوفیزیک	۵ سانتی‌متری	۲/۶۳۲	۰/۶۹۲
	۱۰ سانتی‌متری	۲/۷۸۴	۰/۶۱۱
دوشان تپه	۵ سانتی‌متری	۲/۶۵۸	۰/۸۷۸
	۱۰ سانتی‌متری	۲/۹۸۵	۰/۸۳۶

تراکم پوشش گیاهی یکی از مهم‌ترین عوامل دگرگونی دمایی سطح زمین است که نقش تعدیل‌کننده‌ای را برای جزایر حرارتی شهری دارد که می‌توان به پارک‌ها و فضای سبز مناطق مختلف شهر اشاره کرد. بخش مرکزی تهران و مناطق مجاور آن عمدتاً منطبق بر مناطق ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۷ به‌دلیل کشش بالای گرایش‌های تجاری، فضاهای ذخیره همچون انبارهای بزرگ شهری نقش مهمی در سطوح دمایی بالا را به خود اختصاص داده‌اند. از یکسو ازدحام وسایل نقلیه موتوری و حجم انبوهی از جمعیت و از طرف دیگر بافت فرسوده این مناطق دلیل محکمی برافزایش دمای سطح زمین در این مناطق است.

استقرار خطی واحدهای کارخانه‌ای و کارگاهی در برخی از محدوده‌ها موجب شکل‌گیری محورهایی با دمای بالای خطی شده که عمدتاً بر برخی محورهای ورودی شهر (اتوبان تهران - کرج و جاده مخصوص) منطبق‌اند. ارزیابی‌های پیکسل به پیکسل دمای سطح

درجه سانتی‌گراد و چارک سوم ۴۷ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمده است. این مقادیر برای سال ۲۰۱۳ به ترتیب ۳۸ و ۴۳ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد. دامنه تغییرات دمایی نیز همانند دمای بیشینه مقدار افزایشی را برای کلان‌شهر تهران نشان داده است که نشان دهنده رشد و شکل‌گیری هسته‌های جدید جزایر حرارتی شهری برای بزرگ‌ترین کلان‌شهر کشور است.

جدول ۵. مشخصه‌های آماری دمای سطح زمین (LST)

برای ۳ تصویر منتخب

آماره	اوت ۲۰۱۳	اوت ۲۰۱۴	اوت ۲۰۱۵
میانگین	۴۱/۱۷	۴۵/۲۴	۴۵/۱۵
واریانس	۱۰/۸۹	۱۰/۶۳	۱۱/۸
دامنه تغییرات	۲۵/۲۵	۲۶/۵۸	۳۴/۶۸
کمینه	۲۹/۲	۳۱/۶	۲۴/۵۱
بیشینه	۵۴/۴۵	۵۸/۱۸	۵۹/۱۹
چارک اول	۳۸/۹۲	۴۳/۲۱	۴۳/۰۳
	سوم	۴۳/۴۳	۴۷/۴۵

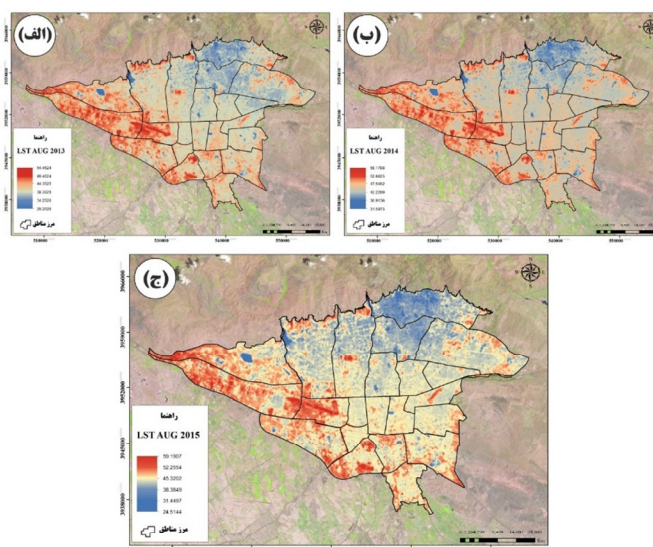
ارزیابی داده‌های دمای سطح زمین با داده‌های عمق ۵ و ۱۰ سانتی‌متری خاک در ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در جدول (۶) نشان داده شده است. بیش‌ترین مقدار همبستگی برای عمق ۵ سانتی‌متری خاک در دو ایستگاه فرودگاهی امام خمینی و مهرآباد بدست آمده است. همچنین کمترین مقدار RMSE نیز برای همین دو ایستگاه محاسبه شد. بر این اساس، می‌توان اذعان داشت که دمای سطح زمین بدست آمده برای کلان‌شهر تهران طی روزهای منتخب از دقت مناسبی برخوردار است.

شکل (۲)، شاخص دمای سطح زمین (LST) را بر اساس تصاویر سال‌های ۲۰۱۳ (شکل ۲-الف)، ۲۰۱۴ (شکل ۲-ب) و ۲۰۱۵ (شکل ۲-ج) نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود دامنه دمایی برای ماه اوت سه سال منتخب به ترتیب ۲۹/۲۰ تا ۵۴/۴۵، ۳۱/۵۹ تا ۵۸/۱۷ و ۲۴/۵۱ تا ۵۹/۱۹ درجه سانتی‌گراد است. اختلاف فاحش درجه حرارت بین مناطق شمال شرق (مناطق ۱، ۳ و ۴) با مناطق جنوب و غرب کلان‌شهر تهران (مناطق ۹، ۲۱، ۲۲ و ۱۹) دیده

بررسی نقشه پراکندگی دمای سطحی زمین در سه سال متوالی در شکل‌های (۴-الف، ۴-ب و ۴-ج) نشان‌دهنده کاهش کمینه دما مربوط به منطقه ۲۱ و افزایش بیشینه دما مربوط به همین منطقه است. بامقایسه دما در مناطق ۲۲ گانه شهری تهران، منطقه ۹ دارای بالاترین میانگین دما در هر سه سال بوده است. روند دمایی برای دو سال ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ با شیب نه‌چندان قابل‌توجهی ادامه دارد. پایین‌ترین دمای میانگین مربوط به منطقه ۳ در سال ۲۰۱۳ و برای دو سال بعد، در منطقه ۱ تهران است. واکاوی منطقه‌ای دمای سطحی مناطق ۲۲ گانه تهران نشان می‌دهد که هیچ منطقه‌ای نسبت به سال ۲۰۱۳ کاهش دما نداشته؛ اما در مورد دمای کمینه تنها منطقه ۲۱ تهران نسبت به سال ۲۰۱۳ کاهش دما را تجربه کرده است. منطقه ۱۴، بیشترین افزایش دمای کمینه را پس از سال ۲۰۱۳ داشته و مشخص‌ترین منطقه در افزایش دمای کمینه نسبت به سال ۲۰۱۳ بوده و به منطقه‌ای گرم‌تر تبدیل شده است، و این افزایش در ارتباط مثبت با شاخص لختی خاک و شاخص‌های شهری بوده است. به‌طور کلی، روند افزایشی برای دمای سطحی در شهر تهران وجود داشته است. نقشه‌های پراکندگی دمای سطحی، جابجایی‌هایی را در نقاط کمینه و بیشینه

زمین با نقشه کاربری اراضی شهری نشان داده است که تراکم بالای واحدهای صنعتی در پهنه‌هایی مانند اراضی فرودگاه، پهنه صنعتی در اطراف محور ورامین، محور اتوبان قم، اتوبان ساوه و اطراف خیابان فدائیان اسلام و نیز پهنه صنعتی شرق تهران در شمال پارک سرخه حصار باعث شکل‌گیری پهنه‌های دمایی بالا شدند. در مجموع، مناطق ۲۱، ۱۸ و ۲۰ بیشترین تمرکز فعالیت صنعتی و کارگاهی را به خود اختصاص داده‌اند و همان‌طور که پیداست این مناطق دمای بالایی را نیز به خود اختصاص داده‌اند.

در هر سه روز منتخب، فرودگاه مهرآباد واقع در منطقه ۹، منطقه نیروی هوایی در منطقه ۳، قلعه مرغی در منطقه ۱۹، محدوده برج و بیمارستان میلاد شامل مناطق پارکینگی این دو منطقه واقع در منطقه ۲ کانون بیشینه دمایی را به خود اختصاص داده‌اند. بیشینه دمایی نیز متعلق به فرودگاه مهرآباد است و پس از آن، قلعه مرغی، محدوده برج و بیمارستان میلاد و نیروی هوایی بیشینه دمایی را در کلان‌شهر تهران به خود اختصاص داده‌اند. بیشینه دمایی در سال ۲۰۱۳ (شکل ۲-الف) ۵۴/۴۵، در سال ۲۰۱۴ (شکل ۲-ب) ۵۸/۱۷ و در ۲۰۱۵ (شکل ۲-ج) ۵۹/۱۹ درجه سانتی‌گراد در فرودگاه مهرآباد شناسایی شد.



شکل ۲. دمای سطح زمین (LST) کلان‌شهر تهران، الف) ۱۵ اوت ۲۰۱۳ میلادی، ب) ۲ اوت ۲۰۱۴ میلادی، ج) ۵ اوت ۲۰۱۵ میلادی

به طوری که، در قسمت‌های شمالی تهران مقدار شاخص بین $1/20$ و $1/50$ متغیر است و در مناطق جنوبی و غربی شاخص مقدار بیش از دو را نشان داده است. در شمال مناطق ۲، ۵ و ۲۲ و در بخش جنوبی و غربی مناطق ۱۹، ۱۸ و ۲۱ شاخص مقادیر بیشینه خود را در کلان‌شهر تهران نشان می‌دهد.

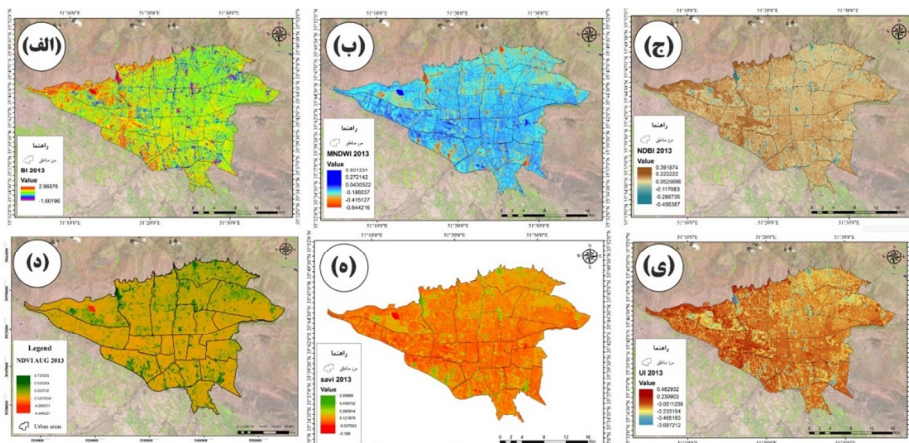
شکل‌های (۳-ب)، (۳-ج) و (۵-ب) شاخص اصلاح‌شده تفاضل بهنجار آب (MNDWI) را برای سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ میلادی نشان می‌دهند. دریاچه شهدای خلیج فارس (دریاچه چیتگر) در شمال غرب تهران در تمامی سال‌های مورد مطالعه، بیشینه شاخص را به خود اختصاص داده است. همچنین وجود رودخانه‌ها و آبراهه‌های تهران همچون رودخانه درکه که در منطقه یک شهری جاری است، نقش موثری در کاهش جزایر حرارتی شهری تهران دارند. مقایسه نتایج این شاخص با شاخص LST نیز همین امر را تأیید می‌کند.

شاخص تفاضل بهنجار شده مناطق ساخته‌شده شهری برای اوت ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ در شکل‌های ۳-ج، ۴-ج و ۵-ج نشان داده شدند. کمینه و بیشینه دامنه‌های شاخص برای ماه اوت ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ به ترتیب $0/45$ تا $0/39$ ، $0/42$ تا $0/34$ و در نهایت برای سال ۲۰۱۵ در مقدار کمینه $0/60$ و بیشینه $0/38$ است. در

دمایی نشان می‌دهند که نقاط سردتر (دمای کمتر) در قسمت شمال شرقی و به منطقه ۱ و ۳ محدودتر شده‌اند و اکثر نقاط دارای دمای کمتر جای خود را به دمای متوسط داده‌اند.

شکل‌های ۳ تا ۵ شاخص‌های شهری سنجیده شده را برای کلان‌شهر تهران نشان می‌دهد. این شاخص‌ها به ترتیب آنچه در شکل‌ها آمده‌اند عبارت‌اند از: الف) شاخص لختی خاک (BI)، ب) شاخص اصلاح‌شده تفاضل بهنجار آب (MNDWI)، ج) شاخص تفاضل بهنجار شده مناطق ساخته‌شده شهری (NDBI)، د) شاخص تفاضل بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI)، ه) شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده خاک (SAVI)، ی) شاخص شهری (UI).

شاخص لختی خاک (BI) برای اوت سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ در شکل‌های ۳-الف، ۴-الف و ۵-الف نشان داده شد. همان‌گونه که در راهنمای شکل‌ها مشخص است بیشینه شاخص از ۲/۹۶ در سال ۲۰۱۳ به ۳/۴۹ در سال ۲۰۱۵ رسیده است. کمینه شاخص نیز برای سال آغازین و پایانی مطالعه حاضر ۱/۶۰- و ۲/۲۱- است. مناطقی که از تراکم بالای پوشش گیاهی برخوردارند نسبت به مناطقی که با کمبود پوشش گیاهی مواجه‌اند، شاخص مقدار کمتری را نشان می‌دهند که می‌توان به نقش مثبت پوشش گیاهی اشاره کرد.



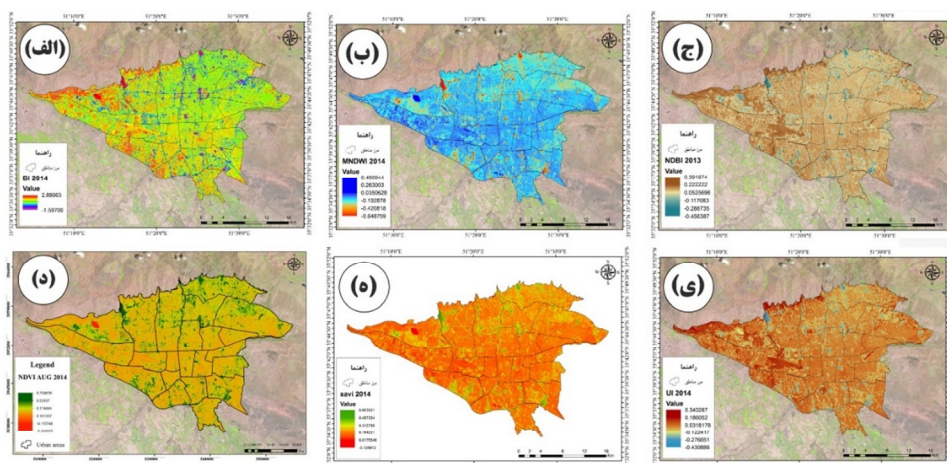
شکل ۳. اوت سال ۲۰۱۳؛ الف) شاخص لختی خاک (BI)، ب) شاخص اصلاح‌شده تفاضل بهنجار آب (MNDWI)، ج) شاخص تفاضل بهنجار شده مناطق ساخته‌شده شهری (NDBI)، د) شاخص تفاضل بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI)، ه) شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده خاک (SAVI)، ی) شاخص شهری (UI)

مناطق ۱ تا ۵ تهران در سال ۲۰۱۵ بوده‌اند. پوشش گیاهی در مناطق شمالی کلان شهر تهران، به دلیل پوشش درختی و گیاهی و در برخی مناطق جنوب به علت زمین‌های کشاورزی کاهش دما را به همراه داشته است. شاخص شهری (UI) نیز در شکل‌های (۳-ی؛ ۴-ی و ۵-ی) برای سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ میلادی نشان داده شده‌اند. کمینه و بیشینه شاخص شهری برای اوت ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ به ترتیب ۰/۶۹- تا ۰/۴۶، ۰/۳۴- تا ۰/۳۴ و ۰/۷۴- تا ۰/۴۹ هستند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود سطوح شهری به رنگ قرمز به نمایش درآمده‌اند و بیشینه شاخص محدوده‌های شهری بسیار متراکم را شامل می‌شود. این مناطق بیشتر با کاربری مسکونی و همچنین در محله‌های قدیمی (بافت فرسوده) منطبق شده‌اند. بررسی‌ها نشان داده که محله فرودگاه مهرآباد واقع در منطقه ۹ تهران کانون اصلی شاخص در هر سه دوره مورد مطالعه است و مرکزیت خود را حفظ کرده است.

در مناطق شمالی و شمال شرق تهران نسبت به مناطق غرب و جنوب، شاخص شهری (UI) مقدار کمتری را نشان می‌دهند. سطوح نفوذناپذیر همچون آسفالت و قیر موجود در سقف ساختمان‌ها و خاک به علت جذب و نگه‌داشتن انرژی خورشید باعث افزایش

تهران، بیشتر مواد به کار رفته در مصالح شهری، از بتن و آسفالت است که آلبدوی کمی داشته و میزان انرژی بیشتری را جذب می‌کنند که خود عامل افزایش شاخص تفاضل بهنجار شده مناطق ساخته شده شهری است. نقشه‌های شاخص UI نیز، منطبق بر نقشه‌های شاخص NDBI است یعنی مناطق ساخته شده شهری در مناطق شمال تهران به دلیل پوشش گیاهی مناسب‌تر و در برخی مناطق جنوب به دلیل زمین‌های کشاورزی با کاهش مقدار شاخص تفاضل بهنجار شده مناطق ساخته شده شهری همراه بوده است. منتهی در مناطق مرکزی، جنوب غرب و غرب که مناطق مسکونی افزایش یافته و پوشش گیاهی حذف شده است، شاخص مقدار بیشتری را نشان می‌دهد.

شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) در شکل‌های (۳-د؛ ۴-د و ۵-د) و شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده خاک (SAVI) در شکل‌های (۳-ه؛ ۴-ه؛ ۵-ه) نشان داده شده‌اند. بیشینه افزایشی این شاخص، مربوط به منطقه یک تهران و پایین‌ترین مقدار آن مربوط به منطقه ۱۰ در طول سه سال پیاپی بوده است که اولی از خنک‌ترین مناطق تهران و دومی از گرم‌ترین نقاط تهران در این سال‌ها بوده‌اند. به‌طور کلی، افزایش بیشتر شاخص پوشش گیاهی (NDVI) مربوط به

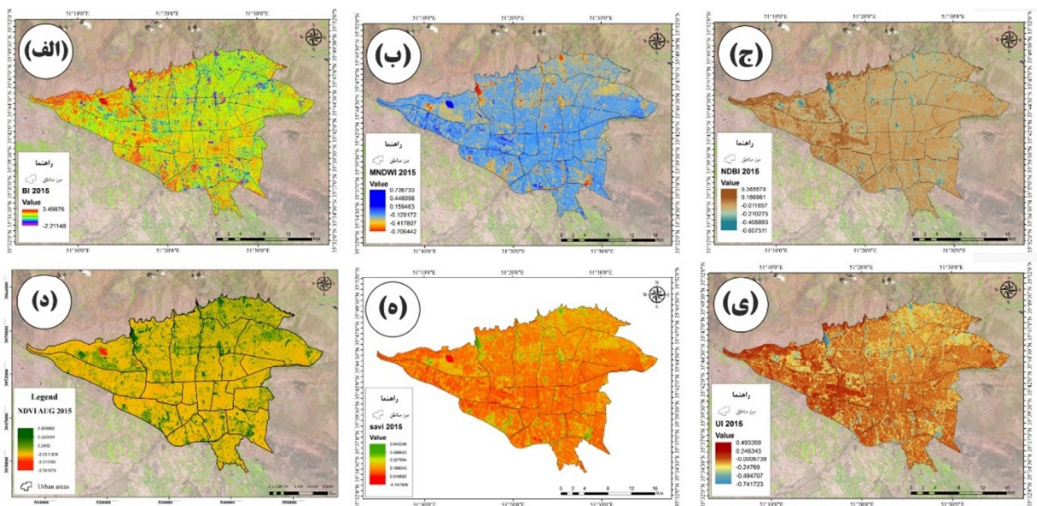


شکل ۴- اوت سال ۲۰۱۴؛ (الف) شاخص لختی خاک (BI)، (ب) شاخص اصلاح شده تفاضل بهنجار آب (MNDWI)، (ج) شاخص تفاضل بهنجار شده مناطق ساخته شده شهری (NDBI)، (د) شاخص تفاضل بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI)، (ه) شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده خاک (SAVI)، (ی) شاخص شهری (UI)

(NDBI) مثبت و برای شاخص تفاضل بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI) منفی و معنادار است. سطوح غیرقابل نفوذ و پوشش گیاهی به‌عنوان اصلی‌ترین چشم‌اندازهای شهری تلقی می‌شوند که نقش چشمگیری در تابش، گرما، رطوبت و آلودگی‌های سطح و سطوح زیرین دارند. در بسیاری از پژوهش‌های سنجش‌از‌دور شهری تأکید بیش از اندازه بر شاخص تفاضل بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI) شده است. اما آنچه درباره تهران اثبات شد، نقش چشمگیر سایر شاخص‌های بیوفیزیکی در دگرگونی دمایی سطح است. به‌طور مشخص لختی خاک به‌عنوان یک شاخص، کارآتر از پوشش گیاهی در دگرگونی دمایی سطح، ایفای نقش می‌کند که این امر توسط اوون و همکاران^۱ (۱۹۹۸) نیز تأیید شد. همبستگی منفی شاخص پوشش گیاهی با دمای سطح زمین می‌تواند یک معیار کافی برای پژوهش‌های جزایر حرارتی شهری تلقی شود (ونگ و همکاران^۲، ۲۰۰۴). در بین شاخص‌های مورد مطالعه سه شاخص NDVI، SAVI و MNDWI اثر منفی روی LST و سه شاخص NDBI، BI و UI اثر مثبت روی LST داشته‌اند. سطوح غیرقابل نفوذ و دست‌ساز انسانی

غیرمنتظره شاخص می‌شوند که این امر را می‌توان در فرودگاه منطقه نیروی هوایی در شرق تهران نیز مشاهده کرد. بالاترین مقدار شاخص شهری (UI) در محدوده‌های مرکزی (تجاری) و قسمت‌های غربی شهر قرار گرفته‌اند و بین محدوده‌های جنگلی و دارای فضای سبز (محدوده شمال تهران) که به رنگ آبی نمایش داده شده‌اند و محدوده‌های مرکزی و جنوب شهر اختلاف زیادی در شاخص مناطق ساخته‌شده شهری وجود دارد. مناطق شمالی به علت وجود کوه‌ها، درختان و پوشش گیاهی و جریان آب از سمت کوه‌ها، کمینه شاخص شهری (UI) دیده می‌شود. محدوده‌های مرکزی شهر، فرودگاه‌ها، بزرگراه‌ها و پایانه‌ها باعث افزایش چشمگیری در شاخص شهری (UI) شده‌اند.

ارتباط دمای سطحی شهر تهران (LST) با شاخص‌های بیوفیزیکی نشان داد (جدول ۷) که بیشینه ارتباط مربوط به شاخص تفاضل بهنجار شده مناطق ساخته‌شده شهری (NDBI) و شاخص شهری (UI) و پس از آن شاخص تفاضل بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI) است؛ این ارتباط در سطح ۰/۰۱ درصد برای شاخص تفاضل بهنجار شده مناطق ساخته‌شده شهری



شکل ۵. اوت سال ۲۰۱۵؛ الف) شاخص لختی خاک (BI)، ب) شاخص اصلاح‌شده تفاضل بهنجار آب (MNDWI)، ج) شاخص تفاضل بهنجار شده مناطق ساخته‌شده شهری (NDBI)، د) شاخص تفاضل بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI)، ه) شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده خاک (SAVI)، ی) شاخص شهری (UI)

1. Owen et al. 2. Weng et al.

جدول ۷. ضریب همبستگی پیرسون بین دمای سطح زمین و شاخص‌های بیوفیزیکی مورد مطالعه

	LST	NDBI	NDVI	BI	UI	MNDWI	SAVI
LST ۲۰۱۳	۱	۰/۷۱۶**	-۰/۳۸۹	۰/۷۳۹**	۰/۶۲۹**	۰/۳۱۶	-۰/۳۱۵
Sig. ۲۰۱۳		۰/۰۰۰	۰/۰۷۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۱۵۲	۰/۱۵۳
	LST	NDBI	NDVI	BI	UI	MNDWI	SAVI
LST ۲۰۱۴	۱	۰/۷۷۹**	-۰/۵۷۰**	۰/۷۳۵**	۰/۷۷۹**	۰/۵۵۶**	-۰/۵۲۹**
Sig. ۲۰۱۴		۰/۰۰۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۷	۰/۰۱۱
	LST	NDBI	NDVI	BI	UI	MNDWI	SAVI
LST ۲۰۱۵	۱	۰/۷۹۲**	-۰/۶۳۳**	۰/۷۳۷**	۰/۷۸۸**	۰/۶۱۶**	-۰/۶۰۴**
Sig. ۲۰۱۵		۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳

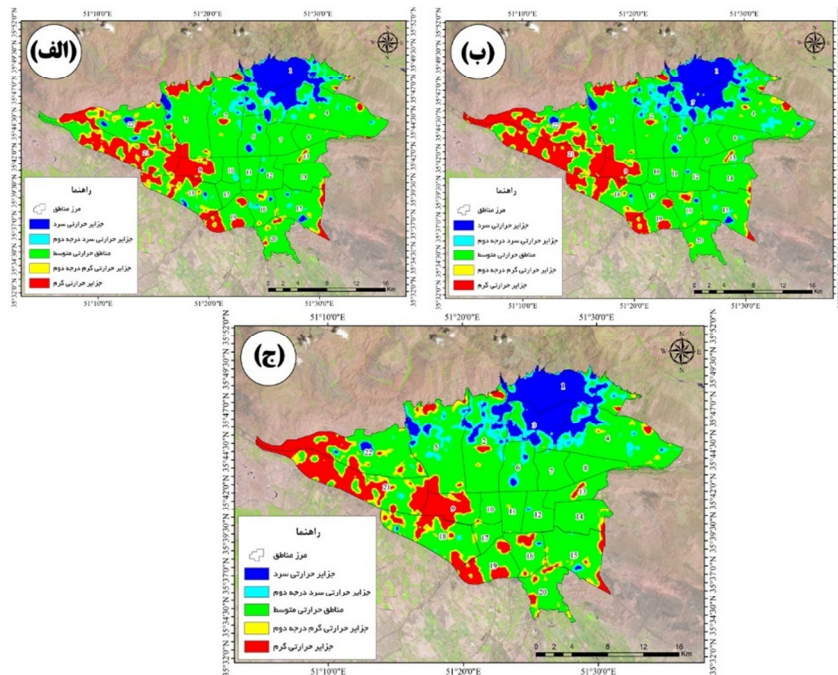
**آزمون دو دامنه

(شکل ۶-ج) منطقه ۲۱ تهران به جهت تمرکز شدید اکثر کارخانه‌ها، کارگاه‌های صنعتی و انبارها طی سال‌های اخیر بیش‌ترین آسیب را دیده است. منطقه ۹ شهری تهران به دلیل قرارگیری فرودگاه مهرآباد، پایانه‌های حمل‌ونقل مسافری و گذرگاه اصلی دسترسی به مناطق غربی تهران (همچون کرج) به یکی از کانون‌های اصلی جزایر حرارتی شهری تبدیل شده است. سومین منطقه مهم جزایر حرارتی شهری در شمال غربی کلان‌شهر تهران واقع در منطقه ۲۲ و شمال منطقه ۱۹ شهری است که به جهت وجود زمین‌های بایر بسیار است که توسط شهرداری، مالکان شخصی و سایر ارگان‌های مرتبط زیر فضای سبز یا ساخت قرار نگرفته‌اند و به این جهت دمای بسیار بالایی را دارند. علاوه بر آنچه گفته شد می‌توان به منطقه ۱۲ (بازار مرکزی تهران و هسته‌های قدیمی شهری)، منطقه ۱۳ (زمین‌های بدون پوشش اطراف فرودگاه سابق دوشان تپه و مناطق آسفالت شده اطراف آن) و مناطق جنوبی تهران که در آن کارگاه‌های آموزشی و صنعتی بسیاری وجود دارد اشاره کرد که دمای زیادی را نشان می‌دهند. در برخی از مناطق همچون منطقه ۱۲ در سال‌های اخیر با اعمال سیاست‌های توسعه معابر، فضای سبز و زمان‌بندی تردد خودروها پدیده جزایر حرارتی شهری کاهش محسوسی داشته است.

نقش چشمگیری در افزایش دمای سطح و برعکس شاخص‌های پوشش گیاهی نقش منفی را در افزایش دما داشته‌اند، همچنین این رابطه توسط احمدی و داداشی رودباری (۱۳۹۵) در شهر مشهد نیز اثبات شد که بر این اساس می‌توان به نقش قابل توجه عامل انسانی در رشد و توسعه جزایر حرارتی شهری اذعان داشت.

جزایر حرارتی کلان‌شهر تهران برای مرداد سه‌سال ۲۰۱۳ (شکل ۶-الف)، ۲۰۱۴ (شکل ۶-ب) و ۲۰۱۵ (شکل ۶-ج) با رویکرد تکاملی فرکتال ویژه (FNEA) محاسبه و ارائه شده است. جزایر حرارتی در این رویکرد به ۵ دسته جزایر حرارتی سرد، جزایر حرارتی سرد درجه دوم، مناطق حرارتی متوسط، جزایر حرارتی گرم درجه دوم و جزایر حرارتی گرم دسته‌بندی شدند. نتایج نشان داد که به‌طور متوسط ۱۳ درصد از مساحت کل کلان‌شهر تهران یا به عبارتی ۹۵ کیلومترمربع را جزایر حرارتی گرم تشکیل داده‌اند. جزایر حرارتی گرم درجه دوم ۷ درصد (۵۱ کیلومترمربع)، جزایر حرارتی متوسط ۶۲ درصد (۴۵۴ کیلومترمربع)، جزایر حرارتی سرد درجه دوم ۶ درصد (۴۸ کیلومترمربع) و جزایر حرارتی سرد ۱۰ درصد (۷۳ کیلومترمربع) از کل مساحت کلان‌شهر تهران را به خود اختصاص داده‌اند.

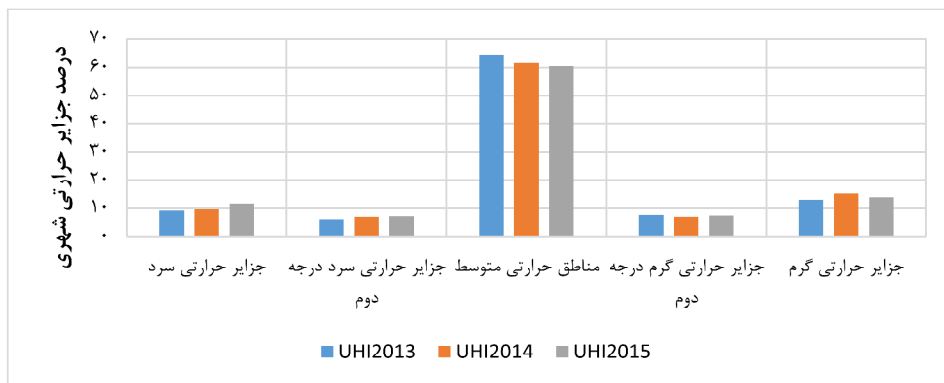
مطابق با جزایر حرارتی سنجیده شده برای سه سال ۲۰۱۳ (شکل ۶-الف)، ۲۰۱۴ (شکل ۶-ب) و ۲۰۱۵



شکل ۶. جزایر حرارتی شهری کلان‌شهر تهران مبتنی بر رویکرد تکاملی فرکتال ویژه (FNEA)،
 (الف) اوت ۲۰۱۳، (ب) اوت ۲۰۱۴ و (ج) اوت ۲۰۱۵

ابراز داشته‌اند بادهایی با شدت حدود ۳ متر بر ثانیه دارای اثر کاهندگی نسبتاً شدید برای جزایر حرارتی شهری دارد همخوانی کامل دارد. بطوریکه در سال ۲۰۱۳ سرعت باد ۳ متر بر ثانیه و سال ۲۰۱۵ سرعت باد مطابق با گزارش سازمان هواشناسی برای ایستگاه هواشناسی مهرآباد تهران ۵ متر بر ثانیه گزارش شد و همین افزایش سرعت باد نقش قابل توجهی را در کاهش جزایر حرارتی شهری داشته است.

شکل ۷ دگرگونی کلاس‌های پنج‌گانه جزایر حرارتی شهری را برای کلان‌شهر تهران طی سه سال منتخب ارائه داده است. نکته قابل توجه کاهش جزئی جزایر حرارتی گرم و افزایش جزایر حرارتی سرد در سال ۲۰۱۵ میلادی است. مقایسه این شکل با شکل شماره ۲ که میانگین سرعت باد را برای همین سه روز نشان می‌دهد به‌روشنی نقش تعدیلی باد را در کاهش جزایر حرارتی به نمایش گذاشته است که با نتایج اکه و هانل^۱ (۱۹۷۰) که



شکل ۷. تغییرات جزایر حرارتی شهری برای سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ میلادی با رویکرد FNEA

1. Oke and Hannell

۳- نتیجه‌گیری

جزایر حرارتی شهری یکی از مواردی است که انسان نقش موثری بر آن دارد. ظهور و گسترش این پدیده تحت تاثیر عوامل بسیاری است. بسته به اینکه جزایر حرارتی شهر، تحت تاثیر چه شرایطی ایجاد و رشد می‌کنند، برای کاهش اثرات سوء آن‌ها باید در گام نخست به شناخت آن‌ها اقدام کرد و سپس برنامه‌های موثر و کوتاه‌مدت ارائه داد. در غیر این صورت، هرگونه برنامه‌ریزی با شکست مواجه خواهد شد.

نتایج نشان داده است که سرعت باد و تغییرات آن، نقش چشمگیری در توسعه جزایر حرارتی شهری تهران ایفا می‌کند؛ به‌طوری‌که با عبور از آستانه ۳ متر بر ثانیه (سرعت باد) از شدت جزایر حرارتی شهری در تهران کاسته خواهد شد. ارزیابی‌های آماری نشان داده است که دامنه دمایی به همراه دمای بیشینه، رشد زیادی را در تهران داشته‌اند. همبستگی دمای سطح زمین با شاخص‌های بیوفیزیکی سنجیده شده نشان داد که سطوح غیرقابل نفوذ و دست‌ساز انسانی نقش کارسازی را در افزایش دمای سطح زمین داشته و برعکس شاخص‌های پوشش گیاهی نقش منفی را در افزایش دما داشته‌اند که مبین نقش عامل انسانی در رشد و توسعه این پدیده مخرب آب‌وهوایی در کلان‌شهر تهران است. رویکرد FNEA پنج نوع جزیره حرارتی را برای تهران آشکار ساخته است که به‌طور متوسط جزایر حرارتی گرم ۱۳٪، جزایر حرارتی گرم درجه دوم ۷٪، مناطق حرارتی متوسط ۶۲٪، جزایر حرارتی سرد درجه دوم ۶٪ و جزایر حرارتی سرد ۱۰٪ از کل مساحت کلان‌شهر تهران را به خود اختصاص داده‌اند. کانون‌های عمده جزایر حرارتی شهری نیز مناطق ۲۱، ۹، ۲۲ و ۱۳ شهری تهران شناسایی شدند که به ترتیب به علت تمرکز شدید بیشتر کارخانه‌ها و صنایع وابسته به آن‌ها، فرودگاه و پایانه‌های حمل‌ونقل شهری، زمین لخت و لم‌یزرع، بازار و بافت فرسوده شهری ایجاد و گسترش یافته‌اند. برای مثال، منطقه ای شامل برج و بیمارستان میلاد و پارکینگ‌های آن، منطقه قلعه

مرغی، فرودگاه مهرآباد، منطقه نیرو هوایی، میدان‌های هفت‌تیر، شوش، انقلاب و آزادی اصلی‌ترین کانون‌های جزایری حرارتی کلان‌شهر تهران هستند. نقش عوارض شهری در رشد و گسترش جزایر حرارتی شهری و نقش پوشش گیاهی در کاهش اثر این پدیده نتیجه‌ایی است که توسط پژوهش‌های بسیاری تأیید شده است. بیاساتو و همکاران (۲۰۱۴) در شهر پادوا، پن (۲۰۱۶) در شهر لانژو چین، مهدیان ماهفروزی و همکاران (۱۳۹۴) در بوستان ولایت تهران، احمدی و همکاران (۱۳۹۴) در شهر اردبیل، احمدی و داداشی رودباری (۱۳۹۵) در شهر مشهد و علوی پناه (۱۳۹۵) و همکاران در شهر مونیخ نیز به این نتیجه رسیدند. مقایسه نتایج مطالعه حاضر با پژوهش‌های پیشین جزایر حرارتی شهری تهران (شکیبا و همکاران، ۱۳۸۸؛ صادقی نیا و همکاران، ۱۳۹۱؛ ساسان پور و همکاران، ۱۳۹۲ و بوکائی و همکاران، ۲۰۱۶) نشان داده است که با همسویی در برخی از نتایج کلی، رویکرد FNEA بهتر می‌تواند به شناسایی پدیده جزایر حرارتی منجر شود و روشن است که کاربست فناوری‌های روز دنیا به شکل کاراتری می‌تواند الگوهای مدیریتی را ارائه و پشتیبانی نماید.

هر روزه در تهران انرژی‌های فسیلی زیادی مصرف می‌شود که بخش عمده‌ایی از این سوخت‌ها تبدیل به کربن و گازهای آلاینده می‌شود که خطر جدی برای بیماری‌های تنفسی و قلبی است و این شرایط برای افراد کم‌توان‌تر همچون افراد مسن، کودکان و زنان باردار می‌تواند بسیار خطرناک باشد. لذا پیشنهاد می‌شود مدیران شهری گسترش فضای سبز، بام سبز، معماری همساز با محیط، فناوری‌های نوین روکش معابر و آب‌نماها را در اولویت برنامه‌های خود قرار دهند تا از اثرات این پدیده سوء زیست‌محیطی کاسته شود.

۴- منابع

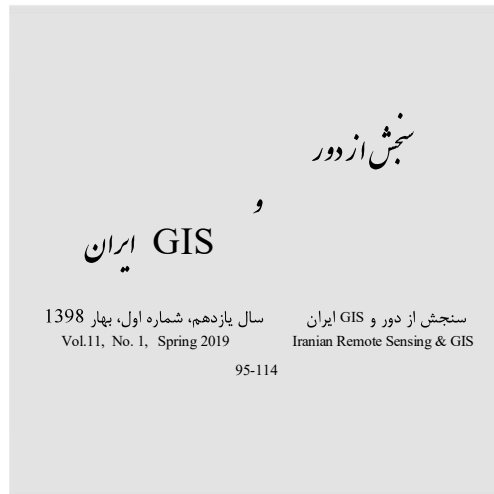
احمدی، ب.، قربانی، ا.، صفر راد، ط. و سبحانی، ب.، ۱۳۹۴، بررسی دمای سطح زمین در رابطه با کاربری و پوشش کاربری با استفاده از

- شماره ۳، صص. ۶۴-۴۹.
- ساسان پور، ف.، ضیائیان، پ. و بهادری، م.، ۱۳۹۲، بررسی رابطه کاربری و پوشش اراضی و جزایر حرارتی شهر تهران، جغرافیا (فصلنامه بین‌المللی انجمن جغرافیای ایران)، سال ۱۱، شماره ۳۹، صص. ۲۵۶-۲۷۰.
- شکیبا، ع.، ضیائیان فیروزآبادی، پ.، عاشور لو، د. و نامداری، س.، ۱۳۸۸، تحلیل رابطه کاربری و پوشش اراضی جزایر حرارتی شهر تهران، با استفاده از داده‌های ETM⁺، سنجش‌ازدور و GIS ایران، سال اول، شمار اول، صص. ۵۶-۳۹.
- شمسی پور، ع.ا.، مهدیان ماهفروزی، م. و حسین پور، ز.، ۱۳۹۱، واکاوی تغییرات مکانی هسته‌ی جزیره‌ی گرمایی شهر تهران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال ۴۴، شماره ۳، صص. ۱۴۶-۱۲۷.
- صادقی نیا، ع.، علیجانی، ب. و ضیائیان فیروزآبادی، پ.، ۱۳۹۱، تحلیل فضایی-زمانی جزیره حرارتی کلان‌شهر تهران با استفاده از سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال چهارم، صص. ۱۷-۱.
- صادقی نیا، ع.؛ علیجانی، ب.؛ ضیائیان فیروزآبادی، پ.، ۱۳۹۲، کاربرد تکنیک خودهمبستگی فضایی در تحلیل جزیره حرارتی شهر تهران، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال سیزدهم، شماره ۳۰، صص. ۶۷-۹۰.
- عزیزی، ق.، شمسی پور، ع.ا.، مهدیان ماهفروزی، م. و میری، م.، ۱۳۹۲، تأثیرپذیری شدت جزیره گرمایی شهری تهران از الگوهای همدیدی جو، محیط‌شناسی، دوره ۳۹، شماره ۴، صص. ۶۶-۵۵.
- علوی پناه، ص.، قریشی، ی. و شمسی پور، ع.، ۱۳۹۵، اثر خنک‌کنندگی فضاهای سبز شهری (مطالعه موردی شهر مونیخ)، محیط‌شناسی، داده‌های سنجش‌ازدور، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، سال ۶، شماره ۱، صص. ۶۱-۷۷.
- احمدی، م. و داداشی رودباری، ع.، ۱۳۹۵، آثار ترکیبات بیوفیزیکی در شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری (مطالعه موردی شهر مشهد)، سنجش‌ازدور و GIS ایران، سال هشتم، شماره ۳، صص. ۵۸-۳۹.
- احمدی، م. و داداشی رودباری، ع.، ۱۳۹۵، شناسایی جزایر حرارتی شهری مبتنی بر رویکرد زیست محیطی، مطالعه موردی (کلان شهر اصفهان)، جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دوره ۲۸، شماره ۳، صص. ۲۰-۱.
- احمدی، م.، علی بخشی، ز. و داداشی رودباری، ع.، ۱۳۹۶، پایش دگرگونی شاخص‌های شهری کلان شهر تهران با رویکرد آمایش سرزمین و کاربست تصاویر ماهواره‌ای چند زمانه Landsat8، بیست و چهارمین همایش و نمایشگاه ملی ژئوماتیک ۹۶، ۲۵ و ۲۶ اردیبهشت ۱۳۹۶، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران.
- اطلس کلان‌شهر تهران، ۱۳۹۶، فصل هشتم، شهرسازی، وضعیت کاربری‌های عمده و اصلی در مناطق، آدرس تارنمای اینترنتی <http://atlas.tehran.ir>، تاریخ دسترسی ۱۳۹۶/۰۲/۲۴.
- پایگاه خبری آفتاب، ۱۳۹۳، تهران از جمعیت ترکید/ پایتخت‌نشینان ۱۲/۵ میلیون نفر شدند، ایرانی‌ها ۷۷ میلیون و ۴۰۰ هزار نفر، کد خبر، ۲۴۱۹۵۲، تاریخ دسترسی ۱۳۹۶/۰۲/۱۹.
- رضانی خوجین، ع.، خیرخواه زرکش، م.م.، دانش کار آراسته، پ.، مریدی، ع. و علیمحمدی ناقچی، ر.، ۱۳۹۵، محاسبه و واسنجی دمای سطح زمین با استفاده از داده‌های حرارتی ماهواره Landsat8، سنجش‌ازدور و GIS ایران، سال هفتم،

- Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M. and Pullin, A.S., 2010, **Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence**, *Landscape and urban planning*, 97(3), pp. 147-155.
- Busato, F., Lazzarin, R. M. and Noro, M., 2014, **three years of study of the Urban Heat Island in Padua: Experimental results**, *Sustainable Cities and Society*, 10, pp. 251-258.
- Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M. and Gattelli, M., 2015, **Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images**, *Remote Sensing*, 7(4), pp. 4026-4047.
- Chen, X.L., Zhao, H.M., Li, P.X. and 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.
- Chudnovsky, A., Ben-Dor, E. and Saaroni, H., 2004, **Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements**, *Energy and Buildings*, 36(11), pp. 1063-1074.
- Chun, B. and Guldmann, J.M., 2014, **spatial statistical analysis and simulation of the urban heat island in high-density central cities**, *Landscape and urban planning*, 125, pp. 76-88.
- Cooper, O.R., Parrish, D.D., Ziemke, J., Balashov, N.V., Cupeiro, M., Galbally, I.E. and Naik, V., 2014, **Global distribution and trends of tropospheric ozone: An observation-based review**, *Elem Sci Anth*, 2.
- De Lucena, A.J., Rotunno Filho, O.C., de Almeida França, J.R., de Faria Peres, L. and Xavier, L.N.R., 2013, **Urban climate and clues of heat island events in the metropolitan area of Rio de Janeiro**, *Theoretical and applied climatology*, 111(3-4), pp. 497-511.
- Estoque, R.C. and Murayama, Y.m., 2017, **Monitoring surface urban heat island formation in a tropical mountain city using Landsat data (1987–2015)**, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 133, pp. 18-29.
- دوره ۴۲، شماره ۲، صص. ۴۵۳-۴۴۱.
- علی آبادی، ک؛ داداشی رودباری، ع، ۱۳۹۶، نقش مؤلفه های جغرافیایی بر چگونگی پراکندگی دمایی در سطوح شهری با استفاده از تکنیک های سنجش از دور مطالعه موردی شهر مشهد، مجله آمایش جغرافیایی فضا، دوره ۷، شماره ۲۴، صص. ۱۳۱-۱۴۲.
- فاطمی، ب. و صدقی، ف، ۱۳۹۵، بررسی مقایسه ای اثر استفاده از مقادیر پیکسل، بازتابش و بازتابندگی در محاسبه شاخص های گیاهی از تصاویر ماهواره ای Landsat8، سنجش از دور و GIS ایران، سال هشتم، شماره ۳، صص. ۱۰۴-۹۱.
- قنبری، ح. و عزیزی، ق، ۱۳۸۸، شبیه سازی عددی آلودگی هوا در تهران بر اساس الگوهای باد به وسیله TAPM، پژوهش های جغرافیای طبیعی، شماره ۶۸، صص. ۱۵-۳۲.
- مهدیان ماهفروزی، م، شمسی پور، ع. و عزیزی، ق، ۱۳۹۴، اثر گسترش فضای سبز بر الگوی جزیره گرمایی شهری (مطالعه موردی: بوستان ولایت)، پژوهش های جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دوره ۳، شماره ۱، صص. ۸۵-۹۹.
- Alghannam, A.R.O. and Al-Qahtnai, M.R.A., 2012, **Impact of vegetation cover on urban and rural areas of arid climates**, *Australian Journal of Agricultural Engineering*, 3(1), 1.
- As-Syakur, A.R., Adnyana, I., Arthana, I.W., and Nuarsa, I.W., 2012, **Enhanced Built-Up and Bareness Index (EBBI) for mapping built-up and bare land in an urban area**, *Remote Sensing*, 4(10), pp. 2957-2970.
- Bokaie, M., Zarkesh, M. K., Arasteh, P.D. and Hosseini, A., 2016, **Assessment of Urban Heat Island based on the relationship between land surface temperature and land use/land cover in Tehran**, *Sustainable Cities and Society*, 23, pp. 94-104.

- Farina, A., 2012, **Exploring the relationship between land surface temperature and vegetation abundance for urban heat island mitigation in Seville, Spain**, LUMA-GIS Thesis.
- FIG, O.S., 2010, **Rapid Urbanization and Mega Cities: The Need for Spatial Information Management**.
- Friedl, M.A., 2002, **forward and inverse modeling of land surface energy balance using surface temperature measurements**, Remote sensing of environment, 79(2), pp. 344-354.
- Gobakis, K., Kolokotsa, D., Synnefa, A., Saliari, M., Giannopoulou, K. and Santamouris, M. 2011, **Development of a model for urban heat island prediction using neural network techniques**, Sustainable Cities and Society, 1(2), pp. 104-115.
- Haashemi, S., Weng, Q., Darvishi, A. and Alavipanah, S. K., 2016, **Seasonal variations of the surface urban heat island in a semi-arid city**, Remote Sensing, 8(4), pp. 352.
- Han-Qiu, X. U., 2005, **A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) [J]**, Journal of Remote Sensing, 5, pp. 589-595.
- Hay, G.J., Blaschke, T., Marceau, D.J. and Bouchard, A., 2003, **A comparison of three image-object methods for the multiscale analysis of landscape structure**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 57(5), pp. 327-345.
- Huang, S.L., Yeh, C.T. and Chang, L. F., 2010, **the transition to an urbanizing world and the demand for natural resources**, Current Opinion in Environmental Sustainability, 2(3), pp. 136-143.
- Landsberg, H.E., 1981, **the urban climate** (Vol. 28), Academic press.
- Li, Z. L., Wu, H., Wang, N., Qiu, S., Sobrino, J. A., Wan, Z. and Yan, G., 2013, **Land surface emissivity retrieval from satellite data**, International Journal of Remote Sensing, 34(9-10), pp.3084-3127.
- Manley, G., 1958, **on the frequency of snowfall in metropolitan England**, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 84(359), pp. 70-72.
- Oke, T.R. and Hannell, F.G., 1970, **the form of the urban heat island in Hamilton, Canada** (Vol. 108, pp. 113-126). WMO Technical Note.
- Owen, T.W., Carlson, T.N. and Gillies, R.R., 1998, **an assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization**, International journal of remote sensing, 19(9), pp. 1663-1681.
- Pan, J., 2016, **Area delineation and spatial-temporal dynamics of urban heat island in Lanzhou City, China using remote sensing imagery**, Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 44(1), pp. 111-127.
- Roberts, D.A., Quattrochi, D.A., Hulley, G.C., Hook, S.J. and Green, R.O., 2012, **Synergies between VSWIR and TIR data for the urban environment: An evaluation of the potential for the Hyperspectral Infrared Imager (HypIRI) Decadal Survey mission**, Remote Sensing of Environment, 117, pp. 83-101.
- Roth, M., 2007, **Review of urban climate research in (sub) tropical regions**, International Journal of Climatology, 27(14), pp. 1859-1873.
- Sheng, L., Tang, X., You, H., Gu, Q. and Hu, H., 2017, **Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China**, Ecological Indicators, 72, pp.738-746.
- Sobrino, J.A., Caselles, V. and Becker, F., 1990, **Significance of the remotely sensed thermal infrared measurements obtained over a citrus orchard**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 44(6), pp. 343-354.
- Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C. and Paolini, L., 2004, **Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5**, Remote Sensing of Environment, 90(4), pp.434-440.
- Son, N.T., Chen, C.F., Chen, C.R., Thanh, B.X. and Vuong, T.H., 2017, **Assessment of**

- urbanization and urban heat islands in Ho Chi Minh City, Vietnam using Landsat data**, Sustainable Cities and Society, 30, pp.150-161.
- Sun, C.Y., Brazel, A.J., Chow, W.T., Hedquist, B.C. and Prashad, L., 2009, **Desert heat island study in winter by mobile transect and remote sensing techniques**. Theoretical and Applied Climatology, 98(3-4), pp. 323-335.
- USGS, 2013, **Using the USGS Landsat 8 Product**, 2015.
- Voogt, J. A. and Oke, T.R., 2003, **Thermal remote sensing of urban climates**, Remote sensing of environment, 86(3), pp. 370-384.
- Weng, Q., Lu, D. and 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.
- Xiong, Y., Huang, S., Chen, F., Ye, H., Wang, C. and Zhu, C., 2012, **the impacts of rapid urbanization on the thermal environment: A remote sensing study of Guangzhou, South China**, Remote Sensing, 4(7), pp. 2033-2056.
- Yengoh, G.T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A.E., and Tucker III, C.J., 2015, **Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales: Current Status, Future Trends, and Practical Considerations**, Springer.
- Zha, Y., GAO, J. and 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.
- Zhang, H., Qi, Z.F., Ye, X.Y., Cai, Y.B., Ma, W.C. and Chen, M. N., 2013, **Analysis of land use/land cover change, population shift, and their effects on spatiotemporal patterns of urban heat islands in metropolitan Shanghai, China**, Applied Geography, 44, pp. 121-133.
- Zhou, Y. and Shepherd, J.M., 2010, **Atlanta's urban heat island under extreme heat conditions and potential mitigation strategies**, Natural Hazards, 52(3), pp. 639-668.



Monitoring the Urban heat islands with a Fractal Net Evolution (FNEA) Approach (Case Study: Tehran Metropolis)

Ahmadi, M.*¹, Dadashiroudbari, A.², Esfandiari, N.³

1-Associate Professor Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2-PhD Student Urban Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3-PhD Student Synoptic Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Abstract

Urban heat islands is the result of urban Climate and one of the important environmental challenges in the 21st century. The aim of this research is to evaluate the combined effects of biophysical components and Land surface temperature with a special Fractal Net Evolution (FNEA) in order to extract the urban heat islands in Tehran. In the first stage, Landsat 8 satellite TIRS 3 images for August, 2013, 2015, and 2015 were calculated for land surface temperature (LST) and the urban heat islands were extracted by adopting a special Fractal Net Evolution (FNEA) Approach. In order to evaluate the role of biophysical components in the formation of urban thermal islands, BI, MNDWI, NDBI, NDVI, SAVI and UI indices were calculated and evaluated. The results showed that there is a negative linear correlation between vegetation and urban heat islands. Also, a strong positive relationship was found between the impenetrable surfaces with urban heat islands in Tehran metropolis. The UHIs of Tehran metropolis with FNEA approach was classified into five categories: cold UHIs, cold second UHIs, medium UHIs, second-order thermal UHIs and warm UHIs, with an average of 95 km² hot warm islands and 73 km² of the total urban heat islands Tehran metropolis. The most important identified UHIs are also in the 1- zone 21 due to the intense focus of most factories, industrial workshops and warehouses; 2- Zone 9 due to the location of Mehrabad airport, terminals of passenger transportation and main access passage; 3- Zone 22 and North Zone 19 is located because of the focus of Barren land and 4- Zone 13 (uncovered land around the former Dashan Tape airport) and the southern regions of Tehran (due to the existence of educational and industrial workshops).

Keywords: Urban heat islands, biophysical components, FNEA approach, Tehran metropolis.