

تحلیل زمانی-مکانی شدت جزیره حرارتی سطحی شهری (SUHII) با استفاده از داده‌های MODIS و مدل رگرسیون تعاملی: مطالعه موردی تهران

نسترن کیش‌مند^۱، علیرضا شریفی^{۲*}، علیرضا وفائی نژاد^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی نقشه‌برداری- دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست- دانشگاه

شهید بهشتی

na.kishmand@mail.sbu.ac.ir

^۲ دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری- دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست- دانشگاه شهید بهشتی

a_sharifii@sbu.ac.ir; a_vafaei@sbu.ac.ir

(دریافت: دی ۱۴۰۴، تصویب: اردیبهشت ۱۴۰۵)

چکیده

پدیده جزیره حرارتی سطحی شهری (SUHII) یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی ناشی از گسترش شهرنشینی است که به‌طور مستقیم بر کیفیت زندگی، مصرف انرژی و سلامت شهری تأثیر می‌گذارد. در این پژوهش، با هدف تحلیل زمانی-مکانی SUHII و شناسایی عوامل مؤثر بر آن، داده‌های دمای سطح زمین حاصل از تصاویر ماهواره‌ای MODIS در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳ برای شهر تهران مورد بررسی قرار گرفت. برای تحلیل اثرات محیطی، از مدل رگرسیون چندمتغیره OLS همراه با ترم‌های تعاملی استفاده شد و آزمون‌های آماری من-کندال و VIF به‌منظور تحلیل روند و تشخیص هم‌خطی متغیرها به کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که شدت SUHII در فصول مختلف دارای الگوهای متفاوتی بوده و تنها در فصل زمستان روند کاهشی معناداری مشاهده شد ($Z = -2.09, p = 0.037$). شاخص‌های AOD (آلودگی هوا) و NDVI (پوشش گیاهی) بیشترین تأثیر را بر شدت گرمایش شهری داشتند و ترکیب تعاملی $AOD \times WSA$ نیز اثر افزایشی معناداری نشان داد. یکی از نوآوری‌های پژوهش حاضر، تمرکز بر تحلیل فصلی بلندمدت به همراه ارزیابی اثرات ترکیبی متغیرهاست؛ رویکردی که در اغلب مطالعات پیشین مغفول مانده یا به‌صورت تجمیعی انجام شده است. همچنین، نتایج نشان داد که روش آماری رگرسیون تعاملی، با وجود محدودیت‌هایی نظیر فقدان داده‌های ترافیک یا اطلاعات کالبدی ساختمان‌ها، می‌تواند در مقیاس شهری دقت بیشتری در تحلیل روابط علی فراهم آورد. یافته‌های این تحقیق تأکید می‌کنند که تفسیر رفتار دمایی شهر نیازمند توجه به تعاملات پیچیده میان متغیرهای محیطی و انسانی است. در آینده، گسترش تحلیل‌های میان‌رشته‌ای با تلفیق داده‌های انسانی نظیر ترافیک، مصرف انرژی و طراحی شهری، می‌تواند درک کامل‌تری از سازوکار SUHII و راهکارهای مقابله با آن فراهم آورد.

واژگان کلیدی: جزیره حرارتی سطحی شهری، تحلیل تعاملی، رگرسیون چندمتغیره، AOD، WSA.

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، توسعه شتابان شهرنشینی به‌عنوان یکی از بارزترین پدیده‌های جهانی، موجب تغییرات چشمگیر در الگوهای سکونت، بهره‌برداری از منابع و ساختار اکولوژیک زمین شده‌است. امروزه بیش از نیمی از جمعیت جهان (حدود ۵۵ درصد) در مناطق شهری زندگی می‌کنند، مناطقی که کمتر از ۳ درصد از سطح خشکی زمین را پوشش می‌دهند ولی مسئول حدود ۷۵ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن و تا ۸۰ درصد مصرف انرژی جهانی هستند [۱]. چنین تغییراتی، ضمن تشدید بحران‌های زیست‌محیطی، منجر به پدیده‌ای با عنوان جزیره حرارتی شهری^۱ شده‌اند. این پدیده بیانگر شرایطی است که مناطق شهری دمایی به‌مراتب بالاتر از محیط‌های طبیعی اطراف خود تجربه می‌کنند [۲-۴]. منشأ این تفاوت حرارتی، به کاهش پوشش گیاهی، افزایش سطوح مصنوعی و نفوذناپذیر، و تولید گرما ناشی از فعالیت‌های انسانی برمی‌گردد [۲، ۴، ۵]. پیامدهای منفی ناشی از این افزایش دما بسیار گسترده است و شامل کاهش کیفیت هوا و آب، افزایش مصرف انرژی و تهدید سلامت عمومی شهروندان می‌شود [۲، ۶، ۷]. بنابراین، دستیابی به شناخت عمیق‌تر و دقیق‌تر از الگوهای زمانی-مکانی شدت جزیره حرارتی شهری و عوامل تأثیرگذار بر آن، به‌منظور برنامه‌ریزی مؤثر شهری و دستیابی به اهداف توسعه پایدار ضروری است [۶-۸].

در این میان، استفاده از فناوری‌های نوین همچون سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی^۲ و سنجش‌ازدور^۳ به‌دلیل توانایی بالای آن‌ها در پایش و تحلیل داده‌های مکانی و زمانی، امری حیاتی است. این فناوری‌ها امکان بررسی دقیق‌تر و جامع‌تر الگوهای حرارتی شهری را در مقیاس‌های مختلف فراهم کرده و نقش مؤثری در شناسایی روندها و عوامل مؤثر بر پدیده جزیره حرارتی ایفا می‌کنند [۵، ۹].

با توجه به اهمیت موضوع و نقش کلیدی فناوری‌های نوین در این حوزه، در گام نخست مروری بر مطالعات انجام‌شده درباره این پدیده صورت می‌گیرد.

در سطح بین‌المللی، مطالعات متعددی بر بررسی شدت، توزیع و روند تغییرات SUHII^۴ متمرکز شده‌اند. زرگری و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS^۵ در تهران، نشان دادند SUHII در دو دهه اخیر (۲۰۰۳-۲۰۲۱) به‌طور میانگین ۱/۴۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است [۱۰]. اصلانی و همکاران (۲۰۲۵) نیز با رویکرد محله‌محور و مدل رگرسیون چندمتغیره به این نتیجه رسیدند که تراکم جمعیت و آلودگی ذرات معلق مهم‌ترین عوامل افزایش شدت جزیره حرارتی در تهران هستند [۱۱]. ژانگ و همکاران (۲۰۲۵) با تحلیل داده‌های MODIS و مدل OLS در چین گزارش کردند که افزایش رطوبت و بارش موجب کاهش شدت SUHII می‌شود [۱۲].

دنگ و همکاران (۲۰۲۴) در بررسی ۷۱۷ شهر جهانی، شدت میانگین سالانه SUHII را 0.25 ± 3.45 درجه سانتی‌گراد برآورد کرده و دریافتند این شدت در نواحی استوایی بیشتر است [۶]. جهانگیر و همکاران (۲۰۲۴) با مطالعه مناطق تهران نشان دادند که بام‌های سبز می‌توانند به‌طور قابل توجهی از شدت جزیره حرارتی بکاهند [۱۳].

پنگ و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی ۱۸۰ شهر در حال کوچک‌شدن در چین گزارش کردند که تغییرات زمانی-مکانی در شدت SUHII تابع روندهای شهری و اقلیمی است [۳]. مفتاحی و همکاران (۲۰۲۲) نیز با تحلیل داده‌های ماهواره‌ای MODIS و لندست در تهران، نشان دادند که افزایش تراکم ساختمانی و کاهش پوشش گیاهی^۶ موجب افزایش چشمگیر شدت SUHII شده است [۱۴].

تانگ و همکاران (۲۰۲۱) در چین از مدل رگرسیون وزندار جغرافیایی^۷ استفاده کرده و نشان دادند که کاهش NDVI و روشنایی مصنوعی در شب از عوامل اصلی افزایش شدت SUHII هستند [۱۵]. Liu و همکاران (۲۰۲۱) نیز با استفاده از رگرسیون OLS^۸ تعاملی در ۱۲۸۸ شهر چین نتیجه گرفتند که فرم شهری بی‌نظم در شهرهای بزرگ‌تر منجر به کاهش شدت SUHII می‌شود [۱۶]. Oliveira و همکاران (۲۰۲۱) در لیسبون با مدل تعاملی نشان دادند که سرعت باد و فرم شهری، تأثیر قابل توجهی در تغییر شدت SUHII دارند [۱۷].

۵ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

۶ Normalized Difference Vegetation Index

۷ MGWR

۸ Ordinary Least Squares regression

۱ Keyhole Markup Language

۲ GIS

۳ Remote Sensing

۴ Surface Urban Heat Island Intensity

Wang و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی سه کلانشهر در امتداد رودخانه یانگتسه، با استفاده از مدل رگرسیون OLS نشان دادند که ترکیب و پیکربندی فضای شهری، نقش تعیین کننده‌ای در شدت SUHII دارد [۱۸]. He و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای گسترده روی ۱۴۴۹ شهر چین با مدل OLS دریافتند که مساحت شهر و عمق نوری آئروسول^۹ بیشترین تأثیر را در شدت جزیره حرارتی شهری دارند [۱۹]. با وجود رشد کمی قابل توجه در مطالعات مرتبط با جزیره حرارتی سطحی شهری، همچنان برخی خلأهای مفهومی و روش‌شناختی در این حوزه وجود دارد که پژوهش حاضر در تلاش است آن‌ها را هدف قرار دهد. نوآوری نخست این پژوهش در رویکرد تحلیلی آن نهفته است؛ به‌طوری که به جای تکیه صرف بر تأثیرات مستقیم متغیرهای محیطی، به شناسایی و تبیین اثرات تعاملی میان شاخص‌های کلیدی مؤثر بر SUHII پرداخته شده است. اگرچه در برخی مطالعات بین‌المللی به‌طور محدود از مدل‌های تعاملی استفاده شده [۲، ۷]، اما در پژوهش‌های داخل کشور، به‌ویژه در زمینه تحلیل هم‌زمان آلاینده‌های جوی و ویژگی‌های سطحی، چنین تمرکزی کمتر به چشم می‌خورد. این پژوهش با وارد کردن ترم‌های تعاملی در قالب رگرسیون چندمتغیره، نشان می‌دهد که برخی متغیرها نظیر AOD و WSA^{۱۰}، زمانی که هم‌زمان در سطوح بالا قرار دارند، اثر هم‌افزا و تقویتی بر شدت SUHII خواهند داشت. چنین تحلیلی به درک دقیق‌تری از پویایی گرمایش شهری در تهران کمک می‌کند؛ تحلیلی که از سطح همبستگی خطی صرف فراتر رفته است.

نوآوری دوم پژوهش، در ترکیب تحلیل آماری با تفکیک فصلی بلندمدت نمایان می‌شود. برخلاف بیشتر مطالعات گذشته که عمدتاً با دوره‌های زمانی کوتاه یا فاقد تفکیک فصلی انجام شده‌اند [۳، ۵، ۲۰]، این تحقیق با اتکا به داده‌های ۲۲ ساله MODIS، روند و شدت SUHII را به تفکیک چهار فصل بررسی کرده است. این رویکرد فصلی، امکان تفکیک تأثیر عوامل اقلیمی را در مقاطع مختلف سال فراهم می‌سازد و نشان می‌دهد که، برخلاف تصور عمومی، الگوهای تغییر دمای سطح در همه فصول یکسان و یکنواخت نیستند. به‌ویژه، شناسایی یک روند کاهشی معنادار در فصل زمستان، یکی از نتایج قابل توجهی است که در پرتو این تحلیل تفکیکی

به‌دست آمده و در بسیاری از مطالعات پیشین به‌صورت تجمیعی پنهان مانده است.

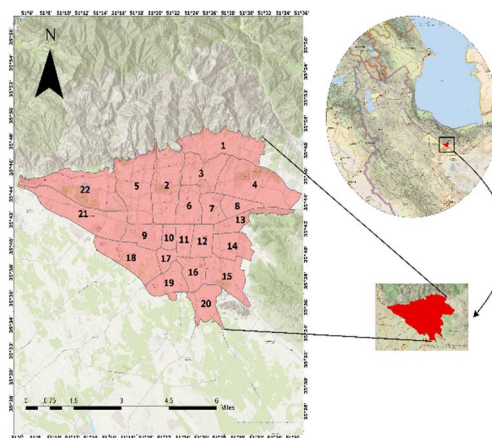
با توجه به آنچه گفته شد، این پژوهش با هدف تحلیل جامع زمانی-مکانی جزیره حرارتی سطحی شهری در یکی از مناطق کلان‌شهر تهران، و با استفاده از داده‌های دمای سطحی ماهواره MODIS طی یک بازه زمانی بلندمدت طراحی شده است. هدف نهایی پژوهش، شناسایی عوامل اصلی مؤثر بر شدت SUHII، تبیین سازوکارهای مکانی آن، و ارائه راهکارهایی برای تعدیل اثرات این پدیده در بسترهای سیاست‌گذاری شهری و اقلیمی است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

شهر تهران به‌عنوان پایتخت ایران و یکی از مهم‌ترین و پرجمعیت‌ترین کلان‌شهرهای کشور، نقش اساسی در توسعه سیاسی، اقتصادی و اجتماعی کشور ایفا می‌کند. این شهر در طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۳ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی واقع شده و با جمعیتی بالغ بر ۹ میلیون نفر در محدوده شهری، از پرتراکم‌ترین و پرمخت‌وسازترین مناطق شهری در خاورمیانه به‌شمار می‌رود (شکل-۱). رشد سریع جمعیت، مهاجرت‌های گسترده و گسترش روزافزون شهرنشینی در چند دهه اخیر، منجر به تغییرات قابل توجهی در کاربری اراضی، پوشش سطح زمین و اقلیم محلی این شهر شده است. این تحولات، به‌ویژه در مناطق مرکزی و حاشیه‌ای تهران، به شکل‌گیری پدیده‌ای موسوم به جزیره حرارتی شهری منجر شده‌اند. از نظر جغرافیایی و اقلیمی، شهر تهران دارای تنوع قابل توجهی است. مناطق شمالی آن، به‌ویژه ارتفاعات منتهی به شمیرانات، اقلیمی کوهستانی و معتدل دارند، در حالی که نواحی جنوبی مانند بخش‌هایی از ری و اسلام‌شهر، اقلیمی گرم‌تر و خشک‌تر را تجربه می‌کنند. این تنوع، در کنار کاهش پوشش گیاهی، افزایش سطوح نفوذناپذیر و تمرکز فعالیت‌های انسانی، شرایط را برای تشدید گرمایش سطحی در شهر فراهم کرده است. با توجه به اثرات مستقیم افزایش دمای سطح زمین بر سلامت، انرژی و کیفیت زندگی شهروندان، پایش و تحلیل جزایر

حرارتی شهری در تهران نه تنها ضرورتی پژوهشی، بلکه اولویتی زیست‌محیطی برای مدیریت شهری محسوب می‌شود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

۲-۲- مجموعه داده

برای بررسی شدت جزیره حرارتی شهری در این مطالعه، از داده‌های دمای سطح زمین^{۱۱} مربوط به محصولات سنجنده MODIS استفاده شده است که یکی از سنجنده‌های کاربرد و معتبر در مطالعات محیط‌زیستی و اقلیمی است. داده‌های MODIS از دو ماهواره Terra و Aqua جمع‌آوری شده‌اند که به ترتیب در ساعت ۱۰:۳۰ و ۱۳:۳۰ به وقت محلی سطح زمین را تصویربرداری می‌کنند. داده‌های در دسترس شامل محصولات MOD11A2 (مربوط به ماهواره Terra) و MYD11A2 (مربوط به ماهواره Aqua) هستند که به صورت روزانه و ترکیبی ۸ روزه با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر ارائه شده‌اند. داده‌های LST حاصل از MOD11A2 به دلیل برخورداری از سری زمانی طولانی‌تر، برای تحلیل‌های بین‌سالی^{۱۲} بسیار مناسب هستند؛ در حالی که داده‌های MYD11A2 به زمان‌های اوج و حداقل دما در چرخه روزانه نزدیک‌ترند و برای تحلیل‌های مربوط به شدت جزایر حرارتی در طول روز و شب کاربرد بیشتری دارند [۹، ۲۱].

محصول مورد استفاده در این پژوهش، MYD11A2 بوده که به صورت ترکیب‌های میانگین‌گیری ۸ روزه از دمای سطح زمین در دو بازه زمانی روز و شب ثبت شده‌اند. بازه زمانی مورد بررسی، از ژانویه ۲۰۰۲ تا ژانویه ۲۰۲۴ می‌باشد

که در مجموع بیش از ۲۰ سال داده را در بر می‌گیرد. این داده‌ها با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر و پوشش زمانی مستمر، گزینه‌ای مناسب برای تحلیل‌های بلندمدت حرارتی به‌شمار می‌روند. دوره‌ی زمانی مورد بررسی در این مطالعه، ژانویه ۲۰۰۲ تا ژانویه ۲۰۲۴ را در بر می‌گیرد و در مجموع، شامل بیش از ۲۰ سال داده مستمر از دمای سطح زمین است. پوشش زمانی طولانی، به‌همراه وضوح مکانی مناسب و کیفیت بالای داده‌ها، موجب شده تا محصول MYD11A2 به‌عنوان یکی از منابع معتبر و مناسب برای تحلیل‌های حرارتی در مقیاس‌های بلندمدت و منطقه‌ای در نظر گرفته شود.

۲-۳- روش شناسی پژوهش

برای محاسبه شدت جزیره حرارتی سطحی شهری، لازم است دمای میانگین مناطق شهری با دمای مناطق غیرشهری یا به‌اصطلاح «روستایی» مقایسه شود. در این پژوهش، مرزهای محدوده شهری تهران به‌عنوان منطقه شهری در نظر گرفته شد. به‌منظور تعیین پس‌زمینه روستایی پایدار، از یک ناحیه حائل با فاصله ۱۰ کیلومتری از مرز شهر استفاده شد. این روش، که با عنوان equidistant buffer شناخته می‌شود، در بسیاری از مطالعات مشابه نیز به کار رفته و قادر است اثرات حرارتی فراتر از محدوده فیزیکی شهر را کاهش دهد [۲].

۲-۳-۱- پیش‌پردازش داده‌های دمای سطح زمین MODIS

در مرحله پیش‌پردازش، ابتدا داده‌ها با اعمال فیلتر مکانی و زمانی مورد نظر انتخاب شده و سپس پیکسل‌هایی که دارای پوشش ابری بودند، با استفاده از لایه کیفیت حذف شدند. پس از آن، مقادیر دیجیتال (DN) به دمای واقعی سطح زمین بر حسب درجه سلسیوس تبدیل شدند. این تبدیل بر اساس فرمول استاندارد MODIS صورت گرفت:

$$T = DN \times 0.02 - 273.15 \quad (1)$$

۲-۳-۲- محاسبه شدت جزیره حرارتی سطحی شهری (SUHI)

شدت جزیره حرارتی سطحی شهری^{۱۳} برای هر شهر با استفاده از داده‌های ترکیبی پیش‌پردازش‌شده دمای سطح

۱۳ Surface Urban Heat Island Intensity

۱۱ Land Surface Temperature

۱۲ interannual

زمین به صورت سالانه و فصلی محاسبه می شود. روش کار به این صورت است که میانگین دمای ناحیه پس زمینه روستایی از دمای ناحیه شهری کم می شود. فرمول محاسبه به شکل زیر است:

$$SUHII_u = T_u - \frac{\sum_{s=1}^n T_s}{n} \quad (2)$$

در این فرمول، $SUHII_u$ نشان دهنده شدت پدیده در هر پیکسل شهری (بر حسب درجه سلسیوس) است، T_u دمای سطحی پیکسل مربوط به منطقه شهری را نشان می دهد، و T_s نمایانگر دمای سطحی پیکسل s ام در ناحیه پس زمینه روستایی است و n بیانگر تعداد کل پیکسل های مورد استفاده در مناطق شهری و روستایی، به صورت جداگانه، می باشد. در این پژوهش، این محاسبه به صورت جداگانه برای هر فصل و طی یک دوره ۲۳ ساله انجام شد تا روندهای زمانی و تغییرات فصلی $SUHII$ در شهر تهران بررسی شود.

در هر فصل، میانگین دمای سطح زمین در منطقه شهری و ناحیه روستایی به طور جداگانه محاسبه شد و اختلاف میان آن ها به عنوان $SUHII$ در نظر گرفته شد. این مقدار نمایانگر میزان گرمایش اضافی ناشی از توسعه شهری در مقایسه با مناطق طبیعی اطراف است. برای تحلیل دقیق تر شدت گرمای شهری، مقادیر محاسبه شده $SUHII$ در این پژوهش بر اساس سیستم طبقه بندی شدت، در قالب هفت درجه حرارتی از "جزیره حرارتی قوی" تا "جزیره سرمای قوی" دسته بندی شدند. جدول ۱- بازه های عددی هر یک از این درجات را نشان می دهد.

جدول ۱- سیستم طبقه بندی شدت $SUHII$.

بازه $SUHII$	بازه دمایی $SUHII$ ($^{\circ}C$)
Strong Cold Island	$SUHII \leq -5^{\circ}C$
Moderate Cold Island	$-5^{\circ}C < SUHII \leq -3^{\circ}C$
Weak Cold Island	$-3^{\circ}C < SUHII \leq -1^{\circ}C$
No Clear Cold/Hot Island	$-1^{\circ}C < SUHII < 1^{\circ}C$
Weak Hot Island	$1^{\circ}C \leq SUHII < 3^{\circ}C$
Moderate Hot Island	$3^{\circ}C \leq SUHII < 5^{\circ}C$
Strong Hot Island	$5^{\circ}C \leq SUHII$

۳-۳-۲- آزمون من-کندال برای تحلیل روند زمانی

برای بررسی روند تغییرات شدت $SUHII$ در طول زمان، از آزمون Mann-Kendall استفاده شد. این آزمون یک روش آماری ناپارامتری است که به منظور شناسایی روندهای صعودی یا نزولی در داده های سری زمانی به کار می رود، بدون اینکه فرضی در مورد توزیع نرمال داده ها داشته باشد یا نیاز به رابطه خطی بین مقادیر باشد. همچنین این آزمون نسبت به داده های گمشده و نقاط پرت حساسیت ندارد.

فرضیه صفر (H_0) در این آزمون، بیان می کند که داده های سری زمانی ($SUHII$ سالانه) دارای توزیع تصادفی و بدون روند مشخص هستند. در مقابل، فرضیه مقابل (H_1) نشان دهنده وجود روند افزایشی یا کاهشی معنادار در سری زمانی است [۲].

آمار آزمون به صورت زیر محاسبه می شود:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(x_k - x_i) \quad (3)$$

که در آن، x_k و x_i به ترتیب مقادیر $SUHII$ در سال های k و i هستند و تابع sgn اختلاف بین دو مقدار از سری زمانی را ارزیابی می کند و تنها علامت تغییر را مشخص می سازد که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{sgn}(x_k - x_i) = \begin{cases} 1, & x_k - x_i > 0 \\ 0, & x_k - x_i = 0 \\ -1, & x_k - x_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

اگر مقدار سال k بیشتر از مقدار سال i باشد، مقدار تابع برابر با ۱ (افزایشی) است؛ اگر کمتر باشد، برابر با -۱ (کاهش) خواهد بود؛ و اگر مقادیر برابر باشند، مقدار تابع صفر (بدون تغییر) است.

همچنین، واریانس آماره S نیز به شکل زیر تعریف می شود که در آن t تعداد مقادیر داده است:

$$\text{var}[S] = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)]}{18} \quad (5)$$

در ادامه، آماره Z_c برای بررسی سطح معناداری روند با استفاده از مقادیر S و $\text{var}[S]$ مطابق فرمول زیر محاسبه می شود:

پیش از اجرای مدل رگرسیونی، تمامی متغیرها با استفاده از روش نرمال‌سازی خطی مقیاس‌گذاری شدند تا اثر تفاوت ابعادی بین متغیرها در ضرایب مدل کاهش یابد. فرمول نرمال‌سازی به‌صورت زیر است:

$$Y_i = \frac{X_i - X_{MIN}}{X_{MAX} - X_{MIN}} \quad (9)$$

که در آن، X_i مقدار اولیه هر متغیر، و X_{MAX} و X_{MIN} به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار آن هستند. مدل رگرسیونی کلی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (10)$$

در این پژوهش، SUHII به‌عنوان متغیر وابسته مدل در نظر گرفته شده است. متغیرهای x_1 تا x_n به‌عنوان متغیرهای مستقل، بیانگر شاخص‌های محیطی مؤثر مانند WSA، NDVI، AOD، β_1 تا β_n نقش هر متغیر مستقل را در تبیین تغییرات SUHII نشان می‌دهند. مقدار β_0 عرض از مبدأ مدل بوده و ε نمایانگر مؤلفه خطا یا اختلال مدل است که تفاوت بین مقادیر مشاهده‌شده و مقادیر پیش‌بینی‌شده را در بر می‌گیرد [23].

۲-۳-۶- مدل تعاملی در رگرسیون چندمتغیره

مدل پایه رگرسیون چندمتغیره طبق معادله (۱۰) تعریف شد. به‌منظور بررسی اثرات ترکیبی و غیرخطی میان متغیرهای مستقل، مدل پایه طبق رابطه (۱۰) توسعه یافته و ترم تعاملی^{۱۷} بین جفت متغیرها افزوده می‌شود. ساختار کلی این مدل گسترش‌یافته مطابق [] در قالب رگرسیون چندمتغیره تعدیل‌شده^{۱۸} به‌صورت زیر تعریف می‌شود [24]:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 (x_1 \times x_2) + \varepsilon \quad (11)$$

در این مدل، x_1 و x_2 دو متغیر مستقل هستند، $(x_1 \times x_2)$ ترم تعاملی بین آن‌ها، و β_3 ضریب اثر ترکیبی این دو متغیر است. این ساختار امکان تحلیل دقیق‌تری از اثرات هم‌زمان و وابسته متغیرها را فراهم می‌سازد که در مدل پایه پوشش داده نمی‌شوند.

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

اگر مقدار $|Z_c|$ بیشتر از ۱.۲۸، ۱.۶۴ و ۲.۳۲ باشد، به ترتیب نشان‌دهنده معناداری آماری در سطح اطمینان ۹۰٪، ۹۵٪ و ۹۹٪ خواهد بود. در این پژوهش، این آزمون برای مقادیر میانگین SUHII فصلی طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳ انجام گرفت تا روندهای زمانی معنی‌دار در فصول مختلف شناسایی شود.

۲-۳-۴- آزمون هم‌خطی چندگانه

هم‌خطی چندگانه^{۱۴} زمانی رخ می‌دهد که سه یا بیش از سه متغیر مستقل دارای هم‌بستگی بالا با یکدیگر باشند، که این پدیده می‌تواند موجب ناپایداری ضرایب مدل رگرسیون و افزایش واریانس خطا شود [2]. برای سنجش شدت هم‌خطی، از دو شاخص آماری درجه تحمل^{۱۵} و ضریب تورم واریانس^{۱۶} استفاده می‌شود. به‌طور دقیق، مقدار Tolerance و VIF برای یک متغیر مستقل برابر است با [22]:

$$\text{Tolerance} = \text{TOL} = 1 - R^2 \quad (7)$$

$$\text{VIF} = \frac{1}{\text{TOL}} = \frac{1}{1 - R^2} \quad (8)$$

در این روابط، R^2 ضریب تعیین حاصل از رگرسیون آن متغیر روی سایر متغیرها است.

۲-۳-۵- رگرسیون خطی چند متغیره

به‌منظور بررسی تأثیر عوامل محیطی مختلف بر شدت جزیره حرارتی سطحی، از مدل رگرسیون خطی چندمتغیره استفاده شد. این روش، یکی از پرکاربردترین مدل‌های آماری در تحلیل‌های محیط‌زیستی است که با حداقل‌سازی مجموع مربعات خطاها، بهترین رابطه خطی بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل را برآورد می‌کند.

^{۱۷} Interaction Term

^{۱۸} Moderated Multiple Regression

^{۱۴} Multicollinearity

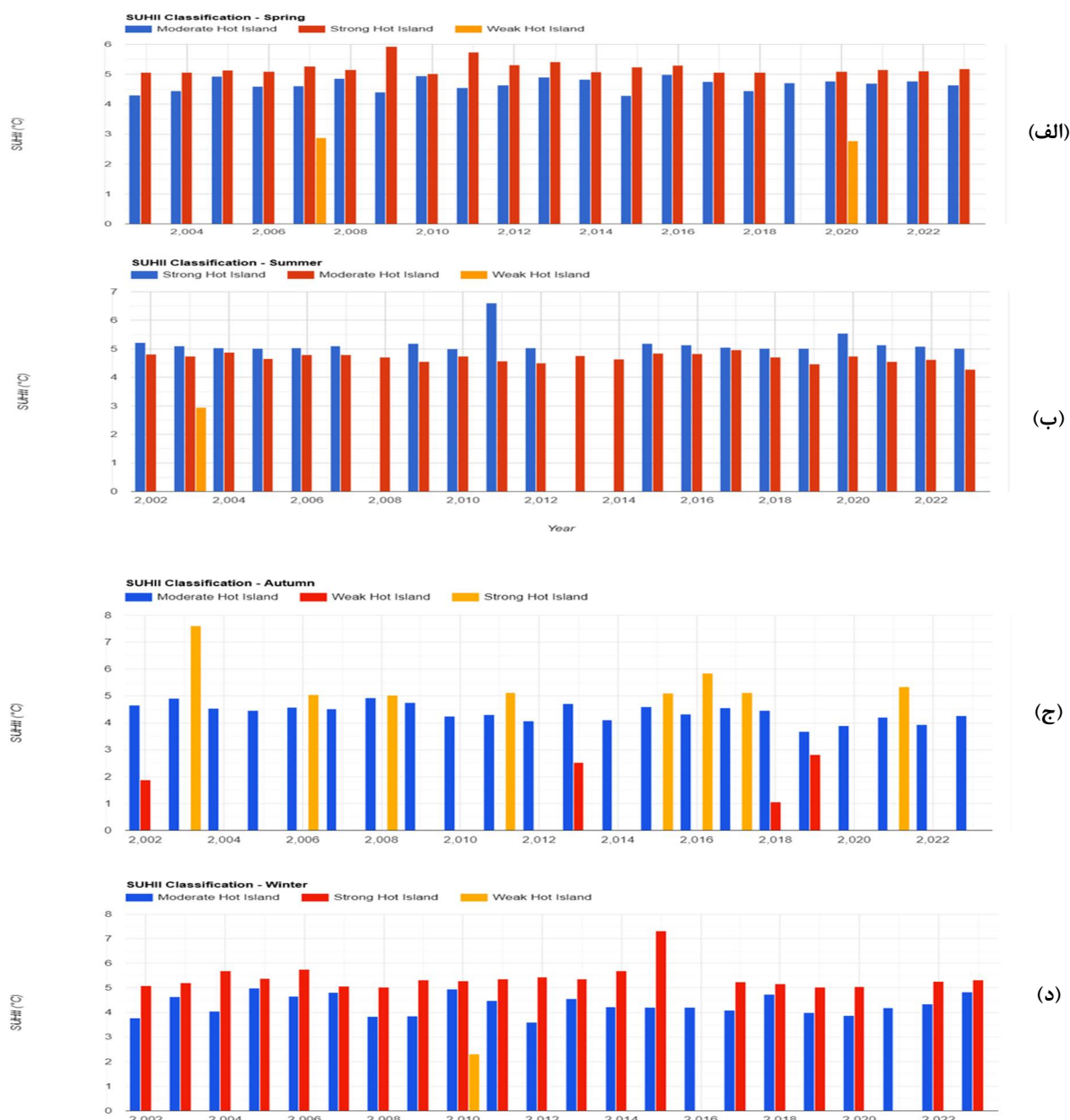
^{۱۵} Tolerance

^{۱۶} Variance Inflation Factor - VIF

۳- نتایج و بحث

یافته‌های این پژوهش نشان داد که شدت SUHII در منطقه مورد مطالعه طی بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳ با نوسانات مشخصی همراه بوده و در فصول مختلف، الگوهای زمانی و مکانی متفاوتی از خود نشان داده است (شکل-۲).

برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین مانند [۱] که به‌طور کلی به تحلیل سالانه SUHII پرداخته‌اند، این تحقیق با تفکیک فصلی دقیق، امکان بررسی دقیق‌تر رفتارهای فصلی پدیده را فراهم کرده و نشان داده که تنها در فصل زمستان، روند کاهشی SUHII از نظر آماری معنادار بوده است.



شکل ۲- توزیع مکانی شدت SUHII در فصول مختلف (میانگین ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳): (الف) بهار، (ب) تابستان، (ج) پاییز، (د) زمستان

در فصل بهار، SUHII در سال‌های ابتدایی عمدتاً بین ۱ تا ۱.۵ درجه سانتی‌گراد بوده و از حدود سال ۲۰۱۲ به تدریج افزایش یافته و به حدود ۲ درجه در سال‌های پایانی رسیده است. با این حال، آزمون من-کندال نشان داد که این روند

افزایشی از نظر آماری ($Z = +0.51, p = 0.608$) معنادار نبوده است. نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده نیز نشان دادند که بخش اعظم شهر در این فصل در طبقه "Moderate Heat"

"Island" قرار داشته و تنها در برخی نقاط کوچک، لکه‌هایی با شدت بالا^{۱۹} مشاهده شده‌اند.

این الگو از نظر مکانی با [۱۲] همخوانی دارد که روند فصلی SUHII در مناطق شمالی چین را نیز عمدتاً غیرمعدنار اما تدریجاً افزایشی گزارش کرده است.

SUHII در تابستان، در سال‌های ابتدایی به‌طور مداوم بالای ۲ درجه سانتی‌گراد بوده و در برخی سال‌ها به حدود ۲.۵ درجه نیز رسیده است. اما از حدود سال ۲۰۱۰ به بعد، یک روند نزولی تدریجی آغاز شده که تا پایان دوره ادامه یافته و به زیر ۲ درجه رسیده است. این تغییر، اگرچه از نظر آماری دقیقاً در آستانه معناداری قرار دارد ($Z = -1.75$, $p = 0.080$)، ولی کاهش محسوس شدت گرمایش تابستانی را نمی‌توان نادیده گرفت. نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده نیز این کاهش را تأیید کرده‌اند؛ به‌طوری‌که مناطق دارای "Hot Heat Island" به تدریج جای خود را به طبقات متوسط و ضعیف داده‌اند. نتایج پژوهش لیو و همکاران (۲۰۲۱) نیز به کاهش SUHII در اثر تغییر فرم شهری و سیاست‌های زیست‌محیطی در برخی شهرهای چین اشاره دارد که با یافته‌های حاضر هم‌راستا است.

در فصل پاییز، SUHII با نوسانات زیاد بین‌سالی همراه بوده است. در برخی سال‌ها شدت آن تا حدود ۲ درجه افزایش و در سال‌های دیگر کاهش یافته است. نمودار زمانی روندی مشخص و پیوسته را نشان نمی‌دهد و آزمون من-کندال نیز عدم معناداری را تأیید می‌کند ($Z = -1.18$, $p = 0.236$). الگوی مکانی پاییز نیز توزیعی پراکنده و متغیر را نشان می‌دهد. چنین بی‌ثباتی را می‌توان ناشی از تأثیر متغیرهایی چون پوشش گیاهی فصلی، الگوهای بارش پاییزی و ساخت‌وسازهای فصلی دانست. یافته‌های مشابهی در [۳] در زمینه شهرهای با اقلیم نیمه‌خشک نیز گزارش شده است.

در زمستان، SUHII در آغاز دوره اغلب بالاتر از ۲ درجه بوده، اما به تدریج کاهش یافته و در سال‌های پایانی به کمتر از ۱.۵ درجه می‌رسد. این تنها فصلی است که روند کاهشی معنادار آماری در آن ثبت می‌شود ($Z = -2.09$, $p = 0.037$). نقشه‌های شدت نیز نشان دادند که گستره مناطق با شدت بالا کاهش یافته و سهم طبقات "Moderate" و "Weak" افزایش یافته است.

این روند می‌تواند تحت تأثیر عواملی چون کاهش تابش خورشیدی، کاهش فعالیت‌های حرارتی انسان‌ساخت، و

شرایط اقلیمی پایدارتر زمستان تهران باشد. ژنگ و همکاران (۲۰۲۵) نیز در تحلیل مناطق شمالی چین به چنین کاهشی در فصل زمستان اشاره کرده‌اند [۱۲].

از منظر روش‌شناسی، این پژوهش با بهره‌گیری از مدل رگرسیون چندمتغیره با ترم‌های تعاملی، گامی فراتر از مطالعاتی مانند [۵] و [۹] برداشته است که صرفاً از مدل‌های خطی ساده برای بررسی اثر مستقیم متغیرها استفاده کرده بودند. در این پژوهش، نتایج مدل اولیه نشان داد که AOD و NDVI به ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی بر SUHII دارند. همچنین، در مدل تعاملی، ترکیب $AOD \times WSA$ از نظر آماری معنادار بود ($p < 0.05$) و نشان داد که افزایش هم‌زمان آلودگی هوا و بازتاب سطحی می‌تواند به‌صورت هم‌افزا شدت جزیره حرارتی را افزایش دهد. سایر ترکیب‌ها مانند $AOD \times NDVI$ یا $WSA \times RH$ گرایش به معناداری داشتند اما به سطح استاندارد نرسیدند.

آزمون VIF نیز تأیید کرد که هم‌خطی میان متغیرهای مستقل پایین و در سطح قابل قبول بود ($VIF < 10$). این مقدار مطابق با حدود قابل پذیرش در [۱] است و بیانگر پایداری آماری مدل و تفسیرپذیری ضرایب است. همچنین، در مقایسه با مدل Geodetector استفاده‌شده در [۹]، که بیشتر بر تحلیل هم‌پراکندگی مکانی تأکید دارد، مدل رگرسیونی این پژوهش از نظر دقت آماری در سطح خردمقیاس شهری برتری دارد؛ گرچه در شناسایی الگوهای منطقه‌ای وسیع‌تر ممکن است محدودتر باشد.

با وجود این مزایا، این پژوهش محدودیت‌هایی نیز دارد. مهم‌ترین آن‌ها، نبود داده‌های ترافیک، مصرف انرژی، یا منابع حرارتی انسانی است. پژوهش‌هایی مانند [۱۷] نشان داده‌اند که ترافیک و فعالیت‌های شبانه تأثیر قابل توجهی بر SUHII دارند. چنانچه داده‌های ترافیکی قابل اتکا در دسترس می‌بود، امکان تحلیل بهتر این متغیرها فراهم می‌شد. همچنین، عدم دسترسی به داده‌های دقیق کالبدی مانند ارتفاع ساختمان‌ها، تراکم ساخت‌وساز و سطح نفوذناپذیر، موجب شد شاخص‌های کالبدی در مدل وارد نشوند؛ در حالی که مطالعاتی مانند [۷] و [۱۳] اهمیت این متغیرها را در تقویت یا تضعیف SUHII به‌وضوح بیان کرده‌اند.

با وجود این محدودیت‌ها، می‌توان گفت که پژوهش حاضر از نظر دقت آماری، تفکیک فصلی و تحلیل‌های تعاملی، گامی نوآورانه در ادامه جریان مطالعات SUHII در ایران و

منطقه به‌شمار می‌رود. بهره‌گیری از داده‌های MODIS با پوشش زمانی بالا، تحلیل آماری در چهار فصل، و بررسی اثرات ترکیبی متغیرها، پژوهش را از قالب توصیفی رایج فراتر برده و به مدلی قابل تکرار و قابل اعتماد در دیگر مناطق شهری مشابه تبدیل کرده است.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تحلیل زمانی-مکانی شدت جزیره حرارتی سطحی شهری در شهر تهران، طی بازه‌ای ۲۲ ساله (۲۰۰۲-۲۰۲۳)، طراحی و اجرا شد. داده‌های دمایی از تصاویر ماهواره‌ای MODIS استخراج شد و با تلفیق آن با شاخص‌های محیطی نظیر AOD، NDVI، WSA، بارش و رطوبت نسبی، مدل رگرسیون چندمتغیره با ترم‌های تعاملی تدوین گردید. همچنین، آزمون‌های آماری من-کندال و VIF برای تحلیل روند زمانی و سنجش هم‌خطی بین متغیرها استفاده شدند.

نتایج نشان دادند که شدت SUHII در تهران دارای الگوی فصلی مشخص است. تنها در فصل زمستان روند کاهشی معناداری مشاهده شد، در حالی‌که در سایر فصول یا افزایش ملایم، یا نوسانات ناپایدار حاکم بوده است. در مدل‌سازی، شاخص‌های AOD و NDVI بیشترین تأثیر را داشتند؛ آلودگی هوا موجب افزایش شدت SUHII و پوشش گیاهی موجب کاهش آن شد. تحلیل تعاملی نیز نشان داد که اثر هم‌زمان آلودگی و بازتاب سطحی ($AOD \times WSA$) به‌طور

منابع

معناداری باعث افزایش شدت گرمایش شهری می‌شود؛ نتیجه‌ای که در پژوهش‌های داخل کشور تاکنون مورد توجه قرار نگرفته بود.

با این حال، باید توجه داشت که کاهش SUHII در برخی فصول الزاماً به معنای بهبود پایداری حرارتی شهری نیست. کاهش شدت SUHII ممکن است ناشی از عوامل تصادفی یا ناپایدار مانند نوسانات اقلیمی کوتاه‌مدت، کاهش موقتی فعالیت‌های انسانی یا تغییرات غیرپایدار پوشش سطح باشد. بنابراین، بدون تحلیل علت‌محور و میان‌رشته‌ای، هرگونه نتیجه‌گیری خوش‌بینانه ممکن است گمراه‌کننده باشد.

از این یافته‌ها، چند پیشنهاد کلیدی برای تحقیقات آتی استخراج می‌شود: نخست، SUHII نه فقط به‌عنوان یک پدیده دمایی، بلکه به‌عنوان شاخصی ترکیبی از فرم شهری، عملکرد زیستی و رفتار انسانی مورد مطالعه قرار گیرد. بنابراین، آینده‌ی تحلیل SUHI باید فراتر از مدل‌سازی آماری حرکت کند و با رویکردهای سیستم پویا، یادگیری ماشینی و تلفیق داده‌های انسانی (مانند ترافیک و مصرف انرژی) همراه شود. دوم، مدیریت شهری باید علاوه بر کنترل پوشش گیاهی به طراحی اقلیمی، کنترل بازتاب سطح، و هوشمندسازی جریان‌های حرارتی نیز بپردازد. در نهایت، پژوهش‌های آینده می‌توانند به تحلیل روابط بلندمدت بین SUHI و بحران‌های زیستی مانند سلامت عمومی، خشکسالی یا مصرف انرژی بپردازند؛ موضوعاتی مرتبط به SUHI که با بقا و کیفیت زندگی شهری گره خورده‌اند.

- [۱] G. Manoli *et al.*, "Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population," *Nature*, vol. 573, no. 7772, pp. 55-60, 2019.
- [۲] Z. Qiumeng, J. Baoquan, L. Tong, Y. Yarong, and F. Youxin, "Dynamic changes and drives of surface urban heat islands in China," *City and Environment Interactions*, p. 100203, 2025.
- [۳] X. Peng, Y. Zhou, X. Fu, and J. Xu, "Study on the spatial-temporal pattern and evolution of surface urban heat island in 180 shrinking cities in China," *Sustainable Cities and Society*, vol. 84, p. 104018, 2022.
- [۴] T. R. Oke, "The energetic basis of the urban heat island," *Quarterly journal of the royal meteorological society*, vol. 108, no. 455, pp. 1-24, 1982.
- [۵] N. Shirani-Bidabadi, T. Nasrabadi, S. Faryadi, A. Larijani, and M. S. Roodposhti, "Evaluating the spatial distribution and the intensity of urban heat island using remote sensing, case study of Isfahan city in Iran," *Sustainable cities and society*, vol. 45, pp. 686-692, 2019.
- [۶] X. Deng *et al.*, "Characteristics of surface urban heat islands in global cities of different scales: Trends and drivers," *Sustainable Cities and Society*, vol. 107, p. 105483, 2024.

- [۷] Y. Yuan, C. Li, X. Geng, Z. Yu, Z. Fan, and X. Wang, "Natural-anthropogenic environment interactively causes the surface urban heat island intensity variations in global climate zones," *Environment international*, vol. 170, p. 107574, 2022.
- [۸] M. T. Abebe and T. L. Megento, "Urban green space development using GIS-based multi-criteria analysis in Addis Ababa metropolis," *Applied Geomatics*, vol. 9, pp. 247-261, 2017.
- [۹] R. Yao, L. Wang, X. Huang, Y. Niu, Y. Chen, and Z. Niu, "The influence of different data and method on estimating the surface urban heat island intensity," *Ecological Indicators*, vol. 89, pp. 4۲۰۱۸, ۵-۵۵
- [۱۰] M. Zargari, A. Mofidi, A. Entezari, and M. Baaghideh, "Climatology of Tehran surface heat Island: a satellite-based spatial analysis," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, p. 10567, 2025.
- [۱۱] A. Aslani, M. Sereshti, and A. Sharifi, "Urban heat island mitigation in Tehran: District-based mapping and analysis of key drivers," *Sustainable Cities and Society*, vol. 125, p. 106338, 2025.
- [۱۲] M. Zheng, D. Zheng, Q. Shen, and F. Jia, "Quantifying Long-Term Spatiotemporal Variation in and Drivers of the Surface Daytime Urban Heat Island Effect in Major Chinese Cities: Perspectives from Different Climate Zones," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 14, no. 7, p. 239, 2025.
- [۱۳] M. H. Jahangir, A. Zarfeshani, and M. Arast, "Investigation of green roofs effects on reducing of the urban heat islands formation (The case of a municipal district of Tehran City, Iran)," *Nature-Based Solutions*, vol. 5, p. 100100, 2024.
- [۱۴] M. Meftahi, M. Monavari, M. Kheirkhah Zarkesh, A. Vafaeinejad, and A. Jozi, "Achieving sustainable development goals through the study of urban heat island changes and its effective factors using spatio-temporal techniques: the case study (Tehran city)," in *Natural resources forum*, 2022, vol. 46, no. 1: Wiley Online Library, pp. 88-115 .
- [۱۵] L. Niu *et al.*, "Identifying surface urban heat island drivers and their spatial heterogeneity in China's 281 cities: An empirical study based on multiscale geographically weighted regression," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 21, p. 4, ۴۲۸, ۲۰۲۱
- [۱۶] H. Liu, B. Huang, Q. Zhan, S. Gao, R. Li, and Z. Fan, "The influence of urban form on surface urban heat island and its planning implications: Evidence from 1288 urban clusters in China," *Sustainable Cities and Society*, vol. 71, p. 102987, ۲۰۲۱ ,
- [۱۷] A. Oliveira, A. Lopes, E. Correia, S. Niza, and A. Soares, "An urban climate-based empirical model to predict present and future patterns of the Urban Thermal Signal," *Science of the Total Environment*, vol. 790, p. 147710, 2021.
- [۱۸] R. Yao *et al.*, "Long-term trends of surface and canopy layer urban heat island intensity in 272 cities in the mainland of China," *Science of the Total Environment*, vol. 772, p. 145607, 2021.
- [۱۹] Y. Li, L. Wang, M. Liu, G. Zhao, T. He, and Q. Mao, "Associated determinants of surface urban heat islands across 1449 cities in China," *Advances in Meteorology*, vol. 2019, no. 1, p. 4892714, 2019.
- [۲۰] N. P. Welegedara, S. K. Agrawal, and G. Lotfi, "Exploring spatiotemporal changes of the urban heat Island effect in high-latitude cities at a neighbourhood level: A case of Edmonton, Canada," *Sustainable Cities and Society*, vol. 90, p. 104403, 2023.
- [۲۱] N. Clinton and P. Gong, "MODIS detected surface urban heat islands and sinks: Global locations and controls," *Remote Sensing of Environment*, vol. 134, pp. 294-304, 2013.
- [۲۲] H. Midi, S. K. Sarkar, and S. Rana, "Collinearity diagnostics of binary logistic regression model," *Journal of interdisciplinary mathematics*, vol. 13, no. 3, pp. 253-267, 2010.
- [۲۳] L. Wang, H. Hou, and J. Weng, "Ordinary least squares modelling of urban heat island intensity based on landscape composition and configuration: A comparative study among three megacities along the Yangtze River," *Sustainable Cities and Society*, vol. 62, p. 102381, 2020.
- [۲۴] H. Aguinis and R. K. Gottfredson, "Best-practice recommendations for estimating interaction effects using moderated multiple regression," *Journal of organizational behavior*, vol. 31, no. 6, pp. 776-786, 2010.