

فصلنامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای، سال ۷، شماره پیاپی ۲۷، پاییز ۱۳۹۶

شاپای چاپی: ۶۷۳۵-۲۲۵۱ - شاپای الکترونیکی: ۷۰۵۱-۲۴۲۳

<http://jzpm.miau.ac.ir>

برآورد تغییرات فضایی - زمانی شدت جزیره حرارتی کلانشهر تهران با استفاده از تصاویر ماهواره‌های LANDSAT8 و ASTER^۱

هادی رضایی‌راد: دانش‌آموخته دکترای شهرسازی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مجتبی رفیعیان^۲: دانشیار گروه شهرسازی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۲۰

صص ۶۰-۴۷

دریافت: ۱۳۹۵/۸/۱۷

چکیده

جزیره حرارتی شهر یکی از بارزترین مظاهر آب و هوایی شهرنشینی در شهرهای امروزی است. افزایش دمای شهری به شدت باعث افزایش تقاضای برق برای تهویه هوای داخل ساختمان‌ها، میزان غلظت هوا و افزایش انتشار آلودگی‌های نیروگاه برق از جمله دی اکسید گوگرد، مونواکسید کربن، اکسید نیتروژن و ذرات معلق می‌شود. بدین ترتیب تحلیل و درک یویایی حرارت شهری و شناسایی ارتباط آن با تغییرات منشاء انسانی برای مدل‌سازی، پیش‌بینی تغییرات محیطی و نهایتاً سیاست‌گذاری شهری الزامی به نظر می‌رسد. بنابراین هدف پژوهش حاضر برآورد فضایی- زمانی جزیره حرارتی مناطق بیست و دوگانه‌ی شهر تهران بین سالهای ۹۴-۱۳۸۲ در اثر تحولات توسعه‌ی کالبدی شهر است. در فرآیند دست‌یابی به هدف مورد نظر تصاویر ماهواره‌ای بدون پوشش ابری و صاف کلانشهر تهران توسط ماهواره‌ی Landsat8 برای مرداد ماه سال ۱۳۹۴ و ماهواره‌ی Aster برای مرداد ماه سال ۱۳۸۲ تهیه شده است. این تصاویر از طریق الگوریتم‌های طراحی شده و در محیط Envi به الگوهای فضایی جزیره حرارتی مناطق ۲۲گانه شهر تهران تبدیل شده است. مقایسه و تحلیل الگوهای فضایی جزایر حرارتی در سیر زمانی ۱۳۹۴-۱۳۸۴ با استفاده از آزمون من- کندال نشان از ۰.۶ همبستگی فضایی داشته است، این بدان معناست که در ۴۰٪ از سطح شهر تهران طی تقریباً یک دهه‌ی اخیر به دلایل اثرات توسعه‌ی کالبدی شهر الگوی فضایی جزیره حرارتی تغییر یافته است. همچنین سایر نتایج نشان از کاهش کمینه‌ی حرارت سطح (C ۳.۶۷) و کاهش میانگین حرارت سطح (C ۰.۴۷) طی یک دهه‌ی اخیر شهر تهران دارد. البته شایان ذکر است روند تحولات الگوی فضایی جزیره حرارتی که ناشی از تغییرات سیاست‌های کالبدی- عملکردی و فعالیت‌های انسانی است، در حوزه‌ی غربی شهر بویژه در مناطق ۵، ۲۲ و قسمت شرقی منطقه‌ی ۲۱ بیشترین تحولات را به خود اختصاص داده‌اند.

واژه‌های کلیدی: جزیره حرارتی، حرارت سطوح شهری، مصرف انرژی شهری، آزمون من- کندال، کلانشهر تهران.

^۱ این مقاله از رساله‌ی دکترای هادی رضایی راد با عنوان "تحلیل اثرات برنامه‌ریزی کالبدی بر تعادل مصرف انرژی در نواحی شهر تهران" به راهنمایی دکتر مجتبی رفیعیان در رشته‌ی شهرسازی دانشکده‌ی هنر و معماری دانشگاه تربیت مدرس برگرفته شده است.

^۲ نویسنده‌ی مسئول: Rafiei_M@Modares.ac.ir

بیان مساله:

از دهه ۷۰ قرن بیست با تقلیل منابع و بروز محدودیت‌ها، دنیا در چالش با مسئله پیچیده و بغرنج برخواسته از تهدیدات مصرف منابع انرژی قرار گرفته است. در این میان مساله سوخت‌های فسیلی و گسترده‌گی استفاده از آن‌ها ریشه اصلی بروز تهدیدات زندگی شهری بوده است. آن چه امروزه در نتیجه استفاده گسترده از منابع تجدیدناپذیر انرژی و به طور کلی مصرف بالای انرژی به عنوان معضلی جدی مطرح شده، پدیده تغییرات اقلیمی است. نرخ رشد شهرنشینی بالا در طی دهه‌های اخیر اثرات زیادی در محیط‌زیست شهری داشته که از جمله آن‌ها می‌توان به افزایش حرارت شهرها و تغییرات اقلیم آن‌ها اشاره نمود. افزایش جمعیت شهری، رشد سریع صنعتی شدن و افزایش غلظت آلاینده‌ها در پایین‌ترین سطح اتمسفر شدت جزیره‌های حرارتی شهرها را افزایش داده‌اند (Rezaei Rad & Rafieian, 2016). جزیره حرارتی شهرها در فصل تابستان به خصوص در مناطق گرمسیری و خشک اثرات ویرانگری را به بار می‌آورد. این شرایط باعث بهم خوردن آسایش زندگی مردم ساکن در مراکز شهری می‌شود. با توجه به گرمای بیش از حد و ظرفیت تحمل پایین مردم در شرایط گرمای شدید باعث بوجود آمدن بیماری و در ادامه مرگ و میر می‌شود. علاوه بر این افزایش دما باعث افزایش تقاضای انرژی جهت سرمایه‌گذاری در ساختمانها برای آسایش و راحتی بیشتر مردم در فصل گرم خواهد شد. آزاد شدن انرژی گرمایی زیاد، افزایش گازهای گلخانه‌ای و همچنین تغییر کاربری زمین از عوامل اصلی تغییر اقلیم محلی در شهرها است (Rezaei Rad & Rafieian, 2014). تغییرات دمای ناشی از ساخت و سازهای شهری آسایش و سلامتی انسان، مصرف انرژی و کیفیت هوا را تحت تاثیر خود قرار داده است (Svensson and Eliasson, 2002). نگرانی‌های موجود در مورد اثرات منفی شهرنشینی بر محیط زیست، ویژگی‌های مناطق شهری را به طور فزاینده‌ای در برنامه‌ریزی و عمران شهری بویژه در شهرهای پرتراکم با اهمیت کرده است (Yang et al, 2013). دمای بالای حرارتی شهر افزایش مصرف انرژی در ساختمانها، افزایش غلظت آلاینده‌ها، کاهش کیفیت محیط‌زیست در شهرها، کاهش سطح آسایش محیط داخلی و خارجی و کاهش سلامت انسانی را به بار می‌آورد (Santamouris and Kolokotsa, 2016). در نتیجه با توجه به نقش موثر سیاستگذاری کالبدی شهر بر میزان پدیده جزیره حرارتی، برآورد فضایی - زمانی میزان تغییرات این پدیده می‌تواند برنامه‌ریزان و مدیران شهری را جهت هدایت شهر به سمت توسعه پایدار هدایت نماید. از آنجایی که تراکم در نواحی کلانشهر تهران در طی سال‌های اخیر به یکباره افزایش چشمگیری داشته و این روند از سال ۱۳۸۲ با اعطای اضافه تراکم تشویقی تشدید شده است (Rezaei Rad, 2012) کالبد شهر را شدیداً دچار تغییرات مختلفی در مناطق ۲۲گانه شهرداری کرده است. سؤال و فرضیه اصلی پژوهش عبارتنداز:

- مقدار شدت جزیره حرارتی در مناطق مختلف شهر تهران در طی توسعه‌ی کالبدی یک دهه‌ی اخیر (۹۴-۱۳۸۲) شهر چگونه تغییر یافته است؟
- به نظر می‌رسد بیشترین تغییرات در شدت جزیره حرارتی مناطق شهر تهران در طی توسعه‌ی کالبدی یک دهه‌ی اخیر (۹۴-۱۳۸۲) شهر در مناطق غربی رخ داده است.

مبانی نظری پژوهش:

حرارت سطح شهری: حرارت سطح زمین (LST) را می‌توان به عنوان درجه‌ی حرارت احساس در هنگامی که سطح زمین از طریق دست یا پوست لمس می‌گردد، تعریف نمود (Rajeshwari and Mani, 2014). یکی از عوامل اصلی تعیین تابش سطح و تبادل انرژی (Weng, 2009) کنترل توزیع انرژی گرمایی بین سطوح و اتمسفر است (Rezaei Rad et al, 2017). Guillevic و همکارانش در پژوهشی در سال ۲۰۱۲ بیان می‌کنند، حرارت سطح زمین متغیر کلیدی برای کنترل ارتباط بین شار حرارت تابشی، نهفته و محسوس است. بدین ترتیب تحلیل و درک پویایی LST و شناسایی ارتباط آن با تغییرات منشاء انسانی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات محیطی الزامی به نظر می‌رسد (Moran et al, 2009; Kerr et al, 2004).

³. Land Surface Temperature

LST از تعدادی ویژگی سطح شهر همچون رنگ، زبری سطح، رطوبت، ترکیب‌های شیمیایی و... تأثیر می‌گیرد (Tran et al, 2009). از آنجایی که حرارت سطح زمین لایه‌های زیرین اتمسفر را تنظیم می‌کند، می‌توان از آن به عنوان شاخص آب و هوایی و یک عامل مهم در محیط زیست شهری یاد کرد (Kotroni et al, 2009). ترکیبات پوشش سطح زمین به ویژه میزان درصد و سهم هر یک از پوشش‌های زمین در شهر یکی از عوامل اصلی متاثر کننده‌ی میزان حرارت سطح زمین است (Bobrinskaya, 2012). در سال ۲۰۱۱ *Sun* و همکارانش ثابت کردند بین (*LST*) و سطوح غیرقابل نفوذ شهری همبستگی مثبت و با مناطق جنگلی و پوشیده از فضای سبز همبستگی منفی دارند.

کاهش پوشش گیاهی تعادل حرارت را تحت تأثیر قرار داده و منجر به افزایش دمای سطح زمین شده و همچنین همزمان با آن روند مخالف با میزان تعرق و تبخیر اتفاق می‌افتد (Shukla and Mintz, 1982; Collatz et al, 2000; Meng et al, 2009; Zhou et al, 2011). دمای سطح از مناطق شهری رابطه‌ی نزدیکی با ساختار کالبدی و بافتهای سطوح شهری دارند. مناطق انسانی شهری پتانسیل انباشت انرژی حرارتی و افزایش دمای هوا را دارا می‌باشند (Bhang et al, 2009). Pitman و همکارانش در سال ۲۰۱۱ برآورد می‌کنند تغییر در دمای سطح زمین نه تنها به تغییر در نوع کاربری و پوشش زمین بستگی داشته، بلکه به شکل‌گیری و افزایش اثر گلخانه‌ای هم ارتباط پیدا می‌کند.

جزیره حرارتی شهر (UHI):

اگرچه تغییر آب و هوا و اقلیم زمین‌های مهمی برای کار است، اما درک وضعیت فعلی دانش جزیره حرارتی شهری هم به همان اندازه مهم است. سهم و نسبت زیادی از جمعیت جهان یا در حال حرکت به سمت شهرنشینی بوده و یا به این امر دچار شده‌اند. روند شهرنشینی و متراکم‌سازی شهری برای اقلیم و آب و هوای محلی مهم است، زیرا مسبب تغییرات در ساختار کالبدی و بافتهای شهری می‌شود. در نتیجه تغییر تعادل انرژی در مناطق شهری باعث ذخیره سازی گرمای بیشتر در سطح زمین می‌گردد (Skelhorn, 2013). این تغییر منجر به تفاوت قابل اندازه‌گیری بین مناطق شهری و پیرامونی را بوجود می‌آورد که به آن اثر جزیره حرارتی شهری (UHI) می‌گویند (Rezaei Rad et al, 2013). این پدیده در مقیاس عمودی که شامل انواع مختلف، UHI در هوا (دو نوع)، UHI در سطح زمین و UHI در سطح زیر زمین می‌شود (Oke, 2006).

ارتباط جزیره حرارتی و تعادل انرژی سطح شهری:

ترکیب چند عامل توأمان باعث گرم شدن سطوح شهرها و شکل‌گیری جزیره حرارتی شهر می‌گردد. گرتلند^۴ طی پژوهشی در سال ۲۰۰۸ پنج عامل اصلی شکل‌گیری جزیره حرارتی شهرها را به صورت زیر بیان کرده است (Gartland, 2008):

- ۱) افزایش گرمای انسانی
- ۲) کاهش تبخیر هوا
- ۳) افزایش گرمای ذخیره شده
- ۴) افزایش تابش خالص
- ۵) کاهش انتقال گرما

با توجه به بیان ارتباط دو سویه‌ی بین شکل‌گیری جزیره‌ی حرارتی و تعادل انرژی سطح جدول (۱) ویژگی‌های مهم شهر و برون شهر را در شکل‌گیری جزیره حرارتی و تعادل مصرف انرژی سطح زمین را نشان می‌دهد.

⁴ Urban Heat Island

⁵ Gartland

جدول ۱- ویژگی‌های مؤثر شهری و برون شهری بر شکل‌گیری جزیره حرارتی و تعادل انرژی سطح زمین

ویژگی‌های مؤثر در شکل‌گیری جزیره حرارتی	تأثیر بر تعادل انرژی
کاهش پوشش گیاهی	کاهش تبخیر
استفاده وسیع از سطوح نفوذناپذیر	کاهش تبخیر
افزایش ضریب انتشار حرارتی از مصالح ساختمانی در شهر	افزایش گرمای ذخیره شده
ضریب بازتاب پایین مصالح ساختمانی در شهر	افزایش تابش خالص
ماند گرمای سبب هندسه شهری	افزایش تابش خالص
کاهش سرعت باد به سبب هندسه شهری	کاهش انتقال گرما (همرفت)
افزایش سطح آلودگی هوا	افزایش تابش خالص
افزایش مصرف انرژی	افزایش حرارت انسانی

(ماخذ: Rezaei Rad, 2017)

تجارب جهانی در ارتباط با اثرات گرمایش شهری بر مصرف انرژی:

مطالعات مختلفی در این حوزه و عنوان و ارزیابی تأثیرات جزیره حرارتی شهر بر میزان مصرف انرژی شهرها انجام شده است. پژوهش‌های مختلف را می‌توان با توجه به اهداف خاص‌شان و تحلیل‌های صورت گرفته به پنج گروه تقسیم نمود. این پنج دسته عبارتند از:

- ۱) پژوهش‌های علمی با هدف تحلیل اثرات گرمایش شهری بر تقاضای برق در شهر یا منطقه‌ی جغرافیایی بزرگتر: تحلیل اطلاعات موجود از روابط بین دمای محیط و تقاضای برق برای یازده شهر در طی دوره‌های گرم توسط سانتاموریس و همکارانش در سال ۲۰۱۵ انجام شده است. یافته‌های این تحلیل نشان از افزایش تقاضای برق در ازای افزایش دما بین ۰٫۴۵ تا ۴٫۶ درصد است، در حالی که میانگین افزایش از تقاضای برق به ازای هر نفر نزدیک $W21$ در ازای افزایش هر درجه است.
- ۲) پژوهش‌های علمی با هدف تحلیل اثرات گرمایش شهری بر میزان مصرف برق کل در شهرها و کشور: نتیجه‌ی اصلی این پژوهش‌ها همبستگی و ارتباط معنادار بین مصرف برق و دمای محیط و ارزیابی بین حساسیت سیستم برق محلی را نسبت به افزایش دمای محیط را نشان می‌دهد.
- ۳) پژوهش‌های علمی با هدف تحلیل افزایش یا کاهش مصرف انرژی ساختمانها بسبب اثرات جزیره حرارتی شهری با استفاده از اطلاعات هواشناسی از ایستگاههای آب و هوایی روستایی و شهری مرجع: سانتاموریس در سال ۲۰۱۴ در طی پژوهشی ۱۳ شهر را برای مقایسه‌ی بارگذاری انرژی سرمایه‌های ساختمانی مرجع تحت دمای شهری و روستایی انتخاب و مورد ارزیابی قرار داد. میانگین مصرف انرژی محاسبه شده برای اهداف سرمایه‌ی ناشی از جزیره حرارتی شهر نزدیک به ۱۳٪ است.
- ۴) پژوهش‌های علمی با هدف تحلیل اثرات انرژی بر جزیره حرارتی شهر در مقیاس کل ساختمان در شهر یا منطقه جغرافیایی بزرگتر: نتایج نشان می‌دهد جزیره حرارتی شهر عامل اصلی برای متوسط مصرف انرژی در واحد سطح هر شهر در حدود $2.4 (-1.5) KWh/m^2$ ، مصرف انرژی جهانی در واحد سطح و در ازای هر درجه از شدت UHI نزدیک به $1.1 KWh/m^2/k$ تا $0.74 (+0.67)$ و مصرف انرژی جهانی هر شخص نزدیک به $130 (-) KWh/P$ ۲۳۷ است.
- ۵) پژوهش‌های علمی با هدف محاسبه‌ی مصرف انرژی کل مختلف و مصرف انرژی زمانی در ساختمانها بسبب گرمایش جهانی شهرها، بواسطه‌ی اطلاعات و داده‌های سری زمانی مختلف: سانتاموریس در سال ۲۰۱۴ در شهرهای مختلف سوییس، یونان، قبرس، آمریکا، چین و کانادا در این زمینه مطالعاتی انجام داده است. نتایج حاکی از افزایش ۲۳٪ بارگذاری سرمایه بین سالهای ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰ است و این در حالی است که بارگذاری سرمایه و گرمایش کل در همان دوره‌ی زمانی به میزان ۱۱٪ افزایش یافته است.

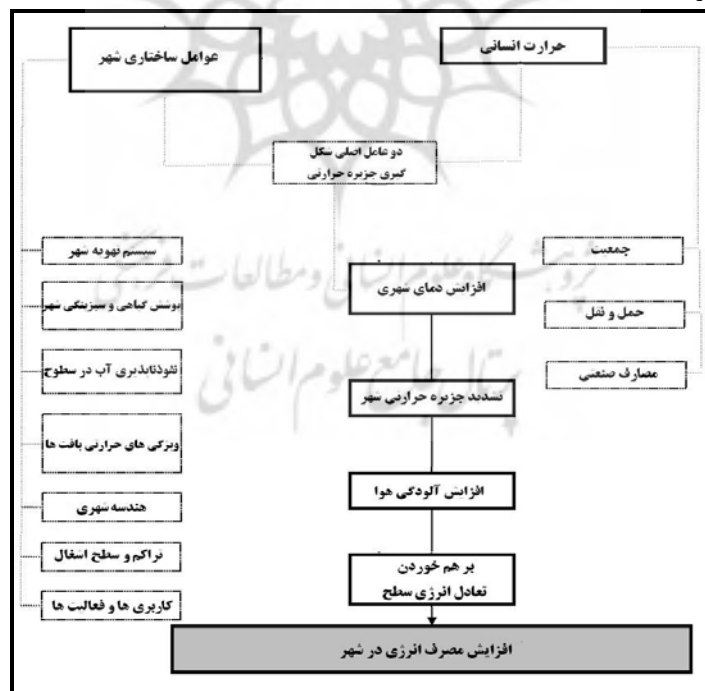
برآورد حرارت سطوح شهری ($LSTM$):

کاربری و پوشش زمین (LU/LC) در مناطق مختلف می‌توانند در برآورد و تخمین میزان دمای سطح زمین بکار گرفته شوند. از سمتی هم فعالیت‌های انسانی و طبیعی باعث تغییر در کاربری و پوشش زمین در مناطق شهری شده است (Rajeshwari and Mani, 2014). در دهه‌ی گذشته تلاش‌ها و پیشرفت‌های زیادی برای دستیابی به روشی جهت سنجش LST از طریق داده‌های سنجش از دور شده است (Li, 2016).

افزایش درجه‌ی دمای سطح بویژه در کلانشهرها باعث افزایش مصرف انرژی بدلیل بالا بردن میزان مصرف در بخش خنک‌کننده‌های ساختمانها و در نتیجه بهم خوردن تعادل مصرف انرژی شده است. ابزارهای سنجش از دور برای انجام اینگونه مطالعات و تولید نقشه‌ی حرارت سطح زمین (LST) در مقیاس فضایی- زمانی مورد نظر نقش اصلی را ایفا می‌کنند (Andre et al, 2015). در روش‌های سنجش از دور به منظور بررسی پدیده‌های مختلف سطح زمین، هزینه و زمان کمتری صرف می‌گردد (Niu et al, 2015). از مزایای استفاده از سنجش دور می‌توان به پوشش مداوم و تکراری و همچنین ارزیابی ویژگی‌های زمین با وضوح بالا اشاره کرد (Owen et al, 1998).

داده‌ی مادون قرمز حرارتی (TIR) در سنجش از دور می‌تواند به بدست آوردن اطلاعات کمی دمای سطح زمین کمک زیادی نماید. برای بدست آوردن این داده‌ها از سیستم‌های تصویربرداری ماهواره‌ای مختلفی استفاده می‌گردد. در برآورد LST از طریق معادله‌ی انتقالی تابش و الگوریتم‌های تک کانالی به کمک داده‌های مادون قرمز حرارتی از سنسورهای TM^v استفاده می‌گردد (Jose et al, 2004).

با توجه به مبانی نظری مطرح شده می‌توان ادعا کرد افزایش جمعیت شهرنشین و افزایش ساخت و ساز و حرارت انسانی منجر به افزایش دما در شهر می‌گردد. این افزایش دما باعث وجود آمدن یک سایبان هوای گرم در بالای سطح شهر شده و جزیره حرارتی شهر را بوجود می‌آورد. در نتیجه به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش مصرف انرژی در راستای سرمایش و گرمایش ساختمانها را در پی خواهد داشت. با توجه به ادبیات موضوع ارائه شده، مدل مفهومی و ارتباطی بین عوامل کلیدی پژوهش حاضر در شکل (۱) به تصویر کشیده شده است.



شکل ۱- مدل مفهومی و ارتباطی پژوهش بین دمای سطح شهری و تعادل انرژی سطح

مواد روش تحقیق:

پژوهش حاضر از نظر هدف از نوع کاربردی و از لحاظ روش انجام آن، توصیفی- تحلیلی است. ادبیات نظری با استفاده از روش کتابخانه‌ای و مرور ادبیات مربوط به حرارت سطوح شهری و ارتباط آن با تعادل انرژی سطح در شهر انجام شده است. جهت تحلیل الگوی تغییرات فضایی- زمانی حرارت سطح کلانشهر تهران بین سالهای ۹۴-۱۳۸۲ در اثر تحولات کالبدی شهری با کمک تصاویر ماهواره‌ای مختلف صورت گرفته است. در همین راستا ابتدا تصاویر ماهواره‌ای بدون پوشش ابری و صاف کلانشهر تهران توسط ماهواره‌ی Landsat8 برای سال ۱۳۹۴ و ماهواره‌ی Aster برای سال ۱۳۸۲ از طریق سایت ناسا تهیه شده است. در ادامه به کمک نرم‌افزار Envi از طریق الگوریتم‌های مختلف نقشه‌های فضایی میزان حرارت سطوح کل مناطق ۲۲گانه‌ی شهر تهران برآورد شده است. در انتها هم از طریق تحلیل‌های همبستگی و رگرسیون‌های فضایی و روندیابی با استفاده از آزمون من- کندال (MK) روندیابی و میانگین تغییرات الگوی حرارتی سطح شهر در یک دهه‌ی اخیر مورد شناسایی قرار گرفته است.

هدف از آزمون من- کندال (MK) این است که روند یکنواخت بالا و یا پایین از متغیرهای مورد نظر در طول زمان را از نظر آماری ارزیابی کند. آزمون من- کندال از جمله روش‌های تحلیل پارامتریک رگرسیون خطی است. نتایج این روش بین اعداد ۱ تا ۱- قرار دارد. عدد ۱ نشان دهنده بیشترین تغییرات افزایشی، عدد ۱- نشان دهنده بیشترین تغییرات کاهش‌ی و صفر هم به معنی عدم تغییر در پدیده مورد مطالعه است (Chander et al, 2009). در پژوهش حاضر جهت سنجش و برآورد فضایی- زمانی حرارت سطح کلانشهر تهران از دو سیستم ماهواره‌ای Landsat8 و ASTER استفاده گردیده شده است، که در ادامه معرفی شده‌اند.

سنجده‌ی ماهواره‌ی LANDSAT8:

سیستم ماهواره‌ای لندست فرصت ویژه‌ای را برای بازیابی دمای سطح زمین فراهم کرده است (Roy et al, 2014; Weng et al, 2014)، که با ذخیره‌ی داده‌های دوره‌های زمانی نسبتاً طولانی لندست ۳ در سال ۱۹۷۸ راه‌اندازی گردید (Markham et al, 2004). از اسکنر چند طیفی (MSS)^۸ در لندست ۳ تا تماتیک مپ (TM) در لندست ۴ و ۵ و پیشرفت آن در (ETM+)^۹ در لندست ۷ تنها یک کانال مادون قرمز حرارتی در دسترس وجود دارد (Huang et al, 2010). سنسورهای TM قبلی و ETM+ فقط یک باند حرارتی دارا می‌باشند، در حالی که در TIRS لندست ۸ دو طیف مجاور باند حرارتی وجود دارد. این ویژگی برای الگوریتم اسپلیت ویندوز (SW) مناسب است. الگوریتم SW با استفاده از دو باند حرارتی در پنجره‌ی جوی بین ۱۰ تا ۱۲ میکرون واقع شده است (Sobrino et al, 1993).

سنجده‌ی ماهواره‌ی ASTER:

سیستم ماهواره‌ی ASTER دارای ابزار تصویربرداری پردازنده‌ی ترا (Terra) متعلق به سیستم مشاهده‌ی زمین (EOS) ناسا است که در دسامبر سال ۱۹۹۹ با تلاش مشترک ناسا و وزارت اقتصاد، تجارت و صنعت ژاپن (METI) و سیستم فضایی ژاپن راه‌اندازی شده است. سنجده‌ی ASTER با وضوح تصاویر بین ۱۵ تا ۹۰ متر برای ایجاد نقشه‌های دقیق دمای سطح زمین، بازتاب و ارتفاع بکار گرفته می‌شود (http://asterweb.jpl.nasa.gov). در ماهواره‌ی ASTER تصاویر سیاره‌ی زمین با کیفیت بالا و در ۱۴ باند مختلف از طیف الکترومغناطیسی اعم از نورهای مرئی تا نورهای مادون قرمز حرارتی فراهم می‌آورد. قدرت تفکیک فضایی در طول موج مختلف متفاوت است: در نورهای مرئی و نزدیک به مادون قرمز (VNIR)^۱ ۱۵ متر، در فروسرخ موج کوتاه^۲ (SWIR) ۳۰ متر و مادون قرمز حرارتی ۹۰ متر است. اندازه‌ی هر صفحه از تصویر در ASTER منطقه‌ای ۶۰*۶۰ کیلومتر را پوشش می‌دهد (Abrams, 2005).

^۸ Multispectral Scanner

^۹ Enhanced Thematic Mapper Plus

^۱ Split-Window ^۰

^۱ Earth Observing System ^۱

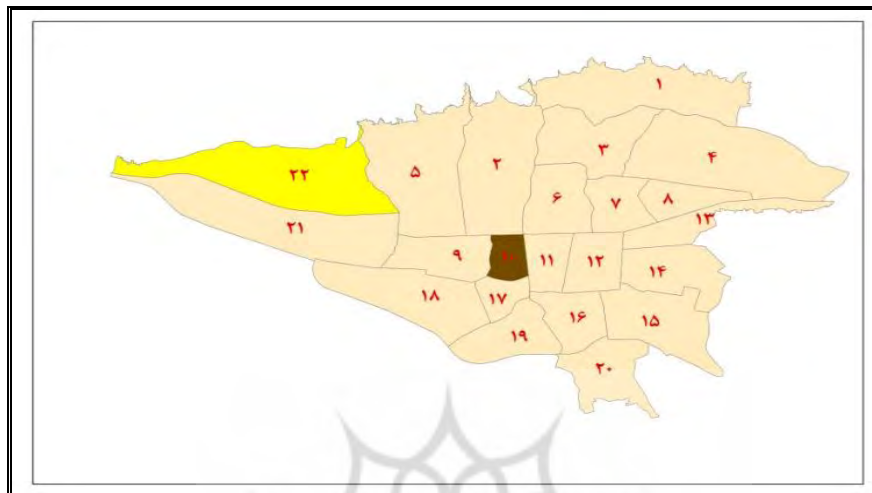
^۱ Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry ^۲

^۱ Visible and Near-Infrared ^۳

^۱ Short Wave Infrared ^۴

محدوده مورد مطالعه:

شهر تهران در ۳۵ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۳ دقیقه طول شرقی در کوهپایه‌های جنوبی رشته کوه‌های البرز با مساحتی حدود ۸۰۰ کیلومتر مربع و با ۲۲ منطقه شهرداری و جمعیتی بالغ بر ۷۷۱۱۲۳۰ نفر (بر اساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن) ۱۳۸۵ واقع شده است (Sajadiyan, 20۱۵). این بستر از سمت جنوب به حاشیه شمال غربی کویر مرکزی، از سمت شمال به دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی، از شرق به دره‌های جاجرود، و از سمت غرب به دره‌های کرج محدود شده است. (شکل شماره ۲).

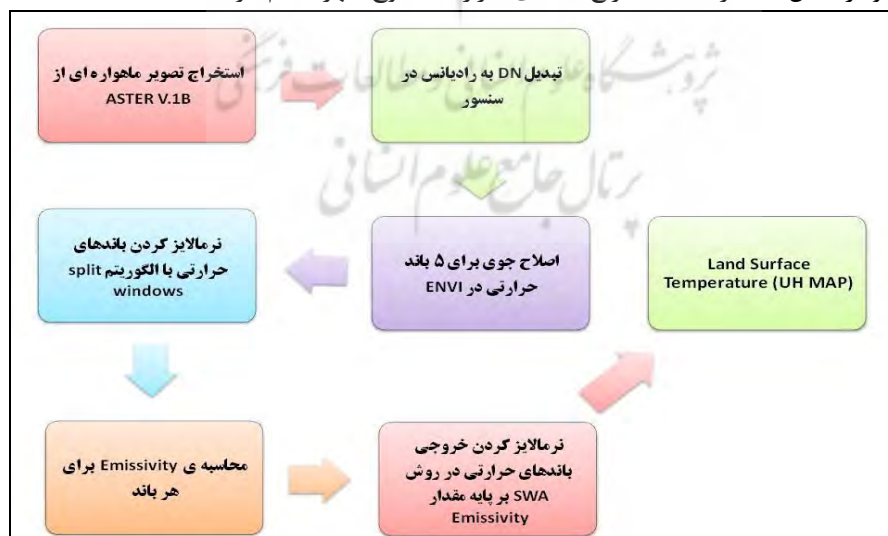


شکل ۲- موقعیت نسبی مناطق ۲۲ گانه شهر تهران در محدوده مطالعاتی

یافته‌های تحقیق:

برآورد حرارت سطح با ASTER:

جهت برآورد فضایی- زمانی الگوی تغییرات حرارت سطوح با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای Aster تصویر بدون پوشش ابری و صاف برای کلانشهر تهران در سپتامبر ۲۰۰۳ (اواخر مرداد ماه ۱۳۸۲) استخراج شده است. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار Envi طبق نمودار شکل (۳) فرآیند استخراج نقشه‌ی حرارت سطوح شهر انجام گرفته است.

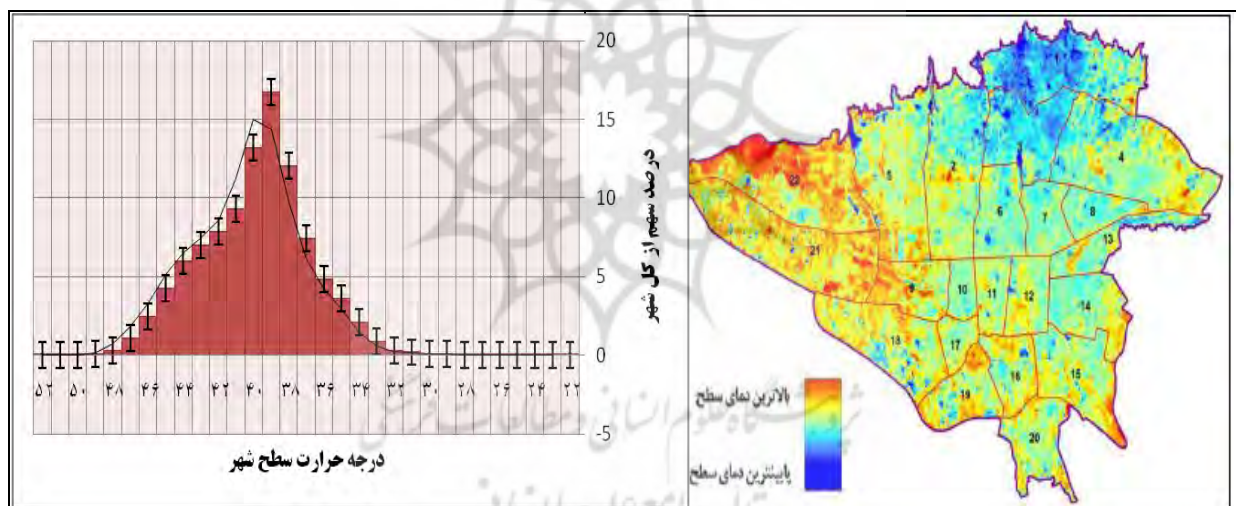


شکل ۳- فرآیند استخراج نقشه حرارت سطوح شهری با استفاده از تصویر ماهواره‌ای ASTER

بعد از استخراج تصویر ماهواره‌ای به کمک ابزارهای موجود در *Envi5.1* لایه‌ی DN^{15} به لایه‌ی رادیانس در سنسورهای درخشندگی طیفی تبدیل شده است. DN در سیستم‌های سنجش از راه دور یک متغیر اختصاص یافته به یک پیکسل، به صورت یک عدد باینری در بازه‌ی ۰ تا ۲۵۵ است. انرژی‌های تعیین شده در سیستم سنجش از راه دور بین ۲۵۶ بخش تقسیم شده است. برای یک پیکسل ممکن است چند DN متفاوت مربوط به باندهای مختلف ثبت شده است (*Srivanit and Hokao, 2012*). سنسورهای درخشندگی طیفی مقدار انرژی دریافت شده توسط سنسورهای ماهواره‌ای را نشان می‌دهد. اولین گام در تبدیل اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای به مقیاس فیزیکی تابش (رادیومتریک) محاسبه‌ی میزان درخشندگی طیفی است (*Zareie et al, 2016*). برای تبدیل DN به رادیانس در سنسور در ماهواره‌ی *ASTER* از ضریب تبدیل واحد (تعریف شده به عنوان درخشندگی و رادیانس در هر یک DN) استفاده می‌گردد. در این ماهواره برای بدست آوردن رادیانس از مقدار DN طبق معادله‌ی زیر باید اقدام نمود:

$$\text{رادیانس (درخشندگی طیفی)} = (\text{مقدار } DN - 1) * \text{ضریب تبدیل واحد}$$

در ادامه اصلاح جوی برای ۵ باند حرارتی با ابزارهای مورد نیاز در محیط *Envi* انجام گرفته شده است. نرمالایز کردن ۵ باند حرارتی با الگوریتم SW^{16} در مرحله‌ی بعدی اجرا شده است. برای نرمالایز کردن خروجی مرحله‌ی قبل، بر پایه‌ی مقدار *Emissivity* ابتدا این مقدار برای هر باند محاسبه شده است. در انتها با نرمالایز کردن باندهای حرارتی در روش *SWA* بر پایه‌ی مقدار ارزش *Emissivity* برای هر باند دمای سطح کلانشهر تهران برای مرداد ماه ۱۳۸۲ استخراج شده است. در ادامه شکل (۴) نقشه جزیره حرارتی مرداد سال ۱۳۸۲ و نمودار پراکنش دما در سطح مناطق بیست و دوگانه‌ی شهر تهران نشان داده شده است.



شکل ۴- نقشه و نمودار پراکنش حرارت سطوح کلانشهر تهران در مرداد ۱۳۸۲

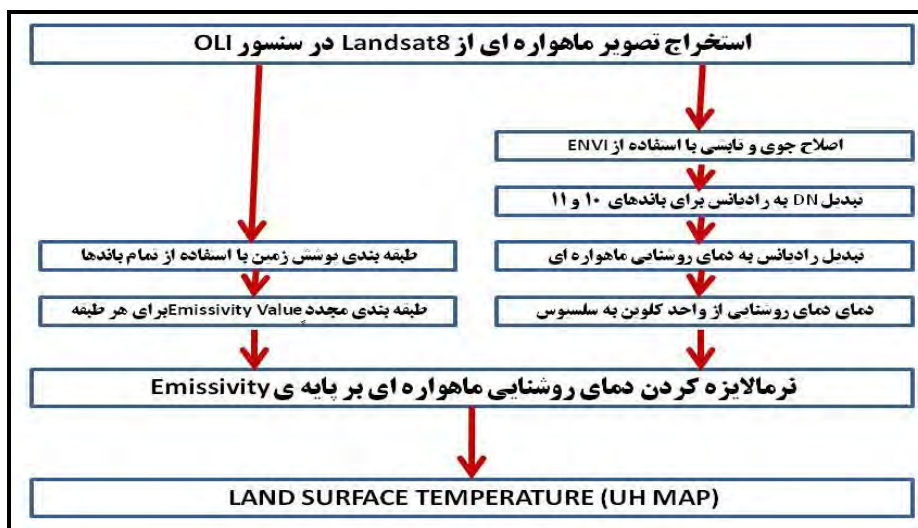
طبق نمودار فوق بیشترین مساحت شهر در دمای ۳۹ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است. به طور کلی حوزه‌ی شمالی شهر پایین‌ترین سطح دما و حوزه‌ی غربی شهر بالاترین سطح دما را به خود اختصاص داده‌اند.

برآورد حرارت سطح با *Landsat8*:

جهت برآورد حرارت سطح امروزه کلانشهر تهران از تصویر ماهواره‌ای *Landsat8* در تاریخ آگوست ۲۰۱۵ (اواخر مرداد ۱۳۹۴) در وضعیت بدون پوشش ابری و هوای صاف بهره گرفته شده است. شکل (۵) نمودار فرآیند استخراج نقشه‌ی حرارت سطوح شهری با استفاده از تصویر ماهواره‌ای *Landsat8* را نشان می‌دهد.

¹ Digital Number 5

¹ Split Windows 6



شکل ۵- فرآیند استخراج نقشه حرارت سطوح شهری با استفاده از تصویر ماهواره‌ای Landsat8

بعد از استخراج تصویر ماهواره‌ای از Landsat8 در سنسور OLI^۷ و فرآیند به موازات صورت گرفته است. از یک سو ابتدا اصلاح جوی و تابشی در محیط Envi انجام شده و در ادامه برای باندهای ۱۰ و ۱۱ به رادانسی‌های طیفی تبدیل شده است. در ماهواره‌ی Landsat8 محاسبه‌ی رادانسی طیفی (L_i) در سنسور در واحد ($M^2 * Ster * um$) به صورت معادله زیر تعریف می‌گردد (Yuan et al, 2007):

$$L_i = Gscale * QCAL + Brescale$$

همچنین می‌توان از فرمول زیر هم بهره برد:

$$L_i = (Lmax - Lmin / Qcalmax - Qcalmin) * (Qcal - Qcalmin) + Lmin$$

در معادلات فوق منظور از $Qcal$ کوانتیزه‌ی ارزش پیکسل کالیبره شده در DN است.

$Gscale$ = عامل افزایش تغییر مقیاس یک باند خاص در DN است.

$Brescale$ = عامل متمایل به تغییر مقیاس یک باند خاص در DN است.

همچنین منظور از $Qcalmax$ حداکثر کوانتیزه مقدار پیکسل کالیبره و $Qcalmin$ حداقل کوانتیزه حداقل مقدار پیکسل کالیبره است. $Lmin$ درخشندگی طیفی است که به $Qcalmin$ مدرج و $Lmax$ درخشندگی طیفی است که به $Qcalmax$ مدرج شده است.

در مرحله‌ی بعدی لایه‌ی رادانسی طیفی به دمای روشنایی^۸ ماهواره‌ای تبدیل شده است. در دمای روشنایی سطح زمین به عنوان یک جسم سیاه فرض می‌گردد. مقدار رادانسی (درخشندگی) حرارتی از تبدیل رادانسی (درخشندگی طیفی) به دمای روشنایی (BT) با استفاده از ثابت‌های حرارتی توسط معادله‌ی زیر بدست آمده است:

$$BT = K_2 / Ln((K_1 / L_i) + 1)$$

در معادله‌ی فوق منظور از BT دمای روشنایی ماهواره بر حسب کلون، L_i رادانسی طیفی، K_1 کالیبراسیون ثابت ۱ و K_2 کالیبراسیون ثابت ۲ از اطلاعات پایه است. همچنین در ادامه دمای روشنایی با کمک معادله‌ی زیر از واحد کلون به واحد سلسیوس تبدیل شده است:

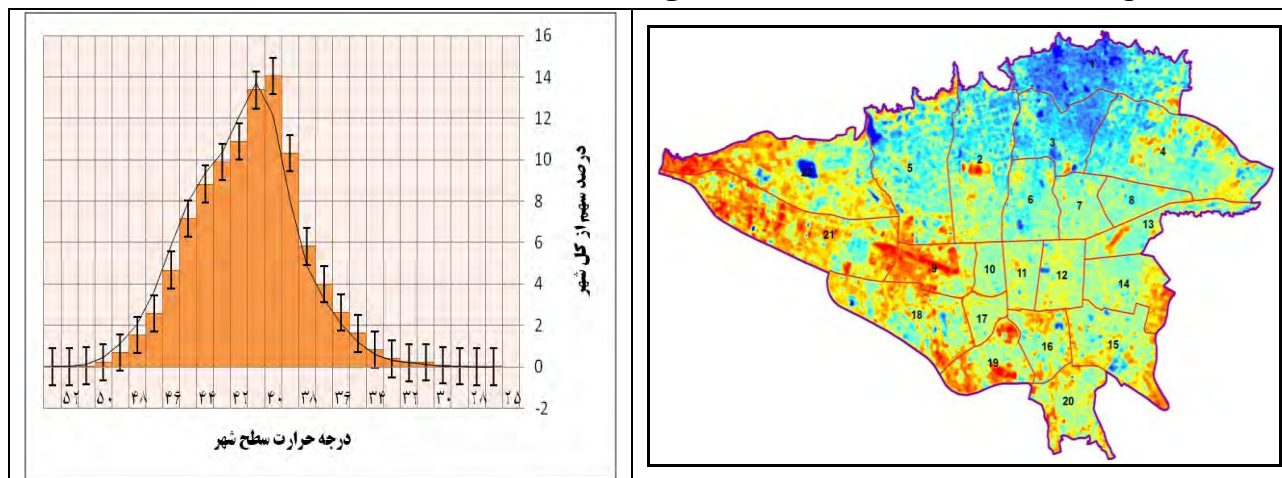
$$BT_c = BT_k - 273.15$$

به موازات در سمت دیگر با استفاده از تصویر خام ماهواره‌ای مورد نظر ابتدا طبقه‌بندی پوشش زمین برای تمام باندها و در ادامه براساس مقدار $Emissivity$ مجدداً طبقه‌بندی برای هر طبقه شکل گرفته است. در انتها هم با استفاده از نرمالیزه کردن دمای روشنایی ماهواره‌ای در واحد درجه‌ی سلسیوس بر پایه‌ی $Emissivity$ حرارت سطوح شهری به صورت نقشه استخراج

^۷ Operational Land Imager

^۸ Brightness Temperature

گردیده شده است. شکل (۶) نقشه‌ی خروجی نهایی حرارت سطوح و نمودار میزان سهم از لحاظ مساحتی را برای مقدار حرارت مختلف سطوح کلانشهر تهران در مرداد ماه ۱۳۹۴ را نشان می‌دهد.



شکل ۶- نقشه و نمودار پراکنش حرارت سطوح کلانشهر تهران در مرداد ۱۳۹۴

نمودار فوق حاکی از این است که بیشترین مساحت شهر در دمای ۴۰ و ۴۱ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند. تحولات کالبدی در طی سال‌های اخیر در حوزه‌ی غربی شهر تهران بویژه در منطقه ۲۲ (ساخت و سازهای اخیر زمین‌های بایر منطقه، دریاچه چیتگر و...) باعث بیشترین تغییرات دمای سطح در کل این منطقه بوده است. همچنین افزایش عملکرد فرودگاه مهرآباد در منطقه ۹ شهر باعث افزایش میانگین دمای سطح این منطقه نسبت به دهه‌های اخیر شده است. با توجه به خروجی‌های دو مدل طراحی شده برای برآورد دمای سطح و جزیره حرارتی کلانشهر تهران جدول (۲) مشخصات آماری لایه‌ی حرارت سطح شهری را برای سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۹۴ نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات آماری حرارت سطح شهر تهران

انرژی حرارتی سطوح	MIN	MAX	MEAN	STD
LST سال ۱۳۸۲	۲۵.۸۰	۵۲.۲۲	۴۰.۸۸	۳.۱۳
LST سال ۱۳۹۴	۲۲.۱۳	۵۲.۹۱	۴۰.۴۱	۳.۰۷

همانگونه که در جدول (۲) نشان داده شده است، کمینه‌ی حرارت در سال ۱۳۸۲ با مقدار ۲۲.۸۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر از سال ۱۳۹۴ با ۲۵.۱۳ درجه‌ی سانتی‌گراد است. همچنین میانگین حرارت سطوح مناطق بیست و دوگانه‌ی شهر تهران در مرداد ماه در سال ۱۳۸۲ از ۴۰.۸۸ درجه‌ی سانتی‌گراد به ۴۰.۴۱ درجه‌ی سانتی‌گراد در سال ۱۳۹۴ کاهش یافته است. البته قابل ذکر است بیشینه‌ی حرارت در سال ۱۳۹۴ نزدیک به ۰.۷ درجه‌ی سانتی‌گراد بالاتر از حرارت در سال ۱۳۸۲ است.

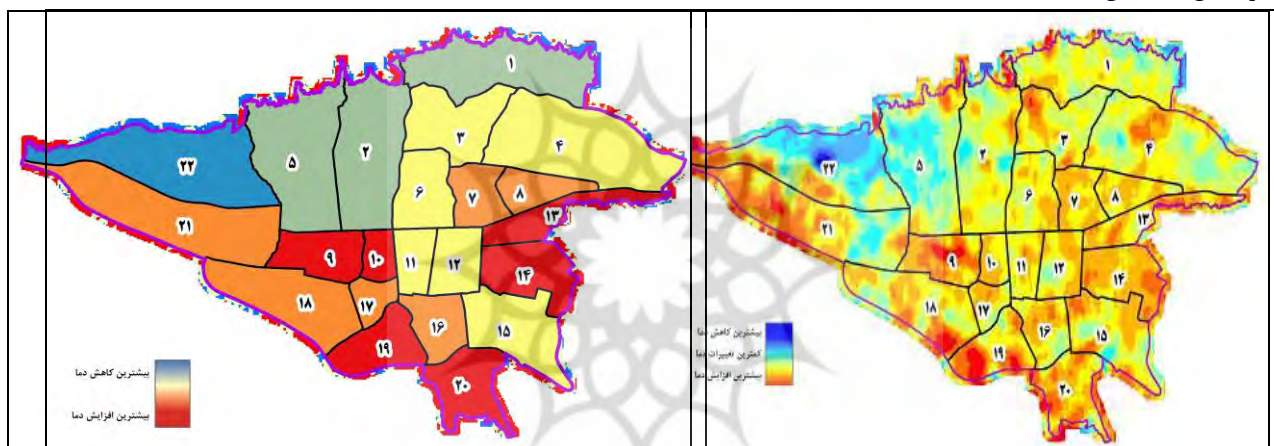
نتیجه‌گیری:

بر مبنای یافته‌های پژوهش با توجه به الگوی فضایی حرارت سطح کلانشهر تهران در فصل گرم سال در طول یک دهه و بین سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۴ از طریق محاسبه‌ی رگرسیون فضایی در محیط GIS همبستگی فضایی بین دو لایه‌ی مورد نظر محاسبه گردیده شده است. در جدول (۳) نتایج ماتریس همبستگی فضایی مورد نظر نشان داده شده است.

جدول ۳- همبستگی فضایی بین حرارت سطح کلانشهر تهران بین سالهای ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۴

	LST ۱۳۸۲-۱۳۹۴	LST ۱۳۸۲-۱۳۹۴
LST ۱۳۸۲-۱۳۹۴	۱	۲
LST ۱۳۸۲-۱۳۹۴	۳	۴

همانگونه که در جدول (۳) هم نشان داده شده است، بین حرارت سطح مناطق ۲۲ گانه‌ی کلانشهر تهران در سال ۱۳۸۲ و ۱۳۹۴ به مقدار ۰٫۶ همبستگی فضایی وجود دارد. این بدان معناست که در ۴۰٪ از مساحت شهر تهران در طی تقریباً یک دهه‌ی اخیر الگوی میزان حرارت سطح خود را تغییر داده‌اند. سیاستهای کالبد شهری اصلی‌ترین عامل در تغییر الگوی حرارتی سطح کلانشهر تهران است، زیرا اتخاذ سیاست‌های مختلف در این حوزه‌ها می‌تواند منجر به تغییر در الگوهای حرکتی، فعالیتی و زیستی در مناطق مختلف شهر تهران گردد. در نتیجه با تغییر هر یک از این الگوها مقدار حرارت سطوح و در نتیجه شدت جزیره حرارتی و نهایتاً میزان تعادل انرژی در سطح دستخوش تغییرات خواهد شد. براساس آزمون من- کندال روندیابی تغییرات (سمت راست) و میانگین (سمت چپ) تغییرات حرارتی سطوح شهر تهران در طی یک دهه‌ی اخیر در قالب نقشه‌ی در شکل (۷) بیان شده است.



شکل ۷- آزمون من- کندال در روندیابی و میانگین تغییرات حرارتی سطوح در طی یک دهه‌ی اخیر تهران

با توجه به نتایج خروجی‌ها در پاسخ به سوال پژوهش می‌توان اذعان داشت بافت‌هایی که با لکه‌های آبی رنگ نشان داده شده است، با توجه به تغییرات کالبدی و همچنین سیاست‌های شهرسازانه در حوزه‌ی غربی شهر تهران بویژه در مناطق ۵ و ۲۲ و همچنین قسمت شرقی منطقه‌ی ۲۱ باعث منفی شدن آزمون من- کندال و کاهش حرارت سطوح طی یک دهه‌ی اخیر در حوزه‌ی غربی شهر شده است. همچنین از سمتی هم بافت‌های قرمز رنگ نشان‌دهنده‌ی تغییرات در الگوی کارکردی و فعالیتی در بخش‌هایی از مناطق ۹، ۱۸، ۲۰، ۱۹ و ۲۱ است که در طول یک دهه‌ی اخیر باعث افزایش در حرارت سطوح و مثبت شدن آزمون من- کندال در حوزه‌های غربی و جنوبی شهر است. به طور کلی و مبتنی بر نقشه (۷) (سمت چپ) با توجه به فرضیه‌ی اصلی پژوهش، الگوی شدت تغییرات جزیره حرارتی در حوزه‌های شرقی و شمالی نسبت به حوزه‌های غربی و جنوبی از تغییرات کمتری برخوردار بوده‌اند. بنابراین در مجموع می‌توان از این الگو دربرآورد حرارت سطوح شهری در زمانهای متفاوت جهت برنامه‌ریزی و مدیریت شهری با هدف نهایی مدیریت بهینه در مصرف انرژی شهری استفاده نمود. همچنین با توجه نتایج می‌توان جهت کاهش حرارت سطح شهری استفاده‌ی بیشتر از فضاهای سبز و پوشش گیاهی، استفاده از مصالح با ضریب آلبدو (بازتاب) بالا، تعیین پهنه‌های مختلف با سکونت در کلیه مناطق شهر، انتقال کاربری‌های پر حرارت همچون کارگاهی- صنعتی سنگین به بیرون محدوده‌ی شهر و رعایت جهت‌گیری مناسب ساخت و ساز شهری جهت تهویه‌ی طبیعی هوا را به برنامه‌ریزان و طراحان و مدیران شهری پیشنهاد نمود.

Reference:

1. Abrams, Michael., Simon, Hook. (2005). *ASTER User Handbook, Version2, Jet Propulsion Laboratory.*
2. André, C., et al. (2015). *Land surface temperature retrieval over circumpolar Arctic using SSM/I-SSMIS and MODIS data. Remote Sensing of Environment, 162, 1-10.*
3. Bhang, K.J., et al. (2009). *Evaluation of the Surface Temperature Variation With Surface Settings on the Urban Heat Island in Seoul, Korea, Using Landsat-7 ETM+ and SPOT. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, Volume: 6 , Issue: 4, Page(s): 708- 712.*
4. Bobrinskaya, Maria. (2012). "Remote Sensing for Analysis of Relationships between Land Cover and Land Surface Temperature in Ten Megacities." (December).
5. Chander, G., et al. (2009), *Summary of current radiometric, Remote sensing of environmental, 113(5): 893-903.*
6. Collatz, G.J., et al. (2000). *A mechanism for the influence of vegetation on the response of the diurnal temperature range to changing climate, Geophys. Res. Lett., 27, 3381-3384.*
7. Gartland, Lisa. (2008). *HEAT ISLANDS UNDERSTANDING AND MITIGATING HEAT IN URBAN AREAS. Earthscan in the UK and USA in: Typeset by MapSet Ltd, Gateshead,UK.*
8. Guillevic, Pierre., et al. (2012). *Land Surface Temperature product validation using NOAA's surface climate observation networks—Scaling methodology for the Visible Infrared Imager Radiometer Suite (VIIRS), Remote Sensing of Environment, 124.*
9. Huang, C., et al. (2010). *An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks. Remote Sens. Environ. 114, 183–198.*
10. José, A., et al. (2004). *Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. Remote Sensing of Environment, 90, 434 – 440.*
11. Kerr, Y., et al. (2004). *Land surface temperature retrieval: Techniques and applications: Case of the AVHRR. In D. A. Quattrochi, & J. C. Luwall (Eds.), Thermal remote sensing in land surface processes (pp. 33–109). Boca Raton Fl.: CRC Press.*
12. Kotroni, J., et al. (2009). *Analyses of summer lightning activity and precipitation in the Central and Eastern Mediterranean. Atmospheric Research, 91, 453-458.*
13. Li, Hui. (2016). *Pavement Materials for Heat Island Mitigation: Design and Management Strategies, Oxford, UK: Elsevier.*
14. Markham, B.L., et al. (2004). *Landsat sensor performance: History and current status. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 42, 2691–2694.*
15. Meng, Q.Y., et al. (2009). *Determinants of indoor and personal exposure to PM_{2.5} of indoor and outdoor origin during the RIOPA study. Atmos Environ 43(36):5750–5758.*
16. Moran, M., et al. (2009). *Partitioning evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems using time series of soil surface temperature. Agricultural and Forest Meteorology, 149, 59–72.*
17. Niu, C. Y., et al. (2015). *Analysis of soil moisture condition under different land uses in the arid region of Horqin sandy land, northern China. Solid Earth, 6, 1157 1167.*
18. Oke,TR. (2006). *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites.*
19. Owen, T.W., et al. (1998). *Remotely sensed surface parameters governing urban climate change, Internal Journal of Remote Sensing, 19, 1663-1681.*
20. Pitman, A., et al. (2011). *Importance of background climate in determining impact of land-cover change on regional climate, Nature Climate Change, 1, 472–475, 2011.*
21. Rajeshwari,A., Mani, N,D. (2014). *ESTIMATION OF LAND SURFACE TEMPERATURE OF DINDIGUL DISTRICT USING LANDSAT 8 DATA, International Journal of Research in Engineering and Technology, Volume 03, Issue 05.*
22. Rezaei Rad, Hadi. (2017). *Analysis of Physical Planning Effects on Energy Consumption Balance In Tehran Metropolitan Sub Regions, Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy (Ph.D.) in Urban and Regional Planning and Design, Tarbiat Modares University, Tehran.*

23. Rezaei Rad, Hadi., et al. (2013). Assessment the impact of policies on building density 'heat island using SVF methods in GIS (Case Study: Tehran), Second of Conference on Planning and Environmental Management, Tehran University, Tehran.
24. Rezaei Rad, Hadi., et al. (2017). Evaluating the effects of increasing of building height on land surface temperature, *International Journal Urban Manage Energy Sustainability*, 1(1): 11-16.
25. Rezaei Rad, Hadi., Rafieian, Mojtaba. (2014). Assessing the effects of architectural residential complexes in the concentration of air pollution using Envi-met (A case study: Ghytariyeh neighborhood Tehran), *Conference on Clean Air*, Beheshti University, Tehran.
26. Rezaei Rad, Hadi., Rafieian, Mojtaba. (2016). Evaluating The Effects of High rise building On Urban Heat Island by Sky View Factor (A case study: Narmak neighborhood Tehran), *Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning Naqshejahan*, Tatbiat Modares University, Tehran.
27. Rezaei Rad, Hadi.. (2012). *The Evaluation of High Rise Building Policies in Tehran Detailed Plan with the Emphasis on Functional-Spatial Organizations*, Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Art (M.A.) in Urban and Regional Planning, Tarbiat Modares University, Tehran.
28. Roy, D.P., et al. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sens. Environ.* 145, 154–172.
29. Sajadiyan, Nahid. (2015). Forecasting of pollution due to city transport in great Tehran by using GIS, LUR Model and artificial neural network, *Sepehr Journal*, Tehran, No (95)24.
30. Santamouris, M. (2014). On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. *Energy and Buildings* 82, 100–113.
31. Santamouris, M., Cartalis, C., Synnefa, A., and Kolokotsa, D. (2015). On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings – a review. *Energy and Buildings*.
32. Santamouris, Mat., Kolokotsa, Denia. (2016). "URBAN CLIMATE MITIGATION", First published 2016 by Routledge, New York.
33. Shukla, J., Mintz, Y. (1982). The influence of land-surface-evapotranspiration on the earth's climate. *Science*, 247, 1322–1325.
34. Skelhorn, Cynthia Pamela. (2013). "A Fine Scale Assessment of Urban Greenspace Impacts on Microclimate and Building Energy in Manchester."
35. Sobrino, J.A., et al. (1993). Caselles, V.; Coll, C. Theoretical split-window algorithms for determining the actual surface temperature. *Il Nuovo Cimento*, 16, 219–236.
36. Srivani, Manat., Hokao, Kazunori. (2012). *Thermal Infrared Remote Sensing for Urban Climate and Environmental Studies: An Application for the City of Bangkok, Thailand*, JARS, 9(1).
37. Sun, J., et al. (2011). Parameter estimation of coupled water and energy balance models based on stationari constraints of surface state, *Water Resour. Res.*, 47, W02515.
38. Svensson, M. K., Eliasson, I. (2002). Diurnal air temperatures in built-up areas in relation to urban planning, *Landsc. Urban Plan.*, vol. 61, no. 1, pp. 37–54.
39. Tran, N., et al. (2009). Strategies for Design and Construction of High-Reflectance Asphalt Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2098, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 124–130.
40. Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64, 335–344.
41. Weng, Q., et al. (2014). Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data. *Remote Sens. Environ.* 145, 55–67.
42. Yang, X., et al. (2013). Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces, *Build. Environ.*, vol. 60, pp. 93–104.

43. Yuan, Fei., et al. (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.
44. Zareie, S., et al. (2016). Derivation of land surface temperature from Landsat Thematic Mapper (TM) sensor data and analyzing relation between land use changes and surface temperature, *Manuscript under review for journal Solid Earth*.
45. Zhou, Y., Ren, G. (2011). Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961–2008, *Clim. Res.*, 50, 125–139.
46. <http://asterweb.jpl.nasa.gov>

