

برآورد همبستگی فضایی بین سبزی‌نگی و انرژی حرارتی سطوح کلانشهر تهران از طریق

سنجش از دور (۱۳۸۲-۱۳۹۵)

مجتبی رفیعیان*، فرشاد نوریان، هادی رضایی‌راد

دانشیار شهرسازی، دانشگاه تربیت مدرس

دانشیار شهرسازی، دانشگاه تهران

استادیار شهرسازی، دانشگاه بوعلی سینا

دریافت: ۹۶/۵/۲۲ پذیرش: ۹۶/۹/۱۱

Spatial Correlation of Assessment Between NDVI and Surface Thermal Energy in Tehran Metropolitan (1382-1395) By Using Remote Sensing

Mojtaba Rafieyan*, Farshad Noorian, Hadi RezaeeRad

Associate Professor, Urbanism, Tarbiat Modares University

Associate Professor, Urbanism, Tehran University

Assistant Professor, Urbanism, BoAli Sina University

Received: (13/Agu/2017)

Accepted: (3/Des/2017)

Abstract

Land Surface Thermal (LST) is a key variable to control the relations between different types of radial, latent, and sensible thermal fluxes in urban areas. For analyzing and understanding dynamics of LST, it is necessary to recognize its relations with changes created by men. Recognizing such relations is a requirement for modeling and predicting environmental changes and also for urban policies. On the other hand, increases occur in vegetation cover is an effective strategy to reduce the effects of urban microclimate. The present study analyzes the trends of surface thermal changes and its spatial correlations with vegetation cover in Tehran metropolitan during 2003 to 2016. Free clouds satellite images of Tehran by Landsat8 (August 2016) and Aster (August 2003) were analyzed using Envi software. Different algorithms of remote sensing were applied to convert LST and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) indicators into spatial patterns. Spatial outcomes of the present study indicate that during a decade the minimum amount of surface thermal and the average amount of LST have decreased 3.67°C and 0.47°C respectively. In contrast, the average amount of NDVI was increased from 0.06 to 0.10. Also, the estimation of spatial correlation between LST and NDVI indicators showed an amount 0.02 reduction in 22 urban regions of Tehran metropolitan during the last decade. Such a reduction indicates that increasing functions of human activities have affected the rates of thermal and energy of urban surfaces. Therefore, to reduce energy consumption in the city, it is evident that different patterns of physical development should be applied for the city.

Keywords: Land surface Temperature, Urban Heat Island, Surface Energy Balance, Normalized Difference Vegetation Index, Tehran Metropolitan.

چکیده

انرژی حرارتی سطوح شهری (LST) 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، پیش‌بینی تغییرات محیطی و، سرانجام، سیاست‌گذاری شهری لازم است. از سوی دیگر، هم افزایش مقدار پوشش گیاهی یکی از کاراترین استراتژی‌های کاهش اثرات خرد اقلیم شهری است. بنابراین، تحلیل روند تغییرات حرارتی سطوح و میزان همبستگی فضایی سبزی‌نگی گیاهی با این پدیده در اثر تحولات شهرنشینی و شهرسازی شهر تهران، بین سال‌های ۱۳۸۲-۱۳۹۵ شمسی مورد پژوهش واقع شده است. تصاویر ماهواره‌ای بدون پوشش ابری و صاف کلانشهر تهران توسط ماهواره Landsat8 برای مرداد ماه سال ۱۳۹۵ و ماهواره Aster برای مرداد ماه سال ۱۳۸۲ به کمک نرم‌افزار Envi، از طریق الگوریتم‌های مختلف در سنجش از دور به الگوهای فضایی میزان حرارت سطوح و شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) کلانشهر تهران تبدیل شده است. خروجی‌های فضایی نشان می‌دهد در طی تقریباً یک دهه اخیر کمینه انرژی حرارتی سطوح ۳.۶۷°C و میانگین انرژی حرارتی سطوح به میزان 0.47°C با کاهش همراه بوده و این در صورتی است که میانگین مقدار شاخص پوشش گیاهی نرمال شده هم از ۰.۰۶ به ۰.۱۰ افزایش یافته است. همچنین برآورد همبستگی فضایی شاخص NDVI با LST در یک دهه اخیر در مناطق ۲۲گانه شهر تهران هم حاکی از کاهش ۰.۰۲ است. این کاهش همبستگی نشان از افزایش نقش فعالیت‌های انسانی بر میزان دما و انرژی حرارتی سطوح شهری دارد. بنابراین، با توجه به نتایج به‌دست آمده جهت کاهش مصرف انرژی شهری که در راستای به تعادل رساندن انرژی سطوح شهری است، نقش الگوهای مختلف توسعه کالبدی شهر بیش از پیش نمایان می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: انرژی حرارتی سطوح شهری، جزیره حرارتی شهر، تعادل انرژی سطح، پوشش گیاهی نرمال شده، کلانشهر تهران.

*Corresponding Author: Mojtaba Rafieyan
E-mail: Rafiei_m@Modares.ac.ir

* نویسنده مسئول: مجتبی رفیعیان

مقدمه

نرخ رشد شهرنشینی بالا در طی دهه‌های اخیر باعث تأثیرات زیادی در محیط‌زیست شهری از جمله افزایش حرارت و تغییرات اقلیم شده است. افزایش جمعیت شهری، رشد سریع صنعتی شدن و افزایش غلظت آلاینده‌ها در پایین‌ترین سطح اتمسفر شدت جزیره‌های حرارتی شهر را تحت تأثیر قرار داده‌اند (Rezaei Rad & Rafieian, 2016). آزاد شدن انرژی گرمایی زیاد، افزایش گازهای گلخانه‌ای و، همچنین، تغییر کاربری زمین از عوامل اصلی تغییر اقلیم محلی در شهرهاست (رضایی‌راد و رفیعیان، ۱۳۹۳). علاوه بر این، تغییرات دمای ناشی از ساخت و سازهای شهری آسایش و سلامتی انسان، مصرف انرژی و کیفیت هوا را متأثر کرده است (Svensson et al., 2002). نگرانی‌های موجود در مورد اثرات منفی شهرنشینی بر محیط زیست ویژگی‌های مناطق شهری را به طور فزاینده‌ای در برنامه‌ریزی و عمران شهری، به ویژه در شهرهای پرتراکم، با اهمیت نموده 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 et al., 2016). با توجه به اهمیت بالای سنجش این شاخص، پژوهش حاضر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و استر به سنجش و برآورد الگوی تغییرات زمانی - فضایی حرارت سطح کلانشهر تهران طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۸۲ پرداخته است.

برای سنجش و بررسی وضعیت پوشش گیاهی (و مقدار سبزیگی گیاهی) می‌توان از شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI; Normalized Difference Vegetation Index) استفاده کرد. شاخص NDVI بر پایه ارتباط جذب انرژی در محدوده طیفی قرمز توسط کلروفیل و افزایش انعکاس در انرژی مادون قرمز نزدیک برای پوشش گیاهی سالم استوار است. این شاخص بین +۱ تا -۱ قرار داشته و ارقام کمتر از صفر نشان‌دهنده پهنه‌های آبی، یخی و برف، و از صفر تا ۰٫۱ خاک بایر و

سنگ می‌باشد. همچنین ارقام بیشتر از ۰٫۱ تا ۰٫۸ نیز نشان‌دهنده انواع پوشش گیاهی است (Zareie et al., 2016).

$$NDVI = (P_{NIR} - P_{RED}) / (P_{NIR} + P_{RED})$$

در رابطه فوق منظور از P_{NIR} بازتاب باند مادون قرمز نزدیک و P_{RED} بازتاب باند قرمز است (Anderson et al., 2008).

حرارت سطح زمین (LST; Land Surface Temperature) را می‌توان به عنوان درجه حرارت احساس در هنگامی که سطح زمین از طریق دست یا پوست لمس می‌گردد، تعریف کرد (Rajeshwari et al., 2014). یکی از عوامل اصلی تعیین تابش سطح و تبادل انرژی توسط ونگ (Weng, 2009) و کنترل توزیع گرما بین سطوح شهر و اتمسفر است (Tan et al., 2009). گویلیویچ و همکارانش (Guillevic, 2012) در پژوهشی در سال ۲۰۱۲ بیان می‌کنند که حرارت سطح زمین (LST) متغیر کلیدی برای کنترل ارتباط بین شار حرارت تابشی، نهفته و محسوس است. بدین ترتیب، آنالیز و درک پویایی LST و شناسایی ارتباط آن با تغییرات منشاء انسانی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات محیطی الزامی است (Kerr et al., 2004 & Moran et al., 2009).

حرارت سطوح شهری از تعدادی ویژگی سطح شهر همچون رنگ، زبری سطح، رطوبت، ترکیب‌های شیمیایی و جز اینها 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 متأثرکننده میزان حرارت سطح زمین است (Bobrinskaya, 2012). در سال ۲۰۱۱ سان و همکارانش ثابت کردند بین (LST) و سطوح غیرقابل نفوذ شهری همبستگی مثبت و با مناطق جنگلی و پوشیده از فضای سبز همبستگی منفی وجود دارد (Sun et al., 2011).

ترکیب چند عامل توامان باعث گرم شدن سطوح شهرها و شکل‌گیری جزیره حرارتی شهر می‌گردد (Gartland, 2008). ۵ عامل اصلی شکل‌گیری جزیره حرارتی شهرها عبارت‌انداز: (رضایی‌راد، ۱۳۹۶):

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 سویه بین شکل‌گیری جزیره حرارتی و تعادل انرژی سطح جدول (۱) ویژگی‌های مهم شهر و برون شهر را در شکل‌گیری جزیره حرارتی و تعادل مصرف انرژی سطح زمین نشان می‌دهد.

جدول ۱. شکل‌گیری جزیره حرارتی و تعادل انرژی سطح

ویژگی‌های موثر 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 گرما به 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

داده‌های سنجش از دور حاصل شده است (Li, 2016). تغییرات قابل ملاحظه در میزان ارتفاع ساختمان‌های یک شهر، گرمای رها شده و آلاینده‌ها را بین ساختمان‌ها محبوس می‌کند که این اتفاق باعث افزایش اثرات پدیده جزیره حرارتی می‌شود (Rezaei Rad et. al., 2016). در نتیجه افزایش درجه دمای سطح، به ویژه در کلانشهرها، باعث افزایش مصرف انرژی به دلیل بالا بردن میزان مصرف در بخش خنک‌کننده‌های ساختمان‌ها

کاهش پوشش گیاهی، تعادل در گرما را تحت تأثیر قرار می‌دهد و منجر به افزایش انرژی حرارتی سطوح شهر و کاهش روند تعرق و تبخیر در سطوح می‌شود (Shukla et. al., 1982 & Collatz et. al., 2000 & Meng et. al., 2009 & Zhou et. al., 2011). نه تنها تراکم پوشش زمین و نحوه پراکنش فضایی آنها بلکه ویژگی ساختارها موضوع مهمی در میزان دمای سطح زمین محسوب می‌شود. انرژی حرارتی سطوح مناطق شهری ارتباط نزدیکی با ساختار و بافت‌های سطوح شهری دارند. مناطق انسانی شهری دارای پتانسیل انباشت حرارت و گرمایی است که دمای هوا را متأثر می‌کند (Bhang et. al., 2009). پیتمن و همکارانش در سال ۲۰۱۱ برآورد می‌کنند که تغییر در دمای سطح زمین (LST) نه تنها به تغییر در نوع کاربری و پوشش زمین بستگی دارد، بلکه به شکل‌گیری و افزایش اثر گلخانه‌ای هم ارتباط پیدا می‌کند (Pitman et. al., 2011).

مأخذ: رضایی‌راد و رفیعیان، ۱۳۹۶

کاربری و پوشش زمین (LU/LC) در مناطق مختلف می‌توانند در برآورد و تخمین میزان دمای سطح زمین به کار گرفته شوند. همچنین فعالیت‌های انسانی و طبیعی باعث تغییر در کاربری و پوشش زمین در مناطق شهری شده است (Rajeshwari et. al., 2014). در دهه گذشته تلاش‌ها و پیشرفت‌های زیادی برای دستیابی به روشی جهت سنجش انرژی حرارتی سطوح شهری از طریق

اسپلیت ویندوز (SW) مناسب است. الگوریتم SW با استفاده از دو باند حرارتی در پنجره جوی بین ۱۰ تا ۱۲ میکرون واقع شده است (Sobrinho et. al., 1993).

سیستم ماهواره‌ای ASTER دارای ابزار تصویربرداری پردازنده ترا (Terra) متعلق به سیستم مشاهده زمین (EOS; Earth Observing System) ناسا است که در دسامبر سال ۱۹۹۹ با تلاش مشترک ناسا و وزارت اقتصاد، تجارت و صنعت ژاپن و سیستم فضایی ژاپن راه‌اندازی شده است. سنجنده ASTER با وضوح تصاویر بین ۱۵ تا ۹۰ متر برای ایجاد نقشه‌های دقیق دمای سطح زمین، بازنتاب و ارتفاع به کار گرفته می‌شود (رضایی‌راد و رفیعیان، ۱۳۹۵). در ماهواره ASTER تصاویر سیاره 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; Visible and Near-Infrared) ۱۵ متر، در فرورسرخ موج کوتاه (SWIR; Short Wave Infrared) ۳۰ متر و مادون قرمز حرارتی ۹۰ متر است. اندازه هر صفحه از تصویر در ASTER منطقه‌ای ۶۰*۶۰ کیلومتر را پوشش می‌دهد (Abrams et. al., 2005).

داده‌ها و روش کار

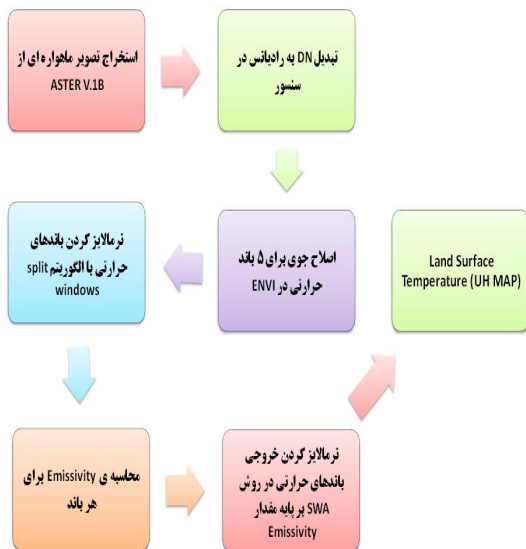
پژوهش حاضر از نظر هدف از نوع کاربردی و از لحاظ روش توصیفی-تحلیلی است. ادبیات نظری با استفاده از روش کتابخانه‌ای و مرور ادبیات مربوط به حرارت سطوح شهری و ارتباط آن با تعادل انرژی سطح در شهر انجام شده است. تحلیل الگوی تغییرات زمانی-فضایی حرارت سطح کلانشهر تهران بین سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۸۲ش در اثر تحولات شهرنشینی و شهرسازی با کمک تصاویر ماهواره‌ای مختلف صورت گرفته است. در همین راستا ابتدا تصاویر ماهواره‌ای بدون پوشش ابری و صاف کلانشهر تهران توسط ماهواره Landsat8 برای سال ۲۰۱۶ و ماهواره Aster برای سال ۲۰۰۳ از طریق سایت ناسا تهیه شده است. در ادامه به کمک نرم‌افزار Envi از

و، در نتیجه، به هم خوردن تعادل مصرف انرژی شده است. ابزارهای سنجنش از دور برای انجام این‌گونه مطالعات و تولید نقشه حرارت سطح زمین (LST) در مقیاس زمانی-فضایی مورد نظر نقش اصلی را ایفا می‌کنند (Andre et. al., 2015). در روش‌های سنجنش از دور به منظور بررسی پدیده‌های مختلف سطح زمین، هزینه و زمان کمتری صرف می‌گردد (Niu et. al., 2015). از مزایای استفاده از سنجنش دور می‌توان به پوشش مداوم و تکراری و همچنین ارزیابی ویژگی‌های زمین با وضوح بالا اشاره کرد (Owen et. al., 1998). داده مادون قرمز حرارتی (TIR) در سنجنش از دور می‌تواند به بدست آوردن اطلاعات کمی دمای سطح زمین کمک زیادی کند. برای به دست آوردن این داده‌ها از سیستم‌های تصویربرداری ماهواره‌ای مختلفی استفاده می‌شود. در سنجنش و برآورد LST از طریق معادله انتقالی تابش و الگوریتم‌های تک کانالی به کمک داده‌های مادون قرمز حرارتی از سنسورهای TM (Thematic Mapper) استفاده می‌گردد (Jose et. al., 2004). در پژوهش حاضر به منظور سنجنش و برآورد زمانی-فضایی حرارت سطح کلانشهر تهران از دو سیستم ماهواره‌ای Landsat8 و ASTER استفاده شده است.

سیستم ماهواره‌ای لندست فرصت ویژه‌ای را برای بازیابی دمای سطح زمین فراهم کرده است (Roy et. al., 2014 & Weng et. al., 2014) که با ذخیره داده‌های دوره‌های زمانی نسبتاً طولانی لندست ۳ در سال ۱۹۷۸ راه‌اندازی شد (Markham et. al., 2004). از اسکنر چند طیفی (MSS; Multispectral Scanner) در لندست ۳ تا تماتیک مپر (TM) در لندست ۴ و ۵ و پیشرفت آن در (ETM+; Enhanced Thematic Mapper Plus) 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 دارند، در حالی که در TIRS لندست ۸ دو طیف مجاور باند حرارتی وجود دارد. این ویژگی برای الگوریتم

بدون پوشش ابری و صاف برای کلانشهر تهران در سپتامبر ۲۰۰۳ (اواخر مرداد ماه ۱۳۸۲) استخراج شده است. در ادامه با استفاده از نرم افزار Envi طبق شکل (۲) زیر فرآیند استخراج نقشه حرارت سطوح شهر انجام گرفته است.



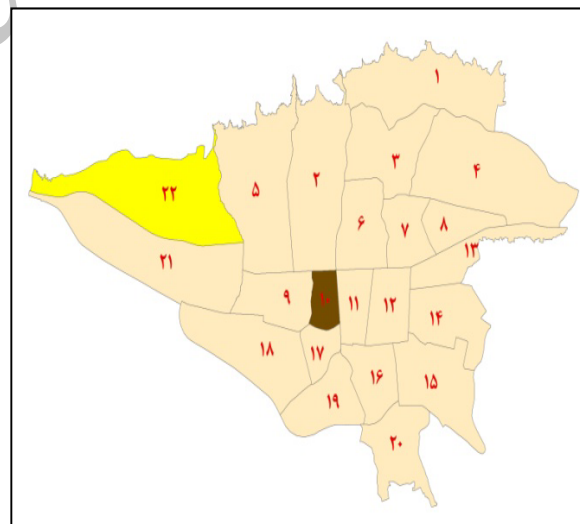
شکل ۲. فرآیند استخراج نقشه حرارت سطوح شهری با استفاده از تصویر ماهواره ای ASTER

بعد از استخراج تصویر ماهواره ای به کمک ابزارهای موجود در Envi 5.1 لایه DN (Digital Number) به لایه رادیانس در سنسورهای درخشندگی طیفی تبدیل شده است. DN در سیستم های سنجش از راه دور یک متغیر اختصاص یافته به یک پیکسل، به صورت یک عدد باینری در بازه ۰ تا ۲۵۵ است. انرژی های 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 (Srivani et al., 2012). سنسورهای درخشندگی طیفی مقدار انرژی دریافت شده توسط سنسورهای ماهواره ای را نشان می دهد. اولین گام در تبدیل اطلاعات تصاویر ماهواره ای به مقیاس فیزیکی تابش (رادایومتریک) محاسبه ی میزان درخشندگی طیفی است (رضایی راد، ۱۳۹۶). برای تبدیل

طریق الگوریتم های مختلف نقشه های فضایی میزان حرارت سطوح و شاخص نرمال شده پوشش گیاهی کل مناطق ۲۲ گانه شهر تهران برآورد شده است. در انتها هم در محیط GIS همبستگی فضایی میزان سبزیگی پوشش گیاهی با حرارت سطوح شهری تهران در طی یک دهه اخیر سنجش شده است.

شهر تهران، بزرگ ترین شهر، پایتخت ایران، مرکز استان تهران و شهرستان تهران است. جمعیت آن، ۸،۲۴۴،۵۳۵ نفر است و بیست و پنجمین شهر پرجمعیت جهان به شمار می آید. مساحت این شهر ۷۳۰ کیلومتر مربع است (دارایی و سورتیچی، ۱۳۹۲).

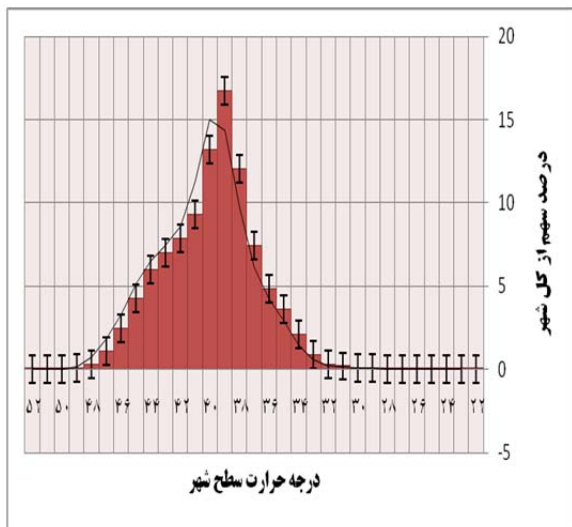
این بستر شهری از سمت جنوب به حاشیه شمال غربی کویر مرکزی، از سمت شمال به دامنه های جنوبی البرز مرکزی، از شرق به دره های جاجرود، و از سمت غرب به دره های کرج محدود شده است. شکل (۱) موقعیت بالاترین تراکم جمعیتی (منطقه ۱۰) و پایین ترین تراکم جمعیتی (منطقه ۲۲) را در بین ۲۲ مناطق کلانشهر تهران نشان می دهد.



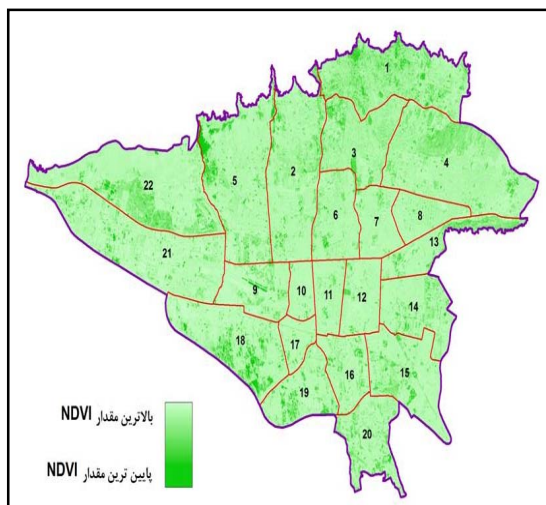
شکل ۱. موقعیت نسبی مناطق ۲۲ گانه شهر تهران

شرح و تفسیر نتایج

جهت سنجش زمانی - فضایی الگوی تغییرات حرارت سطوح با استفاده از اطلاعات ماهواره ای Aster تصویر



شکل ۴. میزان سهم از کل شهر در حرارت‌های مختلف در مرداد ۱۳۸۲ تهران



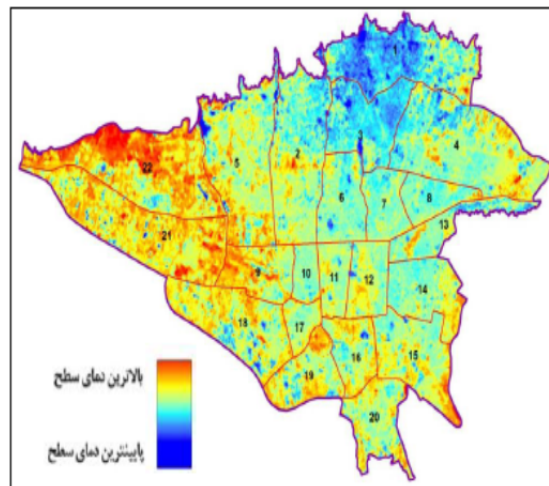
شکل ۵. شاخص نرمال شده پوشش گیاهی کلانشهر تهران در مرداد ۱۳۸۲

جهت سنجش و برآورد حرارت سطح امروزه کلانشهر تهران از تصویر ماهواره‌ای Landsat8 در تاریخ آگوست ۲۰۱۵ (اواخر مرداد ۱۳۹۵) در وضعیت بدون پوشش ابری و هوای صاف بهره گرفته شده است. شکل (۶) فرآیند استخراج نقشه حرارت سطوح شهری با استفاده از تصویر ماهواره‌ای Landsat8 در سنسور OLI را نشان می‌دهد.

DN به رادیانس در سنسور در ماهواره ASTER از ضریب تبدیل واحد (تعریف شده به عنوان درخشندگی و رادیانس در هر یک DN) استفاده می‌گردد. در این ماهواره برای به دست آوردن رادیانس از مقدار DN طبق معادله زیر باید اقدام کرد:

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

در ادامه اصلاح جوی برای ۵ باند حرارتی با ابزارهای مورد نیاز در محیط Envi انجام شده است. نرمالایز کردن ۵ باند حرارتی با الگوریتم SW (Split Windows) در مرحله بعدی اجرا شده است. برای نرمالایز کردن خروجی مرحله قبل بر پایه مقدار Emissivity ابتدا این مقدار برای هر باند محاسبه شده است. در انتها با نرمالایز کردن باندهای حرارتی در روش SWA بر پایه مقدار ارزش Emissivity برای هر باند دمای سطح کلانشهر تهران در قالب شکل (۳) حرارت سطوح شهر برای مرداد ماه ۱۳۸۲ تهیه شده است.



شکل ۳. حرارت سطوح کلانشهر تهران در مرداد ۱۳۸۲

شکل (۴) نمودار میزان سهم از لحاظ مساحتی را برای مقدار حرارت مختلف سطوح در مرداد ماه ۱۳۸۲ نشان می‌دهد. همچنین با استفاده از رابطه‌ای که پیشتر برای محاسبه شاخص نرمال شده پوشش گیاهی اشاره شد، شکل (۵) مقدار شاخص NDVI را برای مرداد ماه ۱۳۸۲ نشان می‌دهد.

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.

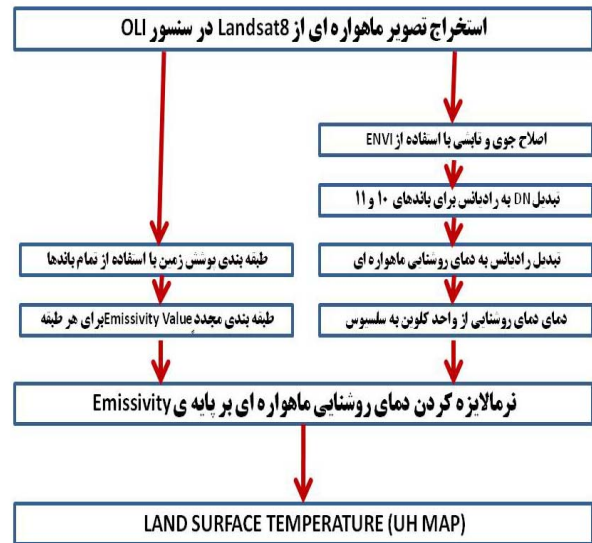
در مرحله بعدی لایه رادیانس طیفی به دمای روشنایی (BT; Brightness Temperature) ماهواره‌ای تبدیل شده است. در دمای روشنایی سطح زمین به عنوان یک جسم سیاه فرض می‌گردد. مقدار رادیانس (درخشندگی) حرارتی از تبدیل رادیانس (درخشندگی طیفی) به دمای روشنایی (BT) با استفاده از ثابت‌های حرارتی از معادله زیر به دست آمده است:

$$BT = K_2 / \ln((K_1 / L_\lambda) + 1)$$

در معادله فوق منظور از BT دمای روشنایی ماهواره بر حسب کلوین، L_λ رادیانس طیفی، K_1 کالیبراسیون ثابت ۱ و K_2 کالیبراسیون ثابت ۲ از اطلاعات پایه است. همچنین در ادامه دمای روشنایی با کمک معادله زیر از واحد کلوین 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 نرمالایز کردن دمای روشنایی ماهواره‌ای در واحد درجه سلسیوس بر پایه Emissivity حرارت سطوح شهری به صورت نقشه استخراج شده است. شکل (۷) خروجی نهایی حرارت سطوح کلانشهر تهران را برای آگوست ۲۰۱۵ (مرداد ۱۳۹۵) نشان می‌دهد.



شکل ۶. فرآیند استخراج نقشه حرارت سطوح شهری با استفاده از تصویر ماهواره‌ای Landsat8

بعد از استخراج تصویر ماهواره‌ای از Landsat8 در سنسور OLI (Operational Land Imager) فرآیند به موازات همدیگر 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 رادیانس‌های طیفی تبدیل شده است. در ماهواره‌ی Landsat8 محاسبه‌ی رادیانس طیفی (L_λ) در سنسور در واحد $(M^2 * Ster * um)$ به صورت معادله زیر تعریف می‌گردد (Yuan et. al., 2007):

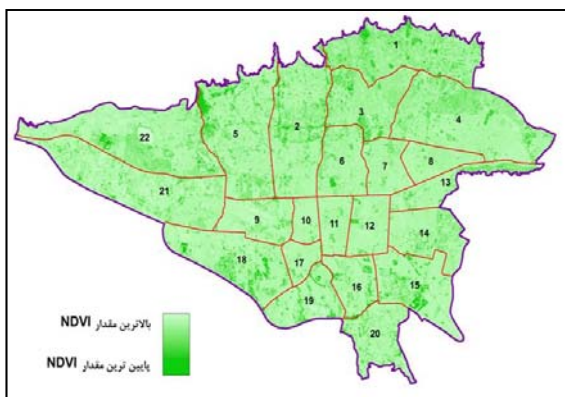
$$L_\lambda = Grescale * QCAL + Brescale$$

همچنین می‌توان از فرمول زیر هم بهره برد:

$$L_\lambda = (L_{max} - L_{min} / Qcal_{max} - Qcal_{min}) * (Qcal - Qcal_{min}) + L_{min}$$

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

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



شکل ۹. شاخص نرمال شده پوشش گیاهی کلانشهر

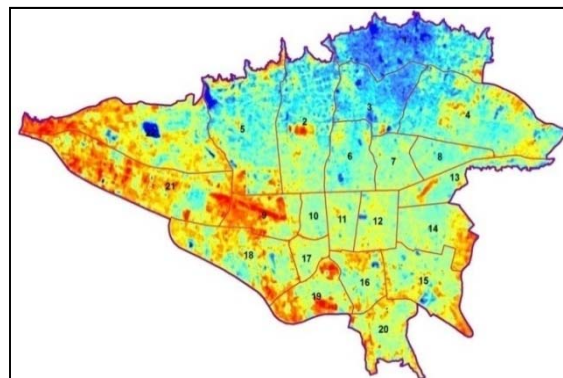
تهران در مرداد ۱۳۹۵

مقایسهٔ حرارت سطح شهر در طی یک دههٔ اخیر در جدول (۲) به صورت خلاصه نشان داده شده است. کمینهٔ حرارت در سال ۱۳۸۲ با مقدار ۲۵٫۸۰ درجه سانتیگراد بیش از سال ۱۳۹۵ با ۲۲٫۱۳ درجهٔ سانتیگراد می‌باشد. همچنین میانگین انرژی حرارتی سطوح مناطق بیست و دوگانهٔ شهر تهران در مرداد ماه در سال ۱۳۸۲ از ۴۰٫۸۸ درجهٔ سانتیگراد به ۴۰٫۴۱ درجهٔ سانتیگراد در سال ۱۳۹۵ کاهش یافته است

جدول ۲. مشخصات آماری حرارت سطح شهر تهران

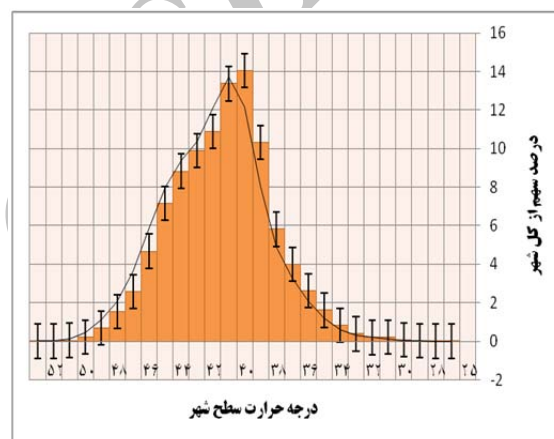
انرژی حرارتی سطوح	MIN	MAX	MEAN	STD
LST سال ۱۳۸۲	۲۵٫۸۰	۵۲٫۲۲	۴۰٫۸۸	۳٫۱۳
LST سال ۱۳۹۵	۲۲٫۱۳	۵۲٫۹۱	۴۰٫۴۱	۳٫۰۷

البته همان‌گونه که در جدول فوق نشان داده شده است، بیشینهٔ حرارت در سال ۱۳۹۵ نزدیک به ۰٫۷ درجهٔ سانتیگراد بالاتر از حرارت در سال ۱۳۸۲ است. همچنین جدول (۳) مقایسهٔ آماری شاخص پوشش گیاهی نرمال شده را در طی یک دههٔ اخیر را بازگو می‌کند.



شکل ۷. حرارت سطوح کلانشهر تهران در مرداد

۱۳۹۵

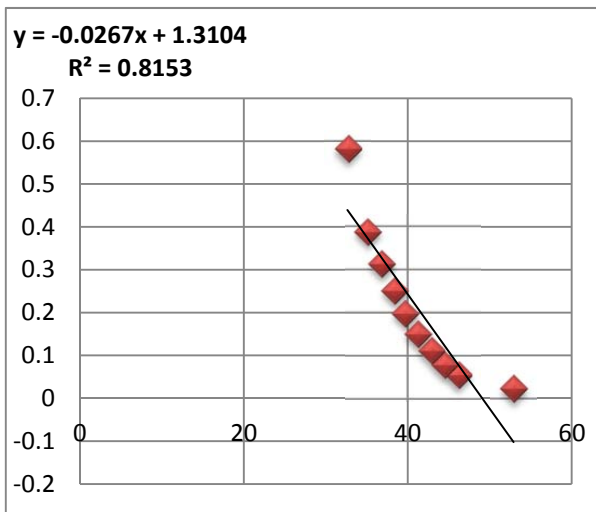


شکل ۸. میزان سهم از کل شهر در حرارت‌های مختلف در

مرداد ۱۳۹۵ تهران

شکل (۸) میزان سهم از لحاظ مساحتی را برای مقدار حرارت مختلف سطوح در مرداد ماه ۱۳۹۵ نشان می‌دهد. شکل (۹) پراکنش فضایی شاخص نرمال شده پوشش گیاهی برای مرداد ماه ۱۳۹۵ را نشان می‌دهد. میانگین این شاخص در مناطق مختلف شهر تهران ۰٫۱ برآورد شده است.

۱۳۹۵ هم محاسبه شده است که شکل (۱۱) این ارتباط را نشان داده است.



شکل ۱۱. همبستگی فضایی بین NDVI و LST در مرداد سال ۱۳۹۵

برآوردهای رگرسیونی در طی این یک دهه نشان می‌دهد که به‌رغم کاهش انرژی حرارتی سطوح شهر، مقدار همبستگی فضایی بین LST و NDVI از ۰.۸۳ سال ۱۳۸۴ به مقدار ۰.۸۱ سال ۱۳۹۵ کاهش یافته است. این کاهش همبستگی نشان از افزایش نقش فعالیت‌های انسانی بر میزان دما و حرارت شهری است. شهرنشینی و شهرسازی اصلی‌ترین عوامل در تغییر در الگوی انرژی حرارتی سطوح 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. همان‌طور که نتایج پژوهش نشان از کاهش میزان اثرگذاری سبزیگی شهری بر حرارت سطح شهری را دارد.

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

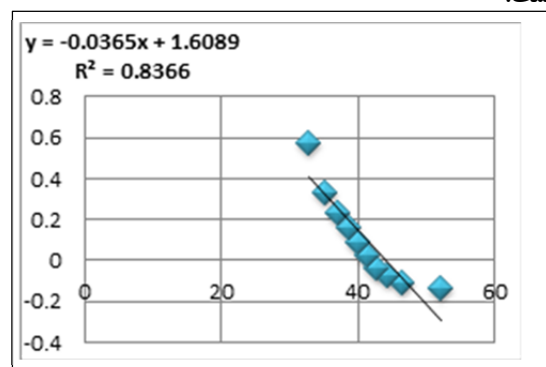
جدول ۳. مشخصات آماری شاخص پوشش گیاهی نرمال شده

پوشش گیاهی نرمال شده	MIN	MAX	MEAN	STD
NDVI سال ۱۳۸۲	-۰.۳۸	۰.۵۸	-۰.۰۶	۰.۰۹
NDVI سال ۱۳۹۵	-۰.۱۷	۰.۵۸	۰.۱۰	۰.۰۷

جدول (۳) نشان می‌دهد که میانگین شاخص پوشش گیاهی نرمال شده در طی یک دهه اخیر در شهر تهران از -۰.۰۶ به ۰.۱۰ افزایش یافته است. همچنین در بیشینه این شاخص تفاوت آنچنانی دیده نمی‌شود، اما در کمینه آن افزایش ۰.۲۱ به چشم می‌خورد.

بحث و نتیجه‌گیری

بر مبنای یافته‌های پژوهش با توجه به الگوی فضایی حرارت سطح و شاخص پوشش گیاهی نرمال شده کلانشهر تهران در فصل گرم سال در طول یک دهه و بین سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۵ از طریق محاسبه رگرسیون فضایی در محیط GIS همبستگی فضایی بین دو لایه مورد نظر برای هر سال محاسبه شده است. شکل (۱۰) ارتباط و معادلات رگرسیونی بین حرارت سطح و شاخص پوشش گیاهی نرمال شده را در سال ۱۳۸۴ ترسیم کرده است.



شکل ۱۰. همبستگی فضایی بین NDVI و LST در مرداد سال ۱۳۸۴

در ادامه برآورد همبستگی برای این متغیر در سال

کالبدی (برنامه‌ریزی کالبدی - فضایی سابق). سال دوم. شماره چهارم.

رضایی راد، هادی (۱۳۹۶). *تحلیل اثرات برنامه‌ریزی کالبدی بر تعادل انرژی در نواحی شهر تهران*. رساله دکتری. تهران: دانشگاه تربیت مدرس.

رضایی راد، هادی و رفیعیان، مجتبی (۱۳۹۳). *ارزیابی و سنجش اثرات فرم معماری مجتمع‌های مسکونی در میزان غلظت آلودگی هوا با استفاده از Envi-met (نمونه موردی: قیطریه تهران)*. اولین همایش علمی - دانشجویی هوای پاک. تهران: جهاد دانشگاهی، دانشگاه بهشتی.

_____ (۱۳۹۵). «برآورد تغییرات فضایی - زمانی شدت جزیره حرارتی کلانشهر تهران با استفاده از تصاویر ماهواره ای Landsat ۸ و Aster». *فصلنامه علمی - پژوهشی برنامه‌ریزی منطقه‌ای مرودشت*.

_____ (۱۳۹۶). «روندبایی تغییرات حرارتی سطوح شهر تهران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای». *نشریه علمی - پژوهشی پژوهش‌های محیط زیست*. تهران.

توجه به نتایج می‌توان جهت کاهش مصرف انرژی شهری در راستای به تعادل رساندن انرژی سطح شهر استفاده بیشتر از گونه‌های مناسب با اقلیم 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 محدوده شهر و رعایت جهت‌گیری مناسب ساخت و ساز شهری جهت تهویه طبیعی هوا را به برنامه‌ریزان و طراحان و مدیران شهری پیشنهاد کرد.

منابع

- دارابی، حسن؛ سورتیجی، سجاد (پاییز ۱۳۹۲). «ارزیابی استراتژیک محیط زیستی بر روی شاخص تناسب کاربری اراضی (مطالعه موردی: منطقه یک کلانشهر تهران)». *فصلنامه علمی - پژوهشی برنامه‌ریزی توسعه*
- Abrams, Michael, Simon, Hook (2005). *ASTER User Handbook*. Version 2. Jet Propulsion Laboratory.
- Anderson, M., et. al. (2008). "A thermal-based remote sensing technique for routine mapping of land- surface carbon, water and energy fluxes from field to regional scales". *Remote Sensing of Environment*. 112 (12). Pp. 4227-4241.
- André, C., et. al. (2015). "Land surface temperature retrieval over circumpolar Arctic using SSM/I-SSMIS and MODIS data". *Remote Sensing of Environment*. 162. Pp. 1-10.
- 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. Vol. 6. Issue: 4. Pp. 708-712.
- Bobrinskaya, Maria (2012). *Remote Sensing for Analysis of Relationships between Land Cover and Land Surface Temperature in Ten Megacities*. (December).
- Chander, G., et. al. (2009). "Summary of current radiometric". *Remote sensing of environmental*. 113(5). Pp. 893-903.
- 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. Pp. 3381-3384.
- Gartland, Lisa (2008). *Heat Islands Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas*. Earthscan in the UK and USA in: Typeset by MapSet Ltd. Gateshead. U. K.
- 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.
- Huang, C., et. al. (2010). "An automated approach for reconstructing recent

- forest disturbance history using dense Landsat time series stacks". *Remote Sens. Environ.* 114. Pp. 183–198.
- José, A., et. al. (2004). "Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5". *Remote Sensing of Environment.* 90. Pp. 434 – 440.
- 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.
- Kotroni, J., et. al. (2009). "Analyses of summer lightning activity and precipitation in the Central and Eastern Mediterranean". *Atmospheric Research.* 91. pp.453-458.
- Li, Hui (2016). *Pavement Materials for Heat Island Mitigation: Design and Management Strategies.* Oxford. UK: Elsevier.
- Markham, B.L., et. al. (2004). "Landsat sensor performance: History and current status. IEEE Trans". *Geosci. Remote Sens.* 42. Pp. 2691–2694.
- 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). Pp. 5750–5758.
- 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. Pp. 59–72.
- 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. Pp. 1157 -1167.
- Owen, T.W., et. al. (1998). "Remotely sensed surface parameters governing urban climate change". *Internal Journal of Remote Sensing.* 19. Pp. 1663-1681.
- Pitman, A., et. al. (2011). "Importance of background climate in determining impact of land-cover change on regional climate". *Nature Climate Change.* 1. Pp. 472–475.
- 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.* Vol. 03. Issue 05.
- 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. Tehran.
- Rezaei Rad, Hadi., et. al. (2016). "Evaluating the effects of increasing of building height on land surface temperature". *International Journal of Urban Management and Energy Sustainability.* 1 (1). Pp. 11-16.
- Roy, D. P., et. al. (2014). "Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research". *Remote Sens. Environ.* 145. Pp. 154–172.
- Santamouris, Mat.; Kolokotsa, Denia (2016). *URBAN CLIMATE MITIGATION.* First published 2016 by Routledge. New York.
- Shukla, J.; Mintz, Y. (1982). "The influence of land-surface-evapotranspiration on the earth's climate". *Science.* 247. Pp. 1322–1325.
- Sobrino, J. A., et. al. (1993). "Caselles, V.; Coll, C. Theoretical split-window algorithms for determining the actual surface temperature". *Il Nuovo Cimento.* 16. Pp. 219–236.

- Srivanit, 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).
- 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.
- 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.
- Tan, J., et. al. (2009). "The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai". *Int. J. Biometeorol*. 54. Pp. 75-84.
- 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. pp. 124-130.
- 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. Pp. 335-344.
- Weng, Q., et. al. (2014). "Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data". *Remote Sens. Environ*. 145. Pp. 55-67.
- 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.
- 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.
- 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*.
- Zhou, Y.; Ren, G. (2011). "Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961-2008". *Clim. Res*. 50. Pp. 125-139.