

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

ساختارهای پیچیده انسانی و طبیعی مناطق شهرنشین میکروکلیمای شهری را تحت تاثیر مشهودی قرار می‌دهند. توسعه‌ی کالبدی شهرها منجر به تغییرات در سطح زمین، پوشش اراضی و همچنین ساختار و محتوا جوی شده است. این تغییرات در پارامترهای خرد مقیاس و میان مقیاس آب و هوا باعث گرمتر شدن از اقلیم اصلی و مناطق پیرامونی می‌شود. بدین ترتیب ارزیابی و درک پویایی انرژی حرارتی شهر و شناسایی ارتباط آن با تغییرات منشاء انسانی و عوامل موثر بر آن برای مدل‌سازی، پیش‌بینی تغییرات محیطی و سیاست‌گذاری و تصمیم‌سازی مدیریت شهری لازم است. از سوی دیگر نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که افزایش مقدار پوشش گیاهی و فضای سبز یکی از کاراترین استراتژی‌های کاهش اثرات منفی جزیره گرمایی شهر می‌باشد. در همین راستا برآورد همبستگی فضایی بین سبزی‌نگی و انرژی حرارتی سطوح کلانشهر تهران بین سالهای ۹۵-۱۳۸۲ مورد پژوهش واقع شده است. تصاویر ماهواره‌ای بدون پوشش ابری و صاف کلانشهر تهران توسط ماهواره‌های Landsat8 و Aster از طریق الگوریتم‌های مختلف سنجش از دور به الگوهای فضایی میزان انرژی حرارتی سطوح و شاخص سبزی‌نگی (NDVI) کلانشهر تهران تبدیل شده است. خروجی‌ها حاکی از آنست که در طی تقریباً یک دهه‌ی اخیر بیش از ۵۰ درصد کلانشهر تهران بین ۱- تا ۱ تغییر درجه‌ی حرارتی، بیش از ۲۰ درصد مساحت شهر بین ۱ تا ۳ درجه کاهش و همچنین نزدیک به ۱۰ درصد مساحت بین ۱ تا ۳ درجه افزایش انرژی حرارتی را به همراه داشته است. این در حالی است که میانگین مقدار شاخص سبزی‌نگی از ۰,۰۶- به ۰,۱۰ افزایش یافته است. همچنین برآورد همبستگی فضایی شاخص NDVI با LST در یک دهه‌ی اخیر مناطق ۲۲گانه شهر تهران کاهش ۲ درصدی را نشان می‌دهد. این کاهش همبستگی به معنای افزایش اثرات سیاست‌های کالبدی- عملکردی طرح‌های توسعه شهری بر میزان انرژی حرارتی سطوح شهری است. با توجه به این نتایج، جهت کاهش مصرف و ایجاد تعادل انرژی در سطوح شهری بایستی اثرات الگوهای مختلف توسعه‌ی شهر بیش از پیش مورد توجه برنامه‌ریزان شهری قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: انرژی حرارتی سطوح شهری، جزیره گرمایی شهر، تعادل انرژی سطح، شاخص سبزی‌نگی، کلانشهر تهران.

مقدمه

ساختارهای پیچیده انسانی و طبیعی مناطق شهرنشین میکروکلیمای شهری را تحت تاثیر مشهودی قرار می‌دهند (Bobrinskaya, 2012). در نواحی شهری جذب نور خورشید بالاتر و رسانایی حرارتی بیشتری وجود دارد، در نتیجه ظرفیت آزاد کردن گرمای ذخیره شده در طی روز در هنگام شب بالاتر است (Xian et al, 2006). توسعه کالبدی شهرها منجر به تغییرات در سطح زمین، تغییرات در پوشش اراضی زمین و همچنین ساختار و محتوا جوی می‌شوند. در مجموع، این تغییرات مشهود در پارامترهای خرد مقیاس و میان مقیاس آب و هوا باعث گرمتر شدن از اقلیم اصلی و مناطق پیرامونی می‌شود (Zhou et al, 2011). همچنین نرخ رشد شهرنشینی بالا در طی دهه‌های اخیر باعث تاثیرات 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 گرمایی شهر را تحت تاثیر 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). 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 پوشش فضای سبز در کاهش اثرات منفی جزیره‌های گرمایی پژوهش حاضر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و استر به برآورد همبستگی فضایی بین شاخص سبزی‌نگی و انرژی حرارتی سطوح کلانشهر تهران بین سالهای ۹۵-۱۳۸۲ پرداخته است.

طبق پژوهش‌های Robitu et al در سال ۲۰۰۶ و Pearlmutter et al در سال ۲۰۰۹ پوشش‌های گیاهی سبز رنگ دما و حرارت بیشتری از سطوح شهری را کاهش می‌دهند. این اعتقاد در سالهای ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ به ترتیب توسط Steenveld et al و Heusinkveld et al هم مورد حمایت قرار گرفت. در مرکز شهرها، همانطور که تراکم انسانی بالا است، میزان انتشار گاز CO₂ باعث افزایش دمای هوا می‌شود. افزایش تعداد درختان به کاهش دما بوسیله جذب CO₂ کمک چشم‌گیری خواهد کرد. پژوهش‌های انجام شده حاکی از آنست

که با افزایش ۱۰٪ به پوشش گیاهی به میزان ۰٫۶ کلوین دما کاهش پیدا می‌کند (Nuruzzaman, 2015).

جهت سنجش و بررسی وضعیت پوشش گیاهی (و مقدار سبزی‌نگی 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 (رفیعیان و رضایی‌راد، ۱۳۹۶).

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

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

حرارت سطح زمین (LST; Land Surface Temperature) را می‌توان به عنوان درجه‌ی حرارت احساس در هنگامی که سطح زمین از طریق دست یا پوست لمس می‌گردد، تعریف نمود (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). گویلوویچ و همکارانش (Guillevic, 2012) در پژوهشی در سال ۲۰۱۲ بیان می‌کنند، حرارت سطح زمین (LST) متغیر کلیدی برای کنترل ارتباط بین شار حرارت تابشی، نهفته و محسوس می‌باشد.

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

کاهش پوشش گیاهی تعادل در گرما را تحت تاثیر قرار می‌دهد و منجر به افزایش انرژی حرارتی سطوح شهر و

شکل‌گیری جزیره حرارتی شهر می‌گردد (Gartland,2008). پنج عامل اصلی شکل‌گیری جزیره حرارتی شهرها عبارتند از: (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 سویه‌ی 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 را نشان می‌دهد.

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 رابطه‌ی نزدیکی با ساختار و بافتهای سطوح شهری دارند. مناطق انسانی شهری پتانسیل انباشت حرارت و گرمایی که دمای هوا را متاثر کند دارا می‌باشد (Bhang et al,2009). پیتمن و همکارانش (Pitman et al,2011) در سال ۲۰۱۱ برآورد می‌کنند 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. ترکیب چند عامل توأمان باعث گرم شدن سطوح شهرها و

جدول ۱. شکل‌گیری جزیره حرارتی و تعادل انرژی سطح

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

مأخذ: رضایی‌راد و رفیعیان، ۱۳۹۶

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). البته اندازه‌گیری سطوح از طریق سنجش از دور محدودیت‌های متعددی را هم دارا می‌باشد. ابتدا اینکه نمی‌توانند از تمام تابش‌های ساطع شده از سطوح عمودی همچون دیوار ساختمان‌ها عکس‌برداری کنند، زیرا اغلب تجهیزات از سطوح افقی مانند خیابانها، سقف‌ها و درخت‌زارها علایم و مشاهدات را انتشار می‌دهند. دوماً، داده‌های از راه دور نشان دهنده‌ی تابشی است که طول موجها در اتمسفر دو بار از طریق تابش (خورشید به زمین) و بازتابش (زمین به جو) حرکت کرده‌اند. بنابراین برای دقیق

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 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 زمانی- فضایی مورد نظر نقش اصلی را ایفا می‌کنند (Andre et al,2015). در روش‌های سنجش از دور به منظور بررسی پدیده‌های مختلف سطح زمین، هزینه

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 می‌باشد. اندازه‌ی 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 انجام آن، توصیفی-تحلیلی می‌باشد. ادبیات نظری با استفاده از روش کتابخانه‌ای و مرور ادبیات مربوط به حرارت سطوح شهری و ارتباط آن با شاخص سبزی‌نگی در شهر انجام شده است. برآورد همبستگی فضایی بین سبزی‌نگی و انرژی حرارتی سطوح کلانشهر تهران بین سالهای ۹۵-۱۳۸۲ در اثر تحولات شهرسازی براساس طرح‌های توسعه شهری مختلف 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 ۲۰۱۶ و ماهواره‌ی Aster برای سال ۲۰۰۳ از طریق سایت ناسا تهیه شده است. در ادامه به کمک نرم‌افزار Envi از طریق الگوریتم‌های مختلف نقشه‌های فضایی میزان حرارت سطوح و شاخص سبزی‌نگی کل مناطق ۲۲گانه‌ی شهر تهران برآورد شده است. در انتها هم در محیط GIS همبستگی فضایی میزان سبزی‌نگی پوشش گیاهی با حرارت سطوح شهری تهران در طی یک دهه‌ی اخیر سنجش شده و میزان تغییرات حرارت سطح و شاخص سبزی‌نگی در یک دهه اخیر مناطق ۲۲گانه به طور فضایی مشخص شده است.

شهر تهران، بزرگ‌ترین 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 می‌آید. مساحت این شهر، ۷۳۰ کیلومتر مربع است (دارابی و سورتیجی، ۱۳۹۲). این بستر شهری از سمت جنوب به حاشیه شمال غربی کویر مرکزی، از سمت شمال به دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی، از شرق به دره‌های جاجرو، و از سمت غرب به دره‌های کرج محدود شده است. شکل (۱) موقعیت نسبی مناطق ۲۲ گانه کلانشهر تهران را نشان می‌دهد.

شدن اطلاعات تخمین زده شده در مورد ویژگی‌های سطوح که شامل انعکاس تابش خورشید و دما است بایستی عمل تصحیح صورت گیرد (رضایی‌راد، ۱۳۹۶).

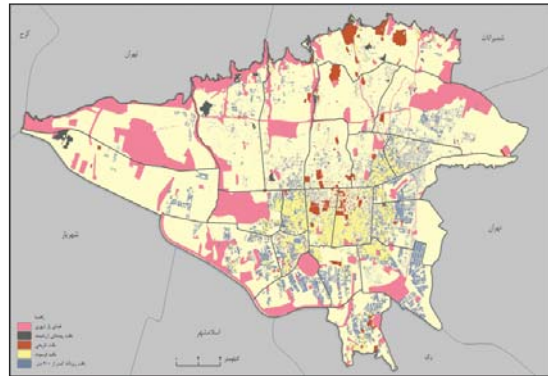
داده‌ی مادون قرمز حرارتی (TIR) در سنجش از دور می‌تواند به بدست آوردن اطلاعات کمی دمای سطح زمین کمک زیادی نماید. برای بدست آوردن این داده‌ها از سیستم‌های تصویربرداری ماهواره‌ای مختلفی استفاده می‌گردد. در سنجش و برآورد LST از طریق معادله‌ی انتقالی تابش و الگوریتم‌های تک کانالی به کمک داده‌های مادون قرمز حرارتی از سنسورهای TM (Thematic Mapper) استفاده می‌گردد (Jose et al, 2004). در پژوهش حاضر جهت سنجش و برآورد زمانی-فضایی حرارت سطح کلانشهر تهران از دو سیستم ماهواره‌ای Landsat8 و ASTER استفاده گردیده 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 ذخیره‌ی داده‌های دوره‌های زمانی نسبتاً طولانی لندست ۳ در سال ۱۹۷۸ راه‌اندازی گردید (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).

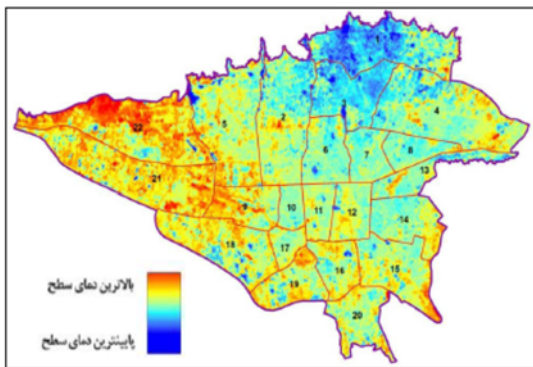
سنسورهای TM قبلی و ETM+ فقط یک باند حرارتی دارا می‌باشند، در حالی که در TIRS لندست ۸ دو طیف مجاور باند حرارتی وجود دارد. این ویژگی برای الگوریتم اسپلیت ویندوز (SW) مناسب می‌باشد. الگوریتم SW با استفاده از دو باند حرارتی در پنجره‌ی جوی بین ۱۰ تا ۱۲ میکرون واقع شده است (Sobrino et al, 1993).

سیستم ماهواره‌ای ASTER دارای ابزار تصویربرداری پردازنده‌ی ترا (Terra) متعلق به سیستم مشاهده‌ی 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. سنجنده‌ی ASTER با وضوح تصاویر بین ۱۵ تا ۹۰ متر برای ایجاد نقشه‌های دقیق دمای سطح زمین، بازتاب و ارتفاع بکار گرفته می‌شود (رضایی‌راد و رفیعیان، ۱۳۹۶). در ماهواره‌ی ASTER تصاویر سیاره‌ی زمین با کیفیت بالا و در ۱۴ باند مختلف از طیف الکترومغناطیسی اعم از نورهای

باند حرارتی با الگوریتم (SW (Split Windows) 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 در قالب شکل (۲) انرژی حرارتی سطوح شهر برای تابستان سال ۱۳۸۲ تهیه شده است.

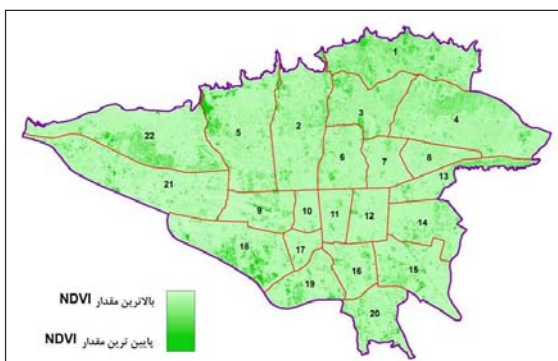


شکل (۱): موقعیت نسبی مناطق ۲۲ گانه کلانشهر تهران



شکل (۲): انرژی حرارتی سطوح کلانشهر تهران در تابستان ۱۳۸۲

همچنین با استفاده از رابطه‌ای که پیش‌تر برای محاسبه‌ی شاخص نرمال شده‌ی پوشش گیاهی (NDVI) به عنوان سبزیگی شهر اشاره شد، شکل (۳) مقدار این شاخص را برای تابستان ۱۳۸۲ نشان می‌دهد.



شکل (۳): شاخص سبزیگی کلانشهر تهران در تابستان ۱۳۸۲

در ادامه شکل (۴) نمودار سهم از مساحت شهر از نرمالایز شاخص سبزیگی در سال ۱۳۸۲ ارائه شده است.

شرح و تفسیر نتایج

جهت سنجش زمانی- فضایی 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. بعد از استخراج تصویر ماهواره‌ای به کمک ابزارهای موجود در Envi5.1 لایه‌ی DN (Digital Number) 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 (Srivani et al, 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 (رضایی‌راد، ۱۳۹۶). 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 (رفیعیان و رضایی‌راد، ۱۳۹۶):

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

در ادامه اصلاح جوی برای ۵ باند حرارتی با ابزارهای مورد نیاز در محیط Envi انجام شده است. نرمالایز کردن ۵

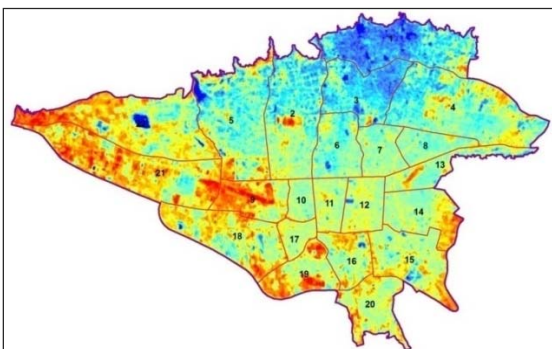
در مرحله‌ی بعدی لایه‌ی رادیانس طیفی به دمای روشنایی (BT; Brightness Temperature) ماهواره‌ای تبدیل شده است. در دمای روشنایی سطح زمین به عنوان یک جسم سیاه فرض می‌گردد. مقدار رادیانس حرارتی از تبدیل رادیانس (درخشندگی طیفی) به دمای روشنایی (BT) با استفاده از ثابت‌های حرارتی توسط معادله‌ی زیر بدست آمده است:

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

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

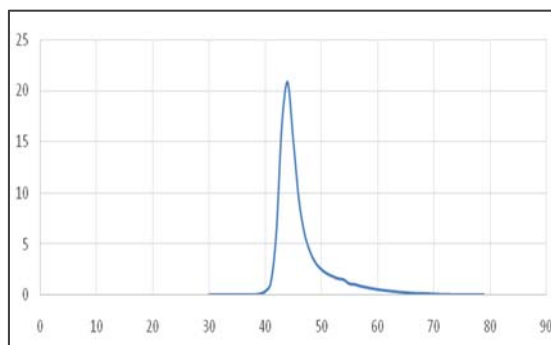
$$BT_c = BT_k - 273.15$$

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 نرم‌الایز کردن دمای روشنایی ماهواره‌ای در واحد درجه‌ی سلسیوس بر پایه‌ی Emissivity حرارت سطوح شهری به صورت نقشه استخراج شده است. شکل (۵) نقشه فضایی انرژی حرارتی سطوح کلانشهر تهران را برای تابستان ۱۳۹۵ نشان می‌دهد.



شکل (۵): انرژی حرارتی سطوح کلانشهر تهران در تابستان ۱۳۹۵

همین‌طور در ادامه شکل (۶) پراکنش فضایی شاخص سبزیگی برای تابستان ۱۳۹۵ را نشان می‌دهد. میانگین این شاخص در مناطق مختلف شهر تهران ۰٫۱ برآورد شده است.



شکل (۴): سهم نرم‌الایز شده شاخص سبزیگی در مرداد ۱۳۸۲ تهران

جهت برآورد فضایی حرارت سطح کلانشهر تهران در تابستان ۱۳۹۵ از تصویر ماهواره‌ای Landsat8 در تاریخ آگوست ۲۰۱۵ (اواخر مرداد ۱۳۹۵) در وضعیت بدون پوشش ابری و هوای صاف بهره گرفته شده است. بعد از استخراج تصویر ماهواره‌ای از Landsat8 در سنسور OLI (Operational Land Imager) دو 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 DN 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 (رضایی‌راد و رفیعیان، ۱۳۹۶):

$$L_\lambda = (L_{max} - L_{min} / Q_{calmax} - Q_{calmin}) * (Q_{cal} - Q_{calmin}) + L_{min}$$

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

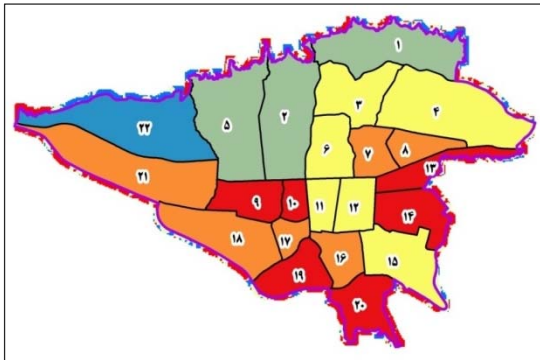
Grescale = عامل افزایش تغییر مقیاس یک باند خاص

در DN است.

Brescale = عامل متمایل به تغییر مقیاس یک باند

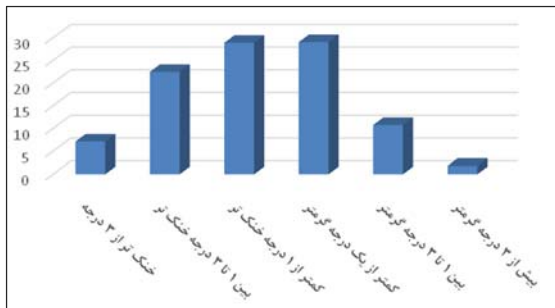
خاص در DN است.

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.



شکل (۸): دسته‌بندی میانگین میزان تغییرات انرژی حرارتی سطح با تحلیل خوشه‌ای در یک دهه اخیر

همچنین شکل (۹) نمودار زیر درصد سهم مناطق و نواحی مختلف را در شش دسته تغییرات دمایی سطوح در یک دهه اخیر را نشان می‌دهد. طبق نمودار زیر بیش از ۵۰ درصد کلانشهر تهران بین ۱- تا ۱ تغییر درجه‌ی حرارتی در یک دهه اخیر همراه بوده‌اند. بیش از ۲۰ درصد مساحت شهر بین ۱ تا ۳ درجه خنک‌تر شده است، همچنین نزدیک به ۱۰ درصد مساحت بین ۱ تا ۳ درجه گرم‌تر شده است.

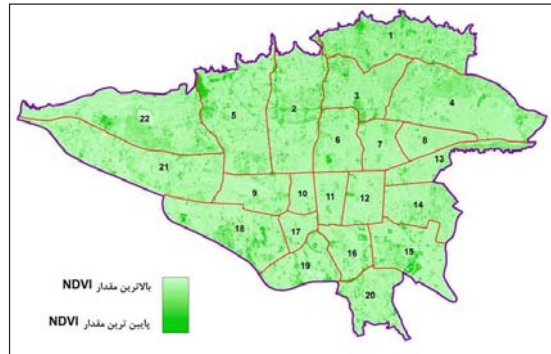


شکل (۹): نمودار درصد سهم مناطق مختلف در شش دسته تغییرات انرژی حرارتی سطوح در یک دهه اخیر تهران

در ارتباط با مقایسه سبزیگی شهری هم جدول (۲) مقایسه‌ی آماری را بین این شاخص در طی یک دهه‌ی اخیر بازگو می‌کند.

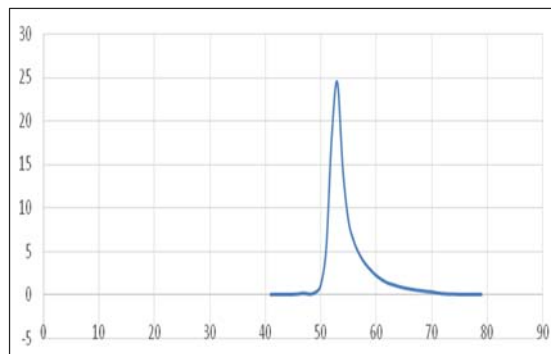
جدول (۲): مشخصات آماری شاخص سبزیگی

میانگین	بیشینه	کمینه	شاخص سبزیگی
-۰,۰۶	۰,۵۸	-۰,۳۸	تابستان ۱۳۸۲
+۰,۱۰	۰,۵۸	-۰,۱۷	تابستان ۱۳۹۵



شکل (۶): شاخص سبزیگی کلانشهر تهران در تابستان ۱۳۹۵

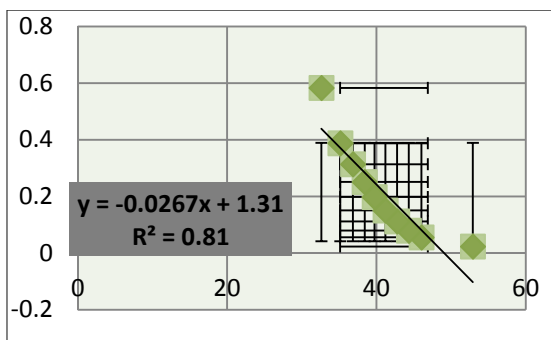
شکل (۷) نمودار میزان سهم نرمالایز شده شاخص سبزیگی در تابستان ۱۳۹۵ نشان می‌دهد. طبق این نمودار افزایش میانگین میزان این شاخص در یک دهه اخیر در شهر تهران مشاهده می‌گردد، البته در برخی مناطق این میزان کاهش روبرو بوده است.



شکل (۷): سهم نرمالایز شده شاخص سبزیگی در تابستان ۱۳۹۵ تهران

مقایسه خروجی‌ها نشان می‌دهد کمینه‌ی حرارت در سال ۱۳۸۲ با مقدار ۲۵,۸۰ درجه سانتی‌گراد بیش از سال ۱۳۹۵ با ۲۲,۱۳ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین میانگین انرژی حرارتی 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 ۱۳۹۵ کاهش یافته است. بیشینه‌ی حرارت در سال ۱۳۹۵ نزدیک به ۰,۷ درجه‌ی سانتی‌گراد بالاتر از حرارت در سال ۱۳۸۲ می‌باشد. در ادامه شکل (۸) میانگین تغییرات انرژی حرارتی سطح با تحلیل خوشه‌ای در یک دهه اخیر مناطق ۲۲گانه شهر تهران نشان داده شده است. افزایش طیف رنگی گرم در نقشه‌ی زیر افزایش انرژی حرارتی سطح را در یک دهه اخیر مناطق شهری تهران نشان می‌دهد.

در ادامه برآورد همبستگی برای این متغیر در سال ۱۳۹۵ هم محاسبه شده است که شکل (۱۲) این ارتباط را نشان داده است.

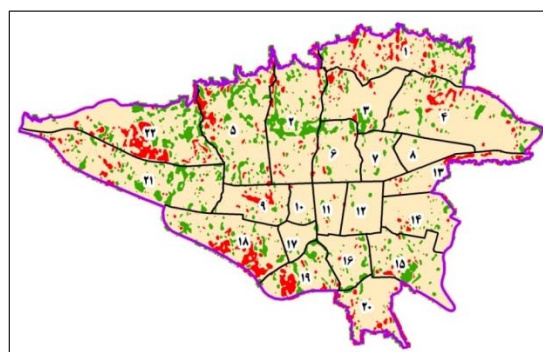


شکل (۱۲): همبستگی فضایی بین LST و NDVI در تابستان سال ۱۳۹۵

برآوردهای رگرسیونی در طی این یک دهه نشان می‌دهد علی‌رغم کاهش انرژی حرارتی سطوح شهر، مقدار همبستگی فضایی بین LST و NDVI از ۰٫۸۳ سال ۱۳۸۲ به مقدار ۰٫۸۱ سال ۱۳۹۵ کاهش یافته است. این کاهش همبستگی نشان از افزایش نقش سایر عوامل از جمله سیاستهای کالبدی- عملکردی در طرحهای توسعه شهری و همچنین اثرگذاری فعالیتهای متنوع انسانی بر میزان دما و انرژی حرارتی شهر دارد. لذا الگوهای مختلف شهرسازی را می‌توان اصلی‌ترین عامل در تغییر الگوی انرژی حرارتی سطوح کلانشهر تهران دانست، 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 گرمایی 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 انرژی حرارتی سطوح شهری در زمانهای متفاوت جهت برنامه‌ریزی، سیاستگذاری و تصمیم‌سازی مدیریت شهری با هدف نهایی مدیریت بهینه در مصرف انرژی شهری استفاده نمود. همچنین با توجه به نتایج می‌توان جهت کاهش مصرف انرژی شهری در راستای به تعادل رساندن انرژی سطح شهر استفاده‌ی بیشتر از گونه‌های مناسب با اقلیم پوشش گیاهی، استفاده از مصالح با ضریب آلبدو (بازتاب) بالا، استفاده از

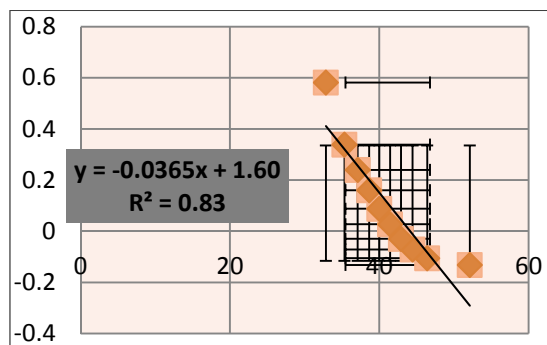
جدول فوق نشان می‌دهد میانگین شاخص پوشش گیاهی نرمال شده در طی یک دهه‌ی اخیر در شهر تهران از ۰٫۰۶- به ۰٫۱۰ افزایش یافته است. همچنین قابل ذکر است در بیشینه‌ی این شاخص تفاوت آنچنانی دیده نمی‌شود، اما در کمینه‌ی آن افزایش ۰٫۲۱ به چشم می‌خورد. شکل (۱۰) الگوی تغییرات شاخص سبزیگی یک دهه اخیر براساس تحلیل خوشه‌ای را به صورت فضایی نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): الگوی تغییرات شاخص سبزیگی یک دهه اخیر براساس تحلیل خوشه‌ای

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 محاسبه‌ی رگرسیونی فضایی در محیط GIS همبستگی فضایی بین دو لایه‌ی مورد نظر برای هر سال محاسبه شده است. شکل (۱۱) نمودار ارتباط و معادلات رگرسیونی بین حرارت سطح و شاخص سبزیگی را در سال ۱۳۸۲ ترسیم کرده است.



شکل (۱۱): همبستگی فضایی بین LST و NDVI در تابستان سال ۱۳۸۲

ویژه به الگوهای بهینه توسعه کالبدی- عملکردی را به برنامه‌ریزان و مدیران شهری پیشنهاد نمود.

بام‌های سبز، تعیین پهنه‌های مختلف با سکونت در کلیه مناطق شهر، انتقال کاربری‌های پر حرارت همچون کارگاهی- صنعتی سنگین به بیرون محدوده‌ی شهر و توجه

منابع

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 مردودشت. ——— (۱۳۹۶). «روندپایی تغییرات حرارتی سطوح شهر تهران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای». نشریه علمی- پژوهشی پژوهش‌های محیط زیست. تهران.

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 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

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 Mitgating 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.