

تحلیل زمانی - مکانی جزیره حرارتی شهر مشهد با توجه به گسترش شهر و تغییرات

کاربری - پوشش زمین

سید کاظم علوی‌پناه - استاد سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی دانشگاه تهران
سیروس هاشمی دره بادامی - دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی دانشگاه تهران
علی کاظم‌زاده* - دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۴ تأیید مقاله: ۱۳۹۴/۲/۴

چکیده

افزایش دمای سطح زمین و شکل‌گیری جزایر حرارتی در کلان‌شهرها به یکی از معضلات زیست‌محیطی تبدیل شده است که در نتیجه گسترش برنامه‌ریزی نشده این شهرها پدید آمده است. امروزه استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در مطالعات محیط زیست شهری به دلیل فراهم آوردن دید یکپارچه و کاهش هزینه و زمان انجام مطالعات، رشد فزاینده‌ای داشته است. هدف از این مطالعه بررسی تغییرات دمایی و گسترش جزیره حرارتی در شهر مشهد به دنبال گسترش این شهر در دهه‌های اخیر است. در این تحقیق با استفاده از تصاویر چندزمانه لندست (TM ۱۹۸۷، ETM+ ۲۰۰۰ و OLI/TIRS ۲۰۱۴) و روش حد آستانه NDVI و قانون پلانک برای تصاویر TM و ETM+ و الگوریتم دو پنجره برای تصاویر OLI/TIRS، دمای سطح زمین استخراج شد. سپس دمای سطح زمین نرمال گردید و رابطه آن با کسر پوشش گیاهی و تغییرات کاربری - پوشش زمین بررسی شد. نتایج نشان داد که حدود ۲۵۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی و فضای سبز به کاربری ساخته شده تبدیل شده که تقریباً برابر با افزایش مساحت طبقه دمایی بسیار گرم بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که کاهش پوشش گیاهی، مهم‌ترین عامل در گسترش جزایر حرارتی شهر مشهد بوده است. بررسی تغییرات دمای سطح زمین و جزیره حرارتی نشان داد با از بین رفتن پوشش گیاهی داخل و اطراف شهر طبقه دمایی بسیار خنک (۲۹-۲۵ درجه سانتیگراد)، جای خود را به طبقه دمایی متوسط (۳۷-۳۳ درجه) داده است. همچنین با دستکاری دامنه‌های اطراف شهر، دمای آنها افزایش یافته و به طبقه دمایی گرم (۴۱-۴۱ درجه) و بسیار گرم (۴۵-۴۱ درجه) تغییر یافته‌اند. نتایج تغییرات توزیع دمای سطح نشان داد که چندین خوشه دمایی در شمال غرب، جنوب و جنوب غرب مشهد توسعه یافته‌اند. این تغییرات در شمال غرب به دلیل دستکاری اراضی متصل به شهر برای آماده‌سازی این اراضی برای گسترش آتی شهر و در جنوب به دلیل توسعه فرودگاه بوده است. همچنین دامنه‌های رو به آفتاب در غرب و جنوب غرب به دلیل دستکاری این دامنه‌ها گرم‌تر شده‌اند. علاوه بر این، تبدیل اراضی کشاورزی در شرق و شمال شرق باعث تغییر دما از طبقه دمایی خیلی خنک و خنک (۳۳-۲۹ درجه) به متوسط و تا حدودی گرم شده است.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم دو پنجره، تغییرات کاربری - پوشش زمین، جزایر حرارتی شهری، دمای سطح زمین، مشهد.

مقدمه

در طول نیم قرن گذشته، سطح زمین دستخوش تغییرات فراوانی ناشی از فعالیت‌های انسانی از طریق جنگل‌زدایی و توسعه شهرها شده است (Owen et al., 1998: 1665). تغییرات سریع کاربری - پوشش زمین در مناطق شهری تبدیل به نگرانی عمده زیست‌محیطی و علت مشکلات زیست‌محیطی فراوانی از جمله کاهش فضای سبز و توسعه جزیره حرارتی شده است (Amiri et al., 2009: 2607). توسعه مناطق شهری موجب تغییر در چشم‌انداز شده، ساختمان‌ها، جاده‌ها و دیگر زیرساخت‌ها، جایگزین زمین‌های باز و پوشش گیاهی گردیده است. جایگزین شدن پوشش طبیعی زمین با سنگ‌فرش، ساختمان‌ها، بتن، آسفالت و دیگر ساخت‌وسازهای شهری، اثرات خنک‌کنندگی سطوح طبیعی را از بین می‌برند. علاوه بر آن، حرارت وسایل نقلیه، کارخانه‌ها و وسایل تهویه هوا، گرمای محیطی را افزایش و همچنین ساختمان‌های بلند و خیابان‌های باریک جریان هوا را کاهش می‌دهند و هوای پیرامون را گرم می‌کنند. این تغییرات منجر به شکل‌گیری جزیره حرارتی شهری می‌شود؛ پدیده‌ای که به موجب آن مناطق شهری درجه حرارت گرم‌تر از محیط روستایی اطراف خود را تجربه می‌کنند (Rose & Devadas, 2009), (Xu et al., 2011: 2), (Liu & Zhang, 2011: 1537). عوامل زیادی در ایجاد جزایر حرارتی شهری دخیل‌اند که به‌طور کلی می‌توان آنها را به دو گروه قابل کنترل و غیرقابل کنترل تقسیم کرد. این عوامل در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. این عوامل قابل کنترل و غیرقابل کنترل را می‌توان به‌گونه‌ای دیگر نیز دسته‌بندی کرد: متغیرهای با تأثیر موقتی مانند سرعت باد و پوشش ابر، متغیرهای با تأثیر ثابت و پایدار مانند فضاهای سبز، مصالح ساختمانی، و عامل دید آسمان و در نهایت متغیرهای با تأثیر دوره‌ای یا چرخه‌ای مانند تابش خورشیدی و منابع گرمایی ناشی از فعالیت‌های انسان. به‌طور کلی گرمای تولیدشده در یک سطح، از خورشید به شکل تابش خورشیدی، صنایع و کارخانه‌های بزرگ، اتومبیل‌ها، سیستم‌های تهویه هوا و دیگر منابع مربوط به فعالیت‌های انسانی، ناشی می‌شود (Rizwan et al., 2008: 122). از زمان اولین مشاهده‌های جزیره حرارتی شهری خط مشی‌های زیادی مبنی بر خنک‌سازی شهرها دنبال شده است. این موضوع با توجه به افزایش جمعیت شهری در آینده و ایجاد محیط‌های شهری راحت‌تر و باکیفیت‌تر و همچنین نگرانی‌های مربوط به مصرف انرژی و به حداقل رساندن انرژی مورد استفاده برای دستیابی به آسایش حرارتی مورد تأکید بوده است. علاوه بر این، با پیش‌بینی‌های گرمایش جهانی و تهدید به افزایش بیشتر دمای شهرها در سراسر جهان، حتی ممکن است تکنیک‌های خنک‌کننده شهری در دهه‌های آینده مهم‌تر شوند (Mackey et al., 2012: 349), (Smith & Levermore, 2008: 4559). داده‌های سنجش از دور حرارتی یک منبع منحصر به فرد برای تعریف جزیره حرارتی سطح است که با جزیره حرارتی تاج پوشش شهری در ارتباط است. داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک دارای قدرت تفکیک زمانی بالا و پوشش بلندمدت است، اما فاقد جزئیات فضایی است. داده‌های سنجش از دور حرارتی می‌تواند به‌طور مستمر یک دید کلی از همه شهر داشته باشد و اهمیت ویژه‌ای برای بررسی دقیق اقلیم سطح شهر دارد (Weng, 2009: 336). بهبود قدرت تفکیک مکانی و طیفی نسل حاضر و آینده سنسورهای سنجش از دور، در نمایش مفصل‌تر از سطوح شهری قابل دسترس با هزینه کم باعث پیشرفت در کاربرد سنجش از دور در مطالعه آب‌وهوای مناطق شهری شده است (Voogt & Oke, 2003: 373). دمای سطح زمین یکی از مهم‌ترین متغیرهایی است که توسط سنجش از دور اندازه‌گیری می‌شود. مجموعه‌ای از سنجنده‌های

هوابرد برای جمع‌آوری داده‌های حرارتی از سطح زمین توسعه یافته‌اند (مانند Landsat TM/ETM, HCMM, AVHRR, MODIS, Aster, Tims). علاوه بر اندازه‌گیری دمای سطح زمین، این سنجنده‌ها ممکن است برای برآورد توان تشعشعی در دقت‌ها و قدرت تفکیک‌های متفاوت به کار روند (Weng, 2009: 338). تصاویر حرارتی به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی جزیره حرارتی شهری به کار رفته است. پژوهش‌ها بیشتر روی الگوهای دمای سطح زمین و ارتباط آنها با ویژگی بیوفیزیک سطوح شهری به‌ویژه با شاخص‌های پوشش گیاهی (sobrino & Raissouni, 2000: 467; Weng et al., 2004: 467) و انواع کاربری (پوشش زمین Amiri et al., 2005: 237; xiao & Moddy, 2005: 237; Xu et al., 2011: 1; Mo et al., 2011) به بررسی‌های آماری از جزیره حرارتی و تغییرات زمانی - مکانی جزیره حرارتی علاقه‌مند بوده‌اند. به‌طور کلی محیط‌های شهری ترکیبی از کاربری‌ها و مصالح ساختمانی مختلف‌اند. در تفکیک تصاویر حرارتی لندست، پیکسل‌های حرارتی مخلوطی از پدیده‌های مختلف‌اند و نمی‌توان جزایر حرارتی را با استفاده از این تصاویر به‌صورت مطلق و با نقش مواد و کاربری‌های مجزا بررسی کرد. پس باید به بررسی‌های نسبی از جزیره حرارتی اکتفا کرد. همچنین محاسبه جزیره حرارتی شهری و نسبت دادن آن با یکی از عوامل مؤثر در جزیره حرارتی مانند شاخص‌های پوشش گیاهی، تغییرات کاربری اراضی و تغییرات زمانی مکانی به‌صورت جداگانه، واقعیات را به‌خوبی نمایش نمی‌دهد. بنابراین، بررسی همه‌جانبه جزیره حرارتی شهری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند تا حدودی بیان‌کننده واقعیات باشد. گسترش شهر مشهد در دو دهه اخیر موجب پدید آمدن مسائل زیست‌محیطی متعددی از قبیل آلودگی هوا و جزیره حرارتی شهری شده است. مشکلات مذکور منجر به کاهش کیفیت هوا و سلامت زندگی شهری شده و احتمال بروز بیماری‌هایی مانند آسم، بی‌خوابی و دیگر بیماری‌های تنفسی را افزایش داده است.

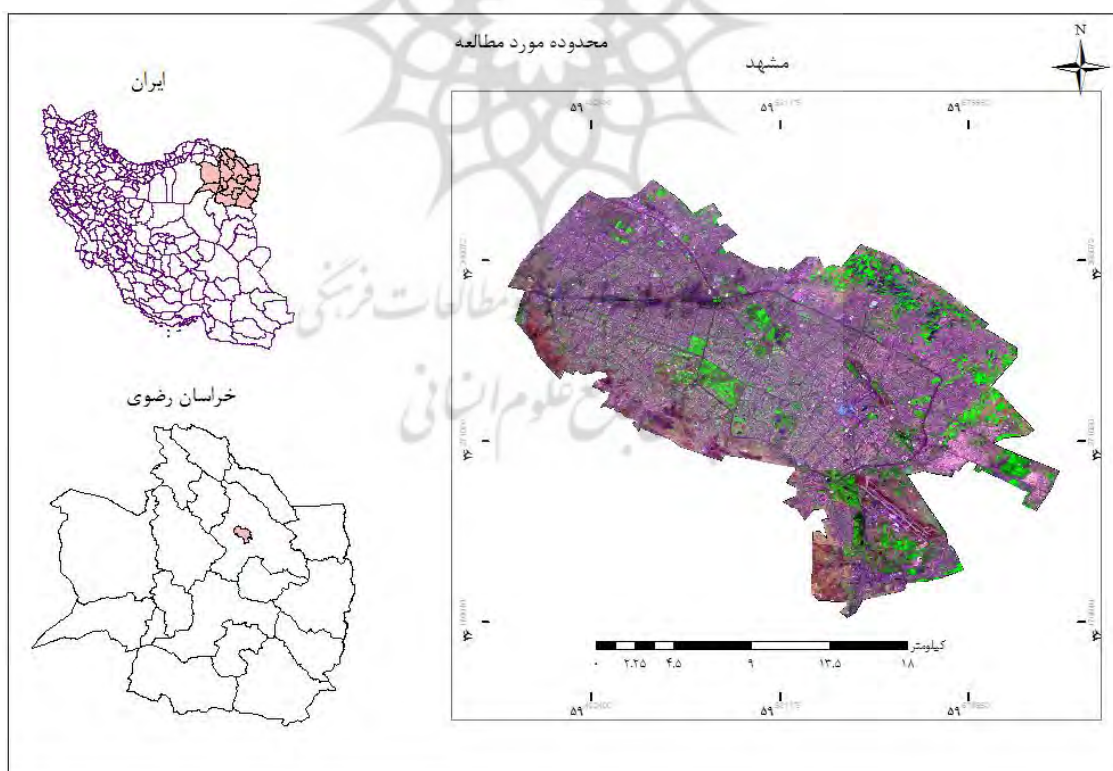


شکل ۱. عوامل ایجاد جزیره حرارتی شهری (Rizwan et al., 2008)

بنابراین نیاز به تحقیقات و برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی شهری در این شهر دو چندان شده است. این بررسی‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در دسترس و بهبود تکنیک‌های پردازش تصویر با سهولت و کمترین هزینه ممکن می‌تواند صورت پذیرد. در این تحقیق با استفاده از تصاویر چندزمانه لندست (TM، ETM+ و OLI) تغییرات توزیع زمانی- مکانی جزیره حرارتی شهر مشهد نسبت به تغییرات گسترش شهری، پوشش گیاهی، کاربری - پوشش زمین به‌طور هم‌زمان بررسی شده است.

محدوده تحت مطالعه

مشهد شهری در شمال شرقی ایران و مرکز استان خراسان رضوی است. این شهر بین عرض‌های ۳۵ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۲ دقیقه شمالی و طول ۵۹ درجه و ۲ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی واقع شده است. ارتفاع متوسط این شهر از سطح دریا ۹۸۵ متر و وسعت آن حدود ۲۸۸ کیلومتر مربع است. این شهر در دشت مشهد در حد فاصل رشته‌کوه‌های کپه‌داغ و بینالود واقع شده است (آمارنامه شهر مشهد، ۱۳۹۱: ۱۶ و ۲۰). از نظر اقلیمی، این شهر دارای اقلیم سرد و خشک نیمه‌بیابانی است و میانگین بارش سالانه آن حدود ۲۵۰ میلیمتر است. میانگین دمای سالانه این شهر برای ۵۰ سال آماری ۱۴ و ۳ درجه سانتیگراد بوده است (سازمان هواشناسی ایران).

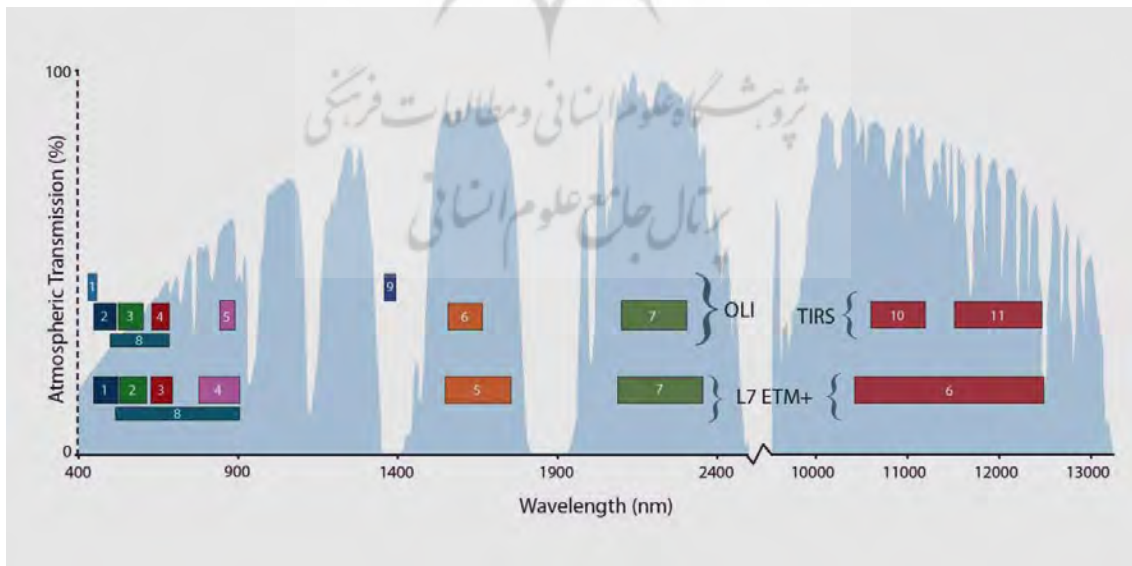


شکل ۲. موقعیت محدوده تحت مطالعه

مشهد دومین کلان شهر بزرگ ایران است که در دهه های اخیر به ویژه از سال ۱۳۵۵ رشد چشمگیری داشته است. به طوری که جمعیت آن از ۶۶۷ هزار نفر در سال ۱۳۵۵ به ۲۷۷۲ هزار نفر در سال ۱۳۹۰ رسیده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۳). به تبع افزایش جمعیت، این شهر از نظر فیزیکی نیز رشد زیادی داشته است. به طوری که با مشاهده تصاویر ماهواره ای می توان دریافت که از سال ۱۳۶۶ تا کنون مساحت این شهر حدود دو برابر شده است. این میزان رشد نشان می دهد که شهر مشهد به صورت افقی و پراکنده در حال گسترش در اراضی اطراف است.

مواد و روش ها

برای مقایسه و بررسی های تصاویر ماهواره ای چندزمانه در حالت ایده آل، داشتن تصاویر مربوط به یک روز در سال های مختلف مناسب است. اما با توجه به مشکلاتی از قبیل در دسترس نبودن تصویر، دوره زمانی عبور ماهواره از منطقه، پوشش ابر و...، استفاده از تصاویر نزدیک به هم ارجحیت دارد. بنابراین در این تحقیق از تصاویر سنجنده TM (۱۹۸۷/۵/۱)، سنجنده ETM+ (۲۰۰۰/۵/۲۸) و سنجنده OLI (۲۰۱۴/۵/۱۱) استفاده گردید (جدول ۱). برای تصحیح هندسی از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ مشهد استفاده شد و خطای RMSE کمتر از ۰/۵ پیکسل به دست آمد. برای تصحیحات اتمسفری بر روی تصاویر از الگوریتم FLASH استفاده شد. این ابزار از مدل عبور اتمسفری MODTRAN4 برای تصحیحات اتمسفری استفاده می کند که داده هایی مانند زمان عبور ماهواره، ارتفاع سنجنده، موقعیت جغرافیایی منطقه، زاویه تابش خورشید و مدل اتمسفری منطقه ای را به کار می برد. سپس دیگر تبدیلات روی تصاویر برای استخراج اطلاعات صورت گرفت.



شکل ۳. محدوده طیفی باندهای سنجنده های ETM+ و OLI (محدوده طیفی باندهای سنجنده TM با اختلاف خیلی ناچیز، شبیه سنجنده ETM+ است، با این تفاوت که سنجنده TM باند ۸ (پن کروماتیک) را ندارد).

جدول ۱. مشخصات قدرت تفکیک مکانی، رادیومتریک سنجنده‌های TM، ETM+ و OLI/TIRS

ماهواره/ سنجنده	تفکیک مکانی	تفکیک مکانی باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی	تفکیک باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی	تفکیک باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی
لندست ۵ / TM	۸ بیت	۱۲۰ * ۱۲۰ متر	۳۰ * ۳۰ متر	ندارد
لندست ۷ / ETM+	۸ بیت	۶۰ * ۶۰ متر	۳۰ * ۳۰ متر	۱۵ * ۱۵ متر
لندست ۸ / OLI/TIRS	۱۶ بیت	۱۰۰ * ۱۰۰ متر	۳۰ * ۳۰ متر	۱۵ * ۱۵ متر

به دست آوردن رادیانس طیفی در سنجنده^۱

برای تبدیل ارزش‌های خام تصویر به رادیانس در سنجنده برای تصاویر لندست TM و ETM از رابطه^۱ استفاده می‌شود.

$$L = \left(\frac{LMAX - LMIN}{Qcalmax - Qcalmin} \right) (Qcal - Qcalmin) + LMIN \quad (1)$$

L رادیانس طیفی در سنجنده [W/(m²sr m)]، Qcal ارزش پیکسل، Qcalmin حداقل ارزش پیکسل، Qcalmax حداکثر ارزش پیکسل، LMAX و LMIN حداقل و حداکثر رادیانس طیفی در سنجنده [W/(m²sr μm)]. جزئیات دقیق درباره ارزش LMAX و LMIN برای باندهای مختلف ماهواره لندست در مقاله چاندر^۲ و همکاران (۲۰۰۹) موجود است.

برای به دست آوردن رادیانس طیفی در سنجنده OLI از رابطه^۲ استفاده می‌شود:

$$L = ML * Qcal + ML \quad (2)$$

در این رابطه، L رادیانس در بالای اتمسفر (m²*sr*Watts)، ML ضریب تبدیل ضریبی، Qcal ارزش پیکسل باند ۱۰ و ۱۱ و AL ضریب تبدیل تجمیع کننده است (Rajeshwari A, Mani N d). ضرایب ML و AL در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. فاکتور تغییر مقیاس برای باندهای ۱۰ و ۱۱ سنجنده OLI

ضریب کالیبراسیون	M _L باند ۱۰	A _L باند ۱۰	M _L باند ۱۱	A _L باند ۱۱
مقدار ضریب	۰/۰۰۰۳۴۲	۰/۱	۰/۰۰۰۳۴۲	۰/۱

1. At Sensor Spectral Radiance

2. Chandrer

به دست آوردن ضریب انعکاس

ضریب انعکاس روی زمین طبق رابطه ۳ محاسبه می شود:

$$= \frac{L \cdot d^2}{ESUN \cdot \cos_s} \quad (3)$$

ρ_λ ضریب انعکاس، $\pi = 3.14159$ ، L_λ رادیانس طیفی در سنجنده $[W/(m^2 sr \cdot \eta)]$ ، d فاصله زمین تا خورشید (واحد نجومی)، $ESUN$ میانگین تابش خورشید $[W/(m^2 sr \cdot \eta)]$ و θ زاویه تابش خورشید^۱ (درجه).

به دست آوردن دمای درخشندگی^۲

داده های باندهای حرارتی می تواند از رادیانس طیفی در سنجنده به دمای درخشندگی تبدیل شود. دمای درخشندگی با فرض اینکه زمین جسم سیاه^۳ است ($\text{emissivity} = 1$) محاسبه می شود و شامل تأثیرات اتمسفر است (جذب و تشعشع^۴). دمای درخشندگی با استفاده از ضرایب کالیبراسیون سنجنده از رابطه ۴ به دست می آید:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (4)$$

T دمای مؤثر درخشندگی در سنجنده بر حسب کلوین، K_2 ضریب کالیبراسیون^۲ بر حسب کلوین، K_1 ضریب کالیبراسیون^۱ بر حسب $[W/(m^2 sr \cdot \eta)]$ و L رادیانس طیفی در سنجنده است. ضرایب k_1 و k_2 بر اساس جدول ۳ است:

جدول ۳. ضرایب کالیبراسیون باندهای حرارتی سنجنده های TM، ETM+ و OLI (Chander et al., 2009)

ضریب سنجنده (باند)	K_1 $W/(m^2 sr \cdot \eta)$	K_2 کلوین
L5 - TMB6	607/76	1260/56
L7 - ETM+B6	666/09	1282/71
L8 - OLI B10	777/89	1321/08
L8 - OLI B11	480/89	1201/14

1. Solar Zenith Angle
2. Brightness Temperature
3. Black Body
4. Absorption and Emissions

به‌دست آوردن دمای سطح زمین^۱

به‌دست آوردن دمای سطح زمین نیازمند دانش پیرامون توان تشعشعی سطح زمین^۲ (LSE) است. برای به‌دست آوردن توان تشعشعی از روش ترکیبی آستانه NDVI و طبقه‌بندی تصویر استفاده شد. 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 (Lenney et al., 1996). NDVI را با استفاده از روش‌های زیر می‌توان محاسبه کرد.

برای داده‌های سنجنده‌های TM و ETM+ مقدار NDVI از رابطه ۵ به‌دست می‌آید.

$$NDVI_{TM\&ETM+} = (B4 - B3) / (B4 + B3) \quad (5)$$

B4: باند مادون قرمز نزدیک و B3: باند قرمز در این سنجنده‌ها است.

همچنین برای سنجنده OLI لندست ۸ مقدار NDVI از رابطه ۶ به‌دست می‌آید.

$$NDVI_{OLI/TIRST} = (B5 - B4) / (B5 + B4) \quad (6)$$

توان تشعشعی سطح زمین (LSE) با استفاده از ترکیب روش آستانه NDVI و طبقه‌بندی تصاویر برآورد شد (B5 باند مادون قرمز نزدیک و B4 باند قرمز سنجنده).

$$LSE = \varepsilon_s (1 - Fr) + \varepsilon_v * FVC \quad (7)$$

$$FVC = \left[\frac{NDVI - NDVImin}{NDVImax - NDVImin} \right]^2 \quad (8)$$

در این رابطه ε_s و ε_v به ترتیب مقادیر توان تشعشعی خاک و پوشش گیاهی و Fr کسر پوشش گیاهی است (رابطه ۸). کسر پوشش گیاهی برای یک پیکسل محاسبه می‌شود. برای یک تصویر از رابطه ۸ استفاده می‌کنیم. در این رابطه NDVImax، مربوط به پوشش گیاهی (بیشترین میزان NDVI) و NDVImin، مربوط به خاک (کمترین میزان NDVI) است. شاخص Fr برای محیط‌های با پوشش ترکیبی مانند محیط شهری که عوارض متعددی در داخل یک پیکسل قرار می‌گیرند، مناسب است. زیرا این شاخص فقط اطلاعات مربوط به سطح پوشش داده‌شده توسط پوشش گیاهی را در اختیار ما می‌گذارد و از اطلاعات مربوط به تراکم پوشش گیاهی که منجر به غیرواقعی نشان داده شدن میزان این پوشش می‌شود، چشم‌پوشی می‌کند.

برای طبقه‌بندی تصاویر از الگوریتم حداکثر احتمال استفاده شد. در این روش طبقه‌بندی، هر پیکسل به کلاسی انتساب داده می‌شود که بیشترین احتمال تعلق به آن کلاس را دارد (فاطمی و رضایی، ۱۳۸۹: ۲۱۵). در واقع در این روش از واریانس و کوواریانس کلاس‌ها استفاده می‌شود و هر پیکسل تصویر به کلاسی که بیشترین شباهت را با آن دارد اختصاص داده می‌شود (علوی‌پناه، ۱۳۹۲: ۳۱۱). در این مطالعه، تصاویر به ۵ طبقه (فضای سبز شهری، اراضی کشاورزی، خاک بایر، آب و فضای ساخته‌شده شهری) تقسیم گردید. برای طبقات آب، پوشش گیاهی، اراضی کشاورزی، خاک و اراضی ساخته‌شده به ترتیب توان تشعشعی ۰/۹۹، ۰/۹۸۵، ۰/۹۵، ۰/۹۲ و ۰/۸۵ استخراج شد. با به‌دست آوردن

1. Land Surface Temperature
2. Land Surface Emissivity

مقادیر توان تشعشعی، دمای سطح زمین برای تصاویر TM و ETM+ از رابطه ۹ محاسبه می‌شود (Artis & Carnahan, 1982).

$$T_s = \frac{T}{\left[1 + \left(\frac{\lambda T}{\alpha}\right) \ln \varepsilon\right]} \quad (9)$$

در این رابطه λ طول موج رادیانس ساطع شده، $\alpha = hc/k$ ، ثابت پلانک ($6.62 \times 10^{-34} \text{ j. sec}$)، C سرعت نور ($2.998 \times 10^8 \text{ m/sec}$)، k ثابت استفان بولتزمن ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)، و ε گسیلمندی است. برای به دست آوردن دمای سطح زمین از داده‌های حرارتی لندست ۸ TIRS از الگوریتم دو پنجره استفاده شد (رابطه ۱۰).

$$LST = TB_{10} + C_1(TB_{10} - TB_{11}) + C_2(TB_{10} - TB_{11})^2 + C_0 + (C_3 + C_4 w)(1 - \varepsilon) + (C_5 + C_6 w) \Delta \varepsilon \quad (10)$$

در این رابطه LST دمای سطح زمین به کلون، C_0 تا C_6 ضرایب و مقادیر الگوریتم دو پنجره (جدول ۴) TB_{11} و TB_{10} ، (Skokovic et al, 2014), (Sobrino et al., 1996-2003), (Shaouhua Zhao et al., 2009) دمای روشنایی باند ۱۰ و باند ۱۱ (کلون)، میانگین LSE (توان تشعشعی سطح زمین) باندهای مادون قرمز حرارتی، W میزان بخار آب اتمسفر، و اختلاف LSE است.

جدول ۴. مقادیر ضرایب مورد استفاده در الگوریتم دو پنجره

ضریب	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
ارزش	-۰/۲۶۸	۱/۳۷۸	۰/۱۸۳	۵۴/۳۰۰	-۲/۲۳۸	-۱۲۹/۲۰	۱۶/۴۰۰

در نهایت، به دلیل هم‌زمان نبودن تصاویر حرارتی اخذ شده و ناهمگن بودن طبقات کاربری شهری در تصاویر به علت تغییرات، برای نتیجه‌گیری و بررسی تغییرات، دمای سطح به دست آمده نرمال شد. مناطق دارای بیشترین حرارت (T_{max}) و خنک‌ترین حرارت (T_0) به ترتیب برای خاک خشک و آب در همه تصاویر تعیین شدند و برای تولید حرارت نرمال شده در رابطه ۱۱ قرار گرفتند.

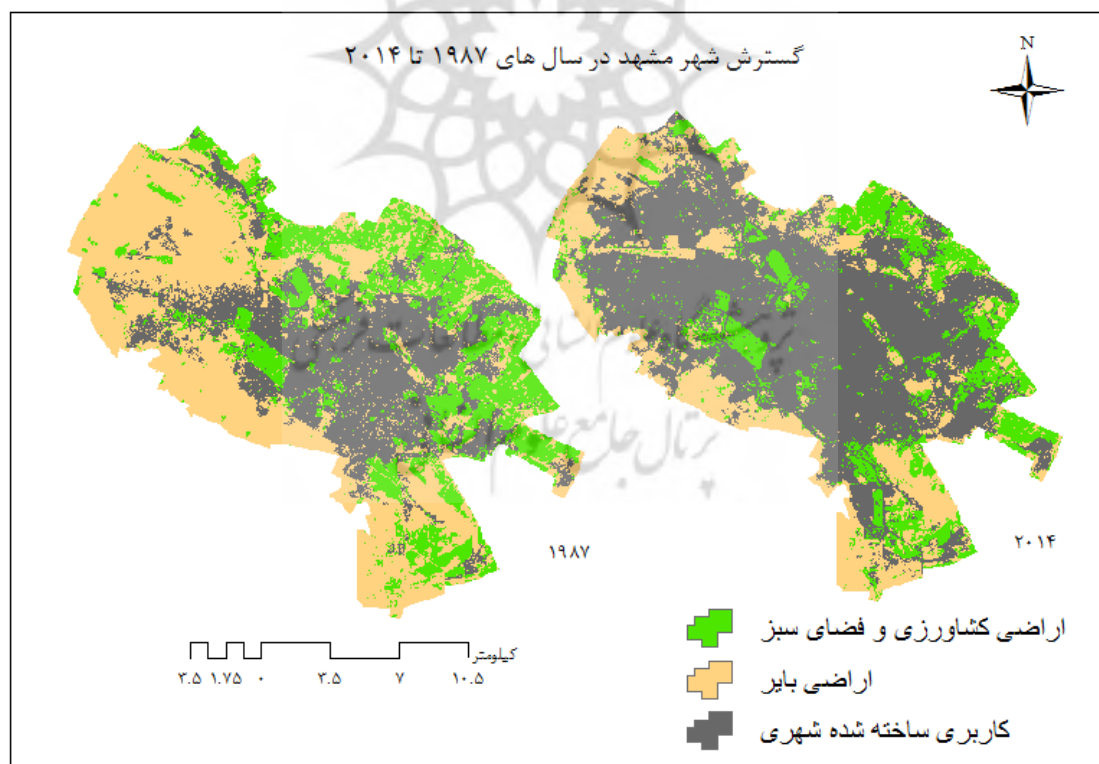
$$T^* = (T_s - T_0) / (T_{max} - T_0) \quad (11)$$

نرمال‌سازی NDVI که از رابطه ۸ در بالا به دست آمد، می‌تواند خطای رخ داده در کالیبراسیون و تصحیحات اتمسفری را نیز کاهش دهد (Owen et al., 1998). نسبت پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر به دست آمده به شکل زیر محاسبه شد:

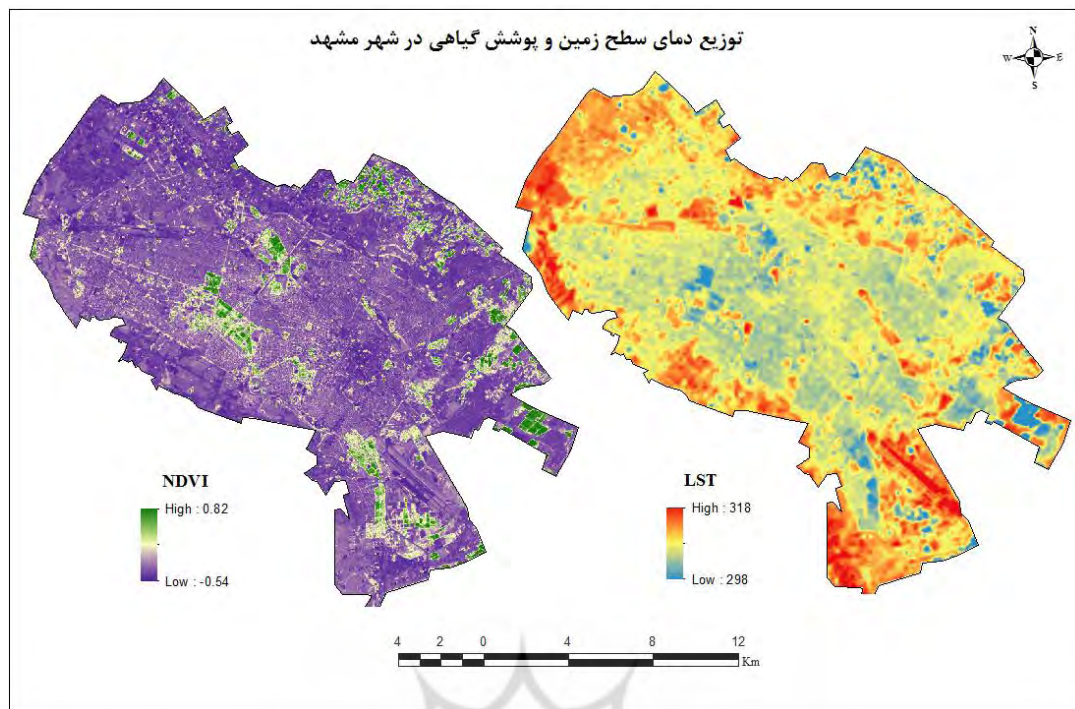
$$Fr = FVC^2 \quad (12)$$

بحث و نتایج

قبل از هر گونه بررسی روی جزیره حرارتی شهری و تغییرات آن ابتدا رشد و گسترش شهر مشهد در دوره تحت مطالعه بررسی شد. نتایج نشان داد (شکل ۴) طی این دوره وسعت شهر حدود دو برابر (۱/۹) شده است. طی این توسعه حدود ۲۵۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی و باغ‌های اطراف شهر از بین رفته است. همچنین حدود ۶۴۰۰ هکتار از اراضی بایر به کاربری شهری تبدیل شده است. این تغییرات موجب شده است که حدود ۸۹۰۰ هکتار سطوح نفوذناپذیر، جایگزین سطوح نفوذپذیر و تعدیل‌کننده شود. در محدوده داخل شهر توزیع دما از پیچیدگی خاصی برخوردار است. با توجه به شکل ۵، در محدوده اطراف شهر، اراضی بایر و دامنه‌های رو به خورشید در طول روز از دمای بالایی برخوردارند (بیضی‌های ۲، ۳ و ۴) که دستکاری این مناطق باعث بالا رفتن دما شده است. بیضی ۱ محدوده فرودگاه مشهد را نشان می‌دهد که معمولاً فرودگاه‌ها به دلیل باند عریض آسفالت و خاک بایر اطراف آن از دمای بالایی برخوردارند. بیضی ۵ مسیلی را نشان می‌دهد که از وسط شهر می‌گذرد و به علت ساخت‌وساز در محدوده مسیل و حذف پوشش گیاهی دمای زیادی دارد. محدوده‌های فضای سبز داخل شهر مربوط به پارک‌های بزرگ، باغ‌های متعلق به آستان قدس رضوی و محدوده دانشگاه فردوسی (بیضی‌های ۶، ۷ و ۸)، کمترین دما را به خود اختصاص داده است. همچنین زمین‌های کشاورزی اطراف شهر دمای کمی را نشان می‌دهند (بیضی ۹ و ۱۰).



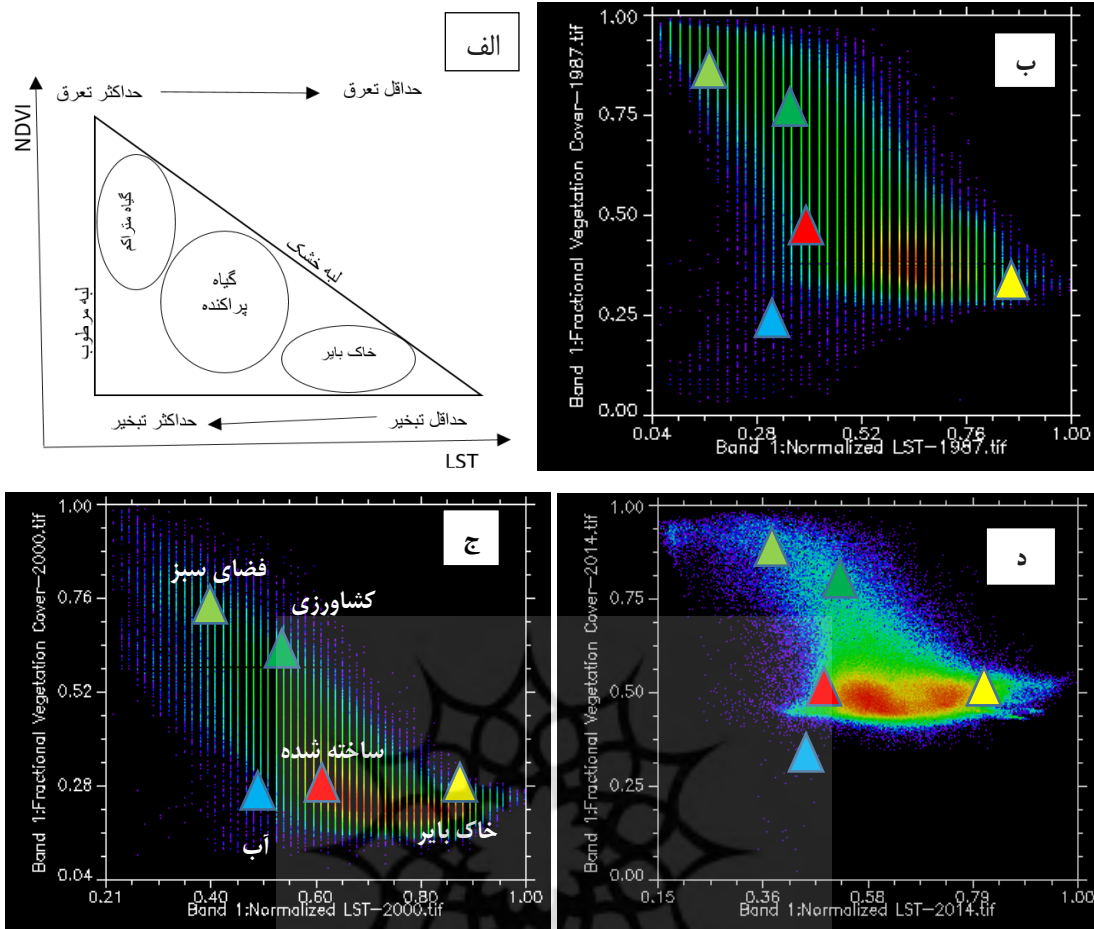
شکل ۴. گسترش شهر مشهد در دوره تحت مطالعه. طی این دوره وسعت شهر حدود دو برابر (۱/۹) شده است. طی این توسعه حدود ۲۵۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی و باغ‌های اطراف شهر از بین رفته است. همچنین حدود ۶۴۰۰ هکتار از اراضی بایر به کاربری شهری تبدیل شده است.



شکل ۵. مقایسه توزیع دمای سطح زمین و پوشش گیاهی در شهر مشهد در سال ۲۰۱۴

رابطه پوشش گیاهی با دمای سطح

بررسی نمودار پراکنش داده‌های حرارتی نرمال شده و کسر پوشش گیاهی (Ft/T) نشان داد این نمودارها یک مثلث با سه ضلع پوشش گیاهی متراکم با کمترین دما و خاک بایر با بیشترین دما و در ضلع سوم آب با تراکم پیکسل‌های کم، کمترین دما و کمترین NDVI را در گوشه نمودار تشکیل داد. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، از تراکم پوشش گیاهی کاسته شده و به تراکم پیکسل‌های شهری که دمای زیادی دارند، افزوده شده است. این بزرگ‌ترین تغییر و یکی از عوامل اصلی ایجاد جزیره حرارتی در شهر است. از تراکم پیکسل‌های آب نیز کاسته شده است. این دو تغییر باعث کوتاه شدن لبه مرطوب در نمودار پراکنندگی سال ۲۰۱۴ شده است. بلندی ضلع لبه مرطوب در نمودار پراکنندگی نشان‌دهنده افزایش تبخیر و تعرق و افزایش دمای سطح است. اگر چه طول لبه خشک نیز در مثلث نمودار پراکنش این سال، کاهش یافته است، دلیل آن ساخت‌وسازهای شهری است که روی خاک بایر صورت گرفته است. هر چند که جایگزین شدن ساخت‌وسازهای شهری در خاک‌های بایر موجب کاهش دمای سطح در برخی نقاط شهری شده است و این بدان علت است که تصاویر لندست در حوالی ساعت ۱۰ صبح به وقت محلی برداشت می‌شود. در این ساعت خاک بایر و خشک به‌ویژه در دامنه‌های رو به خورشید به علت ظرفیت حرارتی و قابلیت انتقال پایین خاک، زود گرم می‌شود و دارای بیشترین دما است (علوی‌پناه، ۱۳۸۶).

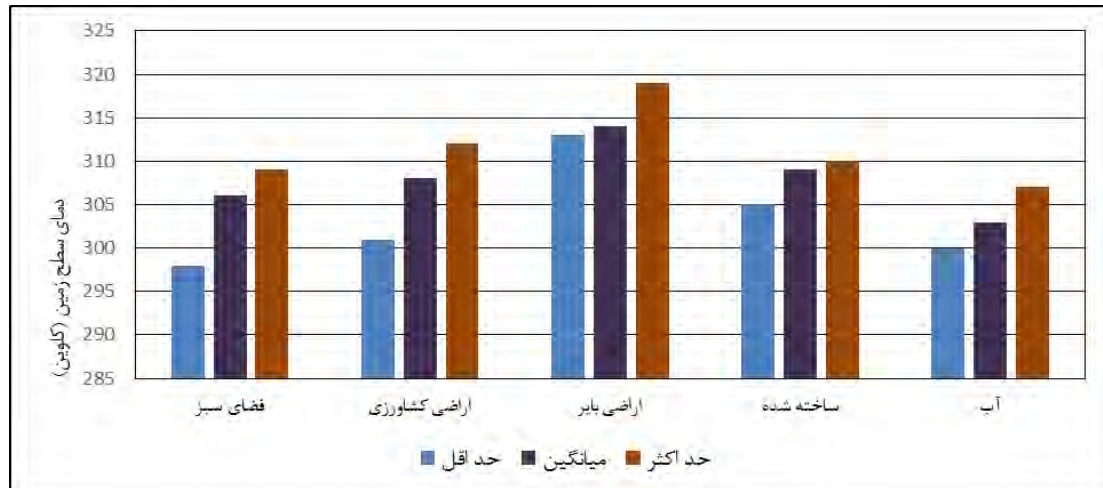


شکل ۶. الف) رابطه شماتیک دمای سطح زمین با NDVI (بر اساس Sandholt et al., 2002). ب) و ج) و د) نمودار پراکنندگی تصاویر حرارتی نرمال شده با کسر پوشش گیاهی (ب = ۱۹۸۷، ج = ۲۰۰۰، د = ۲۰۱۴). همان طور که در شکل مشخص است، از تراکم پوشش گیاهی کاسته شده و به تراکم پیکسل‌های شهری که دمای بالایی دارند، افزوده شده است و همچنین تعداد و تراکم پیکسل‌های آب نیز کم شده است. این دو تغییر باعث کوتاه شدن لبه مرطوب در نمودار پراکنندگی سال ۲۰۱۴ شده است. بلندی ضلع لبه مرطوب در نمودار پراکنندگی نشان‌دهنده افزایش تبخیر و تعرق و افزایش دمای سطح است؛ اگر چه طول لبه خشک نیز در مثلث نمودار پراکنش این سال کاهش یافته است.

رابطه دمای سطح زمین با انواع کاربری پوشش زمین

برای بررسی دمای سطح زمین با توجه به نوع کاربری - پوشش زمین، دمای سطح برای انواع کاربری‌ها به وسیله تصاویر طبقه‌بندی شده و تصاویر دمای سطح زمین برای هر سه تصویر استخراج و میانگین آنها محاسبه شد (شکل ۷). با توجه به این شکل، بیشترین دما مربوط به خاک بایر است که دلیل آن همان طور که ذکر شد، ظرفیت حرارتی و قابلیت انتقال حرارتی پایین خاک خشک است. کمترین دما مربوط به آب و پوشش گیاهی است که این موضوع به علت تبخیر و تعرقی است که در این دو پوشش صورت می‌گیرد و موجب می‌شود دمای سطح آن همیشه پایین باشد. اراضی کشاورزی به دلیل تغییراتی که در انواع کشت محصول در سال‌های مختلف به وجود می‌آید و همچنین تغییرات فصلی کشت محصول بیشترین تغییرات را دارد؛ به طوری که تفاوت حداقل و حداکثر دما در این پوشش، به بیش از ۱۰ درجه سانتیگراد می‌رسد.

اراضی ساخته شده به علت ناهمگونی فوق العاده زیاد (آسفالت، سیمان، پوشش گیاهی، فلزات و...)، دمای متوسطی دارند که میانگینی از ترکیب مواد ذکر شده در یک پیکسل است.



شکل ۷. دمای سطح زمین برای پوشش های زمینی مختلف

بررسی تغییرات توزیع مکانی جزیره حرارتی

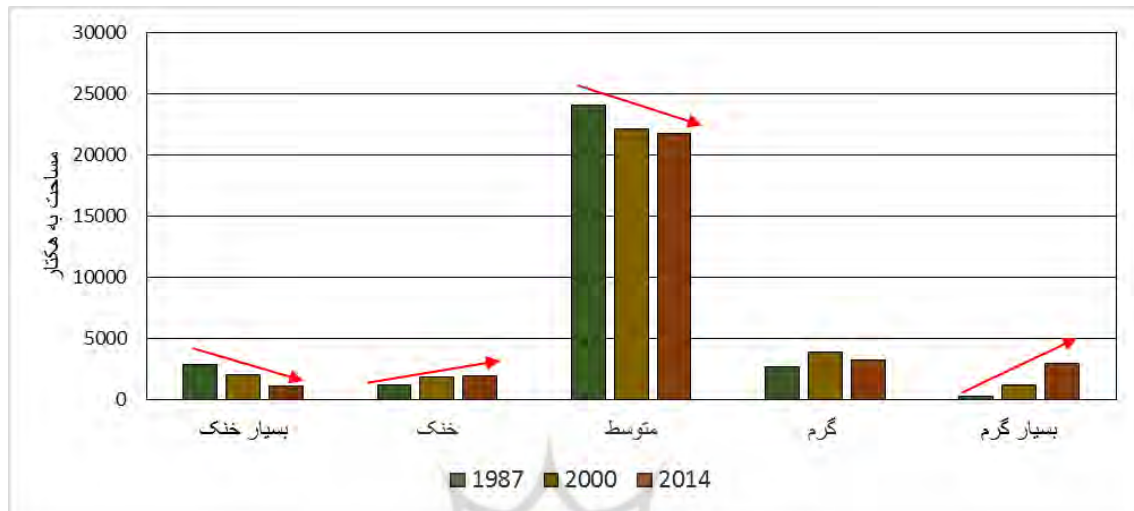
برای بررسی این تغییرات ابتدا تصاویر نرمال شده با استفاده از مقدار میانگین و انحراف معیار خود به پنج طبقه دمایی تقسیم شدند (Xu et al., 2011)، (صادقی نیا و همکاران، ۱۳۹۱). در جدول ۵، Tmean بیانگر میانگین دمای هر یک از تصاویر نرمال شده و std نشان دهنده مقدار انحراف معیار هر یک از تصاویر نرمال شده است.

جدول ۵. نحوه طبقه بندی دمای سطحی تصاویر مطالعه شده به پنج طبقه دمایی (بر اساس xu et al., 2011 و صادقی نیا و همکاران، ۱۳۹۱)

دامنه مربوط به هر طبقه بندی	طبقه بندی دما
$T \geq T_{mean} + 1.5 \text{ std}$	دمای بسیار پایین
$T_{mean} + 1.5 \text{ std} < T < T_{mean} - \text{std}$	دمای پایین
$T_{mean} + \text{std} < T \leq T_{mean} + \text{std}$	دمای متوسط
$T_{mean} + \text{std} < T \leq T_{mean} + 1.5 \text{ std}$	دمای بالا
$T > T_{mean} + 1.5 \text{ std}$	دمای بسیار بالا

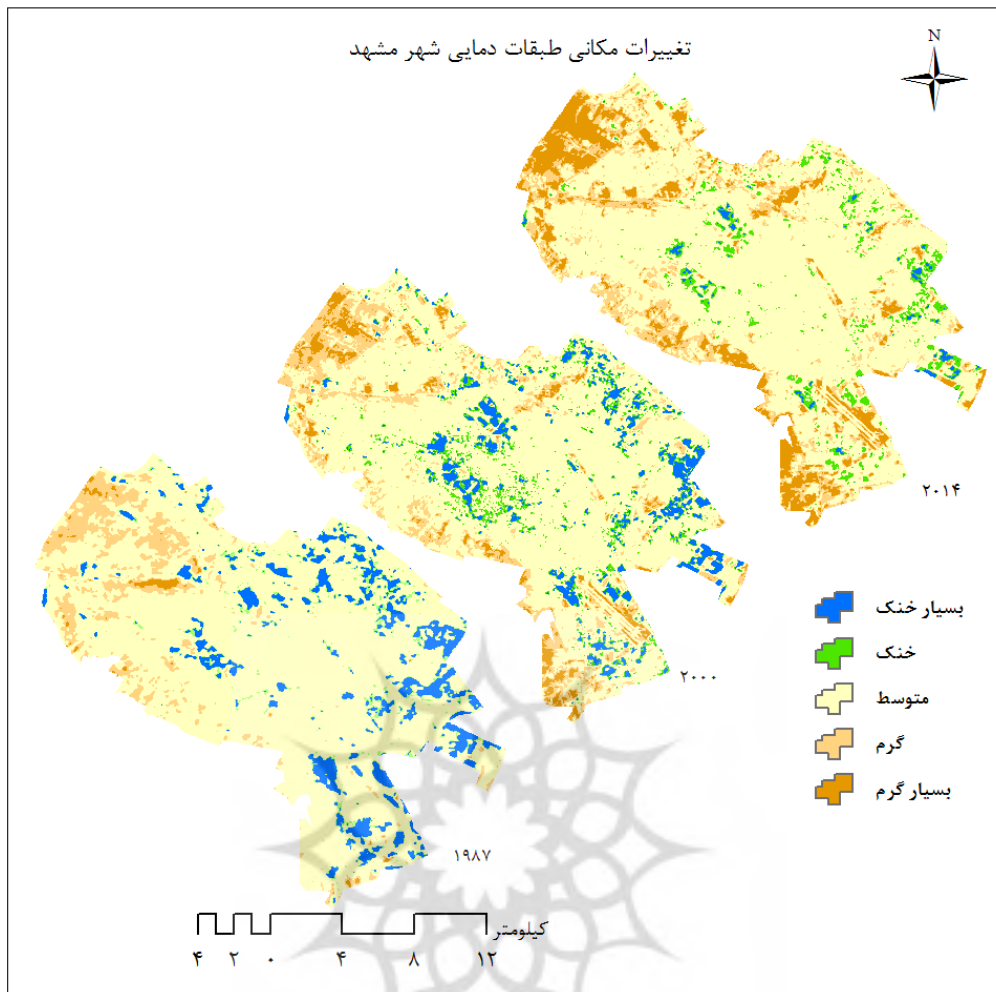
بعد از طبقه بندی داده های حرارتی نرمال شده به طبقات دمایی، مساحت مربوط به هر طبقه دمایی محاسبه شد و تغییرات آن در بازه زمانی تحت مطالعه به دست آمد (شکل ۸). بر اساس این شکل در هر سه دوره، بیشترین مساحت طبقه دمایی مربوط به دمای متوسط است. با توجه به کاهش پوشش گیاهی در سطح شهر، طبقه دمایی بسیار خنک کاهش زیاد و طبقه دمایی بسیار گرم افزایش چشمگیری داشته است که علت آن دستکاری دامنه های اطراف شهر و

تبدیل اراضی کشاورزی به زمین‌های بایر برای قطعه‌بندی و فروش در راستای گسترش شهر در این اراضی بوده است. طبقه دمایی خنک نیز مقداری افزایش را نشان می‌دهد که دلیل آن دستکاری اراضی کشاورزی و فضای سبز باقی‌مانده داخل شهر است که باعث تغییر طبقه دمایی بسیار خنک به خنک شده است.



شکل ۸. تغییرات مساحت طبقات دمایی در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۴. در دوره تحت مطالعه جابه‌جایی دمایی از سمت طبقه دمایی بسیار خنک به سمت طبقه دمایی خنک، و از سمت طبقه دمایی متوسط به سمت طبقه دمایی گرم، و به‌طور کلی جابه‌جایی همه طبقات دمایی به سمت طبقه دمایی بسیار گرم، صورت گرفته است.

همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شد، طبقات دمایی سطح شهر مشهد، در ۵ طبقه دمایی خیلی خنک (29° - 25° درجه سانتیگراد)، خنک (33° - 29° درجه)، متوسط (33° - 37° درجه)، گرم (41° - 41° درجه) و خیلی گرم (45° - 41° درجه) طبقه‌بندی شده است. تصاویر مربوط به سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۴ تغییرات طبقات دمایی در طول این زمان را نشان می‌دهد. مقایسه این تصاویر نشان می‌دهد که طبقه دمایی خیلی خنک که با رنگ آبی نمایش داده شده، در جهات شمال، شمال شرق، شرق و جنوب شرق، با تبدیل اراضی کشاورزی به کاربری شهری کاهش چشمگیری داشته و جای خود را به طبقات دمایی متوسط، گرم و خیلی گرم داده است. طبقه دمایی خیلی گرم در چند نقطه افزایش زیادی داشته است. در جهت جنوب شرق محدوده، به دلیل گسترش فرودگاه، طبقات دمایی متوسط و خیلی سرد به طبقه دمایی خیلی گرم تبدیل شده است. همچنین در جهت جنوب به دلیل تخریب اراضی، طبقه دمایی خیلی گرم گسترش یافته است. در جهت شمال غرب در کناره‌های تصویر اراضی بایر با طبقه دمایی گرم وجود داشته‌اند که با گسترش شهر در مجاورت این نواحی، گرم‌تر شده‌اند. در مرکز شهر چند باغ بزرگ با طبقه دمایی خیلی خنک وجود دارد که از نظر دمایی تغییر زیادی نداشته است.



شکل ۹. تغییرات مکانی طبقات دمایی در شهر مشهد در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۴

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که گسترش شهر در اراضی کشاورزی و کاهش فضای سبز داخل شهر، عامل اصلی افزایش دمای سطح و گسترش جزایر شهری در مشهد بوده است. البته باید به عامل فوق نقش گرمایش جهانی، توسعه صنعتی شهر و افزایش ترافیک شهری (به تبع گسترش شهر) را در افزایش دمای شهر و گسترش جزایر حرارتی افزود. به صورتی که حدود ۲۵۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی و فضای سبز به کاربری ساخته شده تبدیل شده که تقریباً برابر با افزایش مساحت طبقه دمایی بسیار گرم بوده است. بررسی تغییرات توزیع فضایی دمای سطح زمین و جزیره حرارتی نشان داد با از بین رفتن پوشش گیاهی داخل و اطراف شهر طبقه دمایی بسیار خنک، جای خود را به طبقه دمایی متوسط داده است. همچنین با دستکاری دامنه های اطراف شهر، دمای آنها افزایش یافته و به طبقه دمایی گرم و بسیار گرم تغییر یافته اند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از داده های ماهواره ای چندزمانه و ترکیب روش های معمول بررسی جزایر حرارتی (بررسی تغییرات توزیع زمانی - مکانی جزایر حرارتی شهری نسبت به تغییرات گسترش شهری، رابطه جزایر حرارتی با پوشش گیاهی و کاربری - پوشش زمین) می تواند دیدی همه جانبه از نحوه شکل گیری و گسترش جزایر حرارتی شهری به دست دهد.

منابع

- علوی‌پناه، سیدکاظم؛ (۱۳۸۵). سنجش از دور حرارتی و کاربرد آن در علوم زمین، انتشارات دانشگاه تهران.
- ؛ (۱۳۹۲). کاربرد سنجش از دور در علوم زمین (علوم خاک)، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ چهارم.
- صادقی‌نیا، ع.؛ علیجانی، ب.؛ ضیاییان، پ.؛ (۱۳۹۱). تحلیل فضایی زمانی جزیره حرارتی کلان‌شهر تهران با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۱.
- فاطمی، سید باقر؛ رضایی، یوسف؛ (۱۳۸۹). مبانی سنجش از دور، انتشارات آزاده، چاپ دوم.
- Amiri, R., Weng, Q., Alimohammadi, A., & Alavipanah, S. K. (2009). Spatial° temporal dynamics of land surface temperature in relation to fractional vegetation cover and land use/cover in the Tabriz urban area, Iran. *Remote Sensing of Environment*, 113(12), 2606-2617.
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*, 113(5), 893-903.
- Lenney, M. P., Woodcock, C. E., Collins, J. B., & Hamdi, H. (1996). The status of agricultural lands in Egypt: the use of multitemporal NDVI features derived from Landsat TM. *Remote Sensing of Environment*, 56(1), 8-20.
- Mackey, C. W., Lee, X., & Smith, R. B. (2012). Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island. *Building and Environment*, 49, 348-358.
- Liu, L., & Zhang, Y. (2011). Urban heat island analysis using the Landsat TM data and ASTER data: A case study in Hong Kong. *Remote Sensing*, 3(7), 1535-1552.
- Owen, T. W., Carlson, T. N., & Gillies, R. R. (1998). An assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization. *International Journal of Remote Sensing*, 19(9), 1663-1681.
- Rajeshwari, A., & Mani, N. D. Estimation of land surface temperature of dindigul district using landsat data.
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y., & Liu, C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 120-128.
- Skokovic.D, Sobrino.J.A, Jimenez-Munoz.J.C, Soria.G, Julien.Y, Mattar.C and Jordi Cristobal, 2014 Calibration and Validation of Land Surface Temperature for Landsat 8 ° TIRS Sensor , Land product Validation and Evolution, ESA/ESRIN Frascati (Italy), pp 6.
- Sandholt, I., Rasmussen, K., & Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of environment*, 79(2), 213-224.
- Smith, C., & Levermore, G. (2008). Designing urban spaces and buildings to improve sustainability and quality of life in a warmer world. *Energy policy*, 36(12), 4558-4562.
- Sobrino, J. A., & Raissouni, N. (2000). Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2), 353-366.
- Sobrino.J.A, Reillo.S, Cueva.J and Prata.A.J, Algorithms for Estimating Surface Temperature from ASTR-2 Data ,

- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of environment*, 86(3), 370-384.
- 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(4), 335-344.
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature° vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote sensing of Environment*, 89(4), 467-483.
- Weng, Q., Liu, H., & Lu, D. (2007). Assessing the effects of land use and land cover patterns on thermal conditions using landscape metrics in city of Indianapolis, United States. *Urban ecosystems*, 10(2), 203-219.
- Xu, H., Chen, Y., Dan, S., & Qiu, W. (2011, June). Spatial and temporal analysis of urban heat Island effects in Chengdu City by remote sensing. In *Geoinformatics, 2011 19th International Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
- Xiao, J., & Moody, A. (2005). A comparison of methods for estimating fractional green vegetation cover within a desert-to-upland transition zone in central New Mexico, USA. *Remote Sensing of Environment*, 98(2), 237-250.
- Zhao, S., Qin, Q., Yang, Y., Xiong, Y., & Qiu, G. (2009). Comparison of two split-window methods for retrieving land surface temperature from MODIS data. *Journal of earth system science*, 118(4), 345-353.