



سنجش از دور و GIS ایران



سال اول، شماره اول، بهار ۱۳۸۸
Vol.1, No.1, Spring 2009

سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

۲۹-۵۶

تحلیل رابطه کاربری و پوشش اراضی و جزایر حرارتی شهر تهران، با استفاده از داده‌های ETM+

علیرضا شکیبا^۱، پرویز ضیائیان فیروزآبادی^۲، داوود عاشورلو^۳، سودابه نامداری^{۴*}

۱- استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید بهشتی

۲- دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه تربیت معلم

۳- دانشجوی دوره دکتری سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۴- کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ پذیرش مقاله: ۸۸/۸/۹

تاریخ دریافت مقاله: ۸۸/۴/۳۰

چکیده

با توسعه شهرنشینی، مقادیر زیادی از مساحت مناطق کشاورزی و جنگلی جای خود را به خانه‌ها، مناطق صنعتی و دیگر زیرساخت‌ها داده‌اند. محدوده‌های شهری دارای بیلان انرژی و آبی متفاوتی در قیاس با نواحی غیرشهری‌اند. این تفاوت و تغییر در این دو مفهوم باعث از بین رفتن توازن انرژی و رواناب در محیط‌های شهری می‌گردد که خود مشکلات زیست‌محیطی جدی را (مانند سیل و آلودگی‌های حرارتی) برای ساکنان شهر به دنبال می‌آورد. علاوه بر این، در برخی از نواحی شهری تغییرات کاربری‌ها و افزایش جمعیت و در پی آن افزایش تردد خودروها و همچنین وجود صنایع، موجب افزایش دمای برخی مناطق شهری نسبت به دیگر مناطق می‌شوند. بنابراین در مناطق شهری، بسته به پوشش زمین، مناطقی با درجه حرارت بیشتر از سایر نواحی به وجود می‌آید، که این پدیده را جزیره حرارتی شهرها می‌نامند. در این تحقیق، جزایر حرارتی شهر تهران - که مهم‌ترین مرکز جمعیتی و یکی از مهم‌ترین مراکز صنعتی ایران به‌شمار می‌آید و در طول چند دهه اخیر رشد شهری سریعی داشته است - مورد مطالعه قرار گرفته است.

هدف اصلی از انجام این تحقیق، استخراج جزایر حرارتی در مناطق شهری با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و تعیین اثر نوع پوشش و کاربری زمین بر دمای سطح زمین است. برای رسیدن به این هدف، طبقه‌بندی پوشش اراضی شهری شهر تهران بر اساس تغییر در خصوصیات بیوفیزیکی (ویژگی‌های بیولوژیکی و خواص فیزیکی) آن، در سطح طبقه‌بندی زیرپیکسل و استخراج کسر خاک، پوشش گیاهی و سطوح نفوذناپذیر با استفاده از تصاویر ETM+ انجام شد. برای محاسبه درصد هر یک از این سطوح از روش جداسازی طیفی (LSU) استفاده شد. در پایان، با تحلیل آماری هر یک از جزایر حرارتی شهر تهران به تفکیک، نقش هر یک از پوشش‌ها و کاربری‌های اراضی در ایجاد آنها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که سطوح نفوذناپذیر از طریق جذب و ذخیره انرژی خورشیدی اثر گرمایشی دارند، در حالی که پوشش گیاهی از طریق ایجاد توازن گرمایی به‌وسیله تبخیر و تعرق و تولید سایه، دارای اثر خنک‌کننده‌اند.

کلیدواژه‌ها: دمای سطح زمین، جداسازی طیفی خطی، جزیره حرارتی شهری، تغییرات پوشش زمین، مدل V_I_S.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، ولنجک، میدان دانشجو، دانشگاه شهید بهشتی، گروه سنجش از دور و GIS، تلفن ۰۲۱۲۳۰۲۹۹۰، دورنگار ۲۲۴۳۱۷۸۸

۱- مقدمه

جزایر حرارتی شهری^۱ (UHI) از معمول‌ترین پدیده‌های شهری‌اند که در آنها برخی از مناطق شهری و به خصوص مراکز شهرها، چند درجه از مناطق اطرافشان گرم‌تر می‌شوند. مطالعه این پدیده و بررسی سازوکار یا مکانیسم آن برای برنامه‌ریزی‌های شهری اهمیت بسیار زیادی دارد. در طول دو دهه اخیر نیاز فراوان به اطلاعات دمای سطح زمین برای مطالعات محیطی و فعالیت‌های مدیریتی منابع زمینی، سنجش از دور دمای سطح زمین را به یکی از موضوعات مهم علمی تبدیل کرده است (Sobrinho et al., 2004). تصاویر سنجش از دور به دلیل پوشش وسیع، بهنگام بودن و توانایی کسب اطلاعات در محدوده حرارتی طیف الکترومغناطیس، منبع اطلاعاتی مناسبی در تهیه نقشه‌های حرارتی و تخمین انرژی تشعشعی سطح زمین به‌شمار می‌آیند. همچنین این تصاویر دارای کاربردهای متفاوتی در تحقیقات جهانی آنالیز پوشش اراضی سطوح شهری‌اند. با استفاده از این تصاویر، با قدرت تفکیک مناسب می‌توان جزایر حرارتی شهری را در مقیاس‌های مختلف قاره‌ای و منطقه‌ای به تصویر کشید و داده‌های کمی از خصوصیات سطح زمین با توزیع ناهمگن تولید کرد و موجبات درک بیشتری را از محیط‌های شهری و غیرشهری و رابطه دما با شهری شدن فراهم کرد.

مطالعه جزایر حرارتی شهری به‌وسیله داده‌های سنجش از دور ابتدا با استفاده از داده‌های ماهواره NOAA انجام شد. (Rao (1972 اولین محقق بود که نشان داد مناطق شهری از طریق تجزیه و تحلیل تصاویر مادون قرمز حرارتی قابل شناسایی‌اند. Roth و همکاران در سال ۱۹۸۹ با همراه کردن الگوهای دمای سطحی با انواع کاربری زمین از داده‌های AVHRR برای ارزیابی شدت جزیره حرارتی شهری (UHI) استفاده کردند. Gallo و همکارانش در سال ۱۹۹۳، شاخص‌های گیاهی و دمای سطح زمین به دست آمده از AVHRR را با دمای هوای حداقل مشاهده شده در

مناطق شهری و روستایی مقایسه کردند. Weng در سال ۲۰۰۳، به کمک تصاویر ETM+ الگوی دمایی سطح و رابطه آن را با پوشش زمین در Guangzhou و در مجموعه شهرهای Zhujiang بررسی کرد. Xiao و Moddy در سال ۲۰۰۵، رابطه بین تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین را با الگوی دمای سطح زمین در Pearl River Delta ایالت Guangdong در جنوب چین با استفاده از تصاویر لندست TM و ETM+ بررسی کردند. نتایج بیانگر آن بود که دماهای بیشتر در مناطق شهری با الگویی توزیع شده بود که رابطه مستقیم با توزیع الگوی پوشش اراضی داشت. سپس Weng و Dengsheng در سال ۲۰۰۵، با استفاده از تصاویر ASTER با آنالیز چندزمانه، به تخمین رابطه میان الگوهای حرارتی شهری و توصیف‌گرهای بیوفیزیکی در Indianapolis پرداختند. مشخص شد که دمای سطح زمین با سطوح نفوذناپذیر و خاک رابطه مثبت دارد، در حالی که دارای رابطه منفی با گیاهان سبز است. در تحقیقی که Xian و Crane در سال ۲۰۰۶ انجام دادند، در Las Vegas و Tampa Bay با مرتبط کردن داده‌های مادون قرمز حرارتی و پوشش سطوح نفوذناپذیر به دست آمده از ماهواره لندست ۵ و ۷، به مطالعه خصوصیات حرارتی شهری پرداختند. Weng و همکاران در سال ۲۰۰۷ روش موفقی را برای تعیین رابطه میان دمای سطح زمین^۲ (LST) و الگوی کاربری و پوشش اراضی با استفاده از داده‌های سنجش از دوری و روش‌های اکولوژیکی Landscape پیشنهاد کردند. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده آن بودند که تصاویر کسری استخراج شده به شکلی جدی بیانگر مورفولوژی یا ریخت‌شناسی‌ای از شهرند که رابطه‌ای منطقی را با خصوصیات بیوفیزیکی شهر نشان می‌دهند. میزان دما رابطه مثبت با سطوح نفوذناپذیر و رابطه منفی با پوشش گیاهی سبز نشان می‌داد. Amiri و همکاران

1. Urban Heat Islands

2. Land Surface Temperature

در محل و روش‌های سنجش از دوری برای تحلیل ویژگی‌های جزایر حرارتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. لذا با توجه به مطالب پیش‌گفته، در این مطالعه پدیده‌های حرارتی سطح و رابطه آن با پوشش و کاربری اراضی در شهر تهران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ETM+ محاسبه می‌شود. پس از تعیین دمای سطح زمین، از روش جداسازی طیفی خطی برای تعیین کسر پوشش گیاهی، سطوح خاکی و سطوح نفوذناپذیر استفاده می‌شود.

۲- داده‌های مورد استفاده و روش تحقیق

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و مواد تحقیق

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، شهر تهران است. شهر تهران با قدمت ده‌ها سال شهرنشینی، دارای تراکم جمعیت بالا و وسعت زیاد در قیاس با سایر شهرهاست، و تمرکز کارگاه‌ها و کارخانه‌ها در محدوده شهر و حاشیه شهر شرایط را برای تولید گرمای آنتروپوژنیک و آلوده‌سازی هوای شهر به وجود آورده است. با توجه به اهمیت مطالعه جزایر حرارتی در شهر تهران، در این تحقیق با هدف جمع‌آوری اطلاعات درباره مناطق گرم این شهر، وسعت آنها و عوامل مؤثر بر تشکیل جزایر حرارتی، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به مطالعه جزایر حرارتی شهر تهران پرداخته شد.

در این تحقیق از منابع داده مختلف، از جمله تصاویر سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷ (به تاریخ ۲۰۰۲/۰۸/۰۹)، نقشه‌های کاربری و داده‌های دمایی ایستگاه‌های هواشناسی استفاده گردید. سنجنده ETM+ امکان تحصیل داده‌های تصویری را از ناحیه طیفی مرئی تا مادون قرمز حرارتی، در ۸ باند میسر می‌کند. باند ۶ از سنجنده ETM+ مقدار شار تابشی مادون قرمز (گرما) گسیل شده از سطوح را اندازه‌گیری می‌کند. نقشه‌های کاربری اراضی مورد استفاده در این

(2007) با استفاده از تصاویر TM و ETM+ چندزمانه شهر تبریز به بررسی تغییرپذیری فضایی - زمانی حرارت در زمینه کاربری / پوشش زمین پرداختند. نتایج نشان دادند که گرم‌ترین کلاس پوشش در سال ۱۹۹۸ کلاس کاربری مسکونی بود؛ اما در سال ۲۰۰۱ و ۱۹۸۹ زمین‌های بایر گرم‌ترین کلاس بودند. بررسی رابطه میان NDVI و حرارت سطح با استفاده از تحلیل همبستگی و رگرسیون چندمتغیره، بیانگر نقش مؤثر پوشش گیاهی در تعدیل دمای سطح بود.

در ایران Akbari در سال 2000 با استفاده از سنجنده TM، الگوی توزیع درجه حرارت شهر تهران را مورد مطالعه قرار داد. او با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی حداکثر احتمال^۱ (MLC) کلاس‌های کاربری پارک تفریحی، پارک جنگلی، مسکونی - صنعتی، معابر، اراضی کم‌درخت و اراضی بایر را از سه مؤلفه اول حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۲ (PCA) استخراج کرد و میانگین حرارت برای هر یک از کلاس‌های کاربری را به دست آورد. وی با بررسی‌ها و ارزیابی‌های انجام شده، نتیجه گرفت که کلاس‌های کاربری دارای میانگین حرارتی متفاوت با یکدیگر بودند و کلاس‌های حرارتی یکسان در نقشه کاربری تقریباً بر کلاس‌های دمایی ویژه‌ای انطباق داشتند.

با توجه به اینکه آگاهی از بودجه انرژی سطح و جزایر حرارتی شهر برای برخی از فرضیه‌ها و موضوعات علوم زمین (مانند اقلیم شهری، تغییرات محیطی جهانی و اثر متقابل محیط - انسان) و همچنین برای شیوه‌های مدیریت و برنامه‌ریزی بسیار مهم است، مطالعه دمای سطح و ویژگی‌های بودجه انرژی شهری با استفاده از فناوری سنجش از دور حرارتی همواره بسیار مورد توجه بوده است. عدم دسترسی به داده‌های مکانی از یک طرف، و تنوع زیاد کاربری و پوشش اراضی در محیط‌های شهری از طرف دیگر، امکان استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور را در برآورد و تعیین دمای سطح زمین بیش از پیش مطرح می‌سازد. تاکنون روش‌های مختلفی مانند روش‌های اندازه‌گیری

1. Maximum Likelihood Classification

2. Principal Component Analysis

$$L(\lambda) = \text{Gain} \times \text{DN} + \text{Bias} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{Gain} = \text{DN} / (\text{L max} - \text{L min}) / 255 = \text{Gain}$$

رقومی هر پیکسل، $L_{\min} = \text{Bias}$ ، مقدار Gain و Bias از Headerfile تصاویر استخراج شده است.

(ب) تبدیل رادیانس طیفی L به دمای روشنایی سنجنده BT بر حسب کلونین، با استفاده از رابطه ۲.

$$\text{BT} = \text{دمای روشنایی سنجنده بر حسب کلونین}, \\ K_2 = \text{ثابت تصحیح } 1282/71, k_1 = \text{ثابت تصحیح}, \\ L = 666/0.9 = \text{رادیانس طیفی سنجنده} \\ (W_m - 2s_r - 1\mu m - 1)$$

$$\text{BT} = \frac{K_2}{\left\{ \ln \left[\frac{K_1}{L} + 1 \right] \right\}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

۲-۱-۲-۲- محاسبه گسیل‌مندی سطح^۱ و دمای سطح زمین

نسبت بین گسیلش از یک شیء به گسیلش از جسمی سیاه در دمای ثابت را گسیل‌مندی می‌گویند. مقدار گسیل‌مندی برای تبدیل دمای روشنایی به دمای جنبشی سطح مورد نیاز است، چرا که دمای روشنایی به‌دست آمده از رابطه (۲) دمایی است که جسم سیاه به‌منظور تولید رادیانس معلوم در طول موج معلوم (۱۱/۵ میکرومتر) دارد. یکی از روش‌های مؤثر برای تخمین دمای سطح که می‌تواند استفاده شود، مدل ترکیبی درصد پوشش زمین است، با این فرض که خاک و پوشش گیاهی مقدار گسیل‌مندی را معلوم دارند و با توجه به درصد پوشش خود ترکیب می‌شوند (Sobrino et al., 2001). مقدار درصد پوشش گیاهی با استفاده از NDVI محاسبه می‌شود. در این روش، آستانه‌گذاری NDVI مورد استفاده قرار می‌گیرد.

الف) $NDVI > 0.2$: در این مورد پیکسل مربوط به خاک خشک، و مقدار میانگین گسیل‌مندی آن براساس

1. Surface emissivity

تحقیق، تهیه شده به‌وسیله شهرداری تهران، با مقیاس ۱/۲۰۰۰، به‌منظور تصحیحات هندسی‌اند.

۲-۲- روش تحقیق

مراحل انجام کار این تحقیق، تهیه و آماده‌سازی داده‌های مورد نیاز، تکنیک‌های پردازش تصاویر، استخراج جزایر حرارتی و تصویر حرارتی تهران، استخراج تصویر Unmixed پوشش‌های اراضی شهر تهران و در نهایت تعیین سهم هر یک از پوشش‌های زمین در تشکیل جزایر حرارتی است.

۲-۲-۱- تهیه تصویر حرارتی از داده‌های حرارتی

سنجنده ETM+

برای تهیه تصویر حرارتی از باند ۲-۶ (High Gain) با قدرت تفکیک ۶۰ متر استفاده شد. این باند برای تحصیل و تعیین تفاوت‌های دمایی میان پدیده‌های شهری پیچیده مناسب است، چرا که امکان آنالیز دقیق و مؤثر محیط شهری را می‌دهد (Stathopoulou and Cratalis, 2007). تصویر مورد نظر در شرایط اتمسفری مناسب از لحاظ فقدان ابر و در اواسط فصل گرم سال تهیه شد. از آنجا که در این تحقیق بیشتر بر تفاوت‌های دمایی میان پدیده‌های مختلف تأکید شده است و استخراج اطلاعات به تفکیک جزایر حرارتی و در محدوده‌های فضایی همگن از لحاظ اتمسفری برداشت می‌شود، خطای ناشی از اثر اتمسفری تصحیح نشده است. بنابراین از دمای روشنایی سنجنده می‌توان برای به‌دست آوردن دمای سطح استفاده کرد. مراحل تهیه تصویر دمایی زمین در ادامه ذکر می‌گردد.

۲-۲-۱-۱- محاسبه دمای روشنایی

تصحیحات داده‌های تصویر حرارتی در دو مرحله انجام می‌شود (Landsat Data User Handbook, 2006):

الف) تبدیل ارزش‌های رقومی اعداد باند ۶ به رادیانس طیفی $(W_m - 2s_r - 1\mu m - 1)$ با استفاده از رابطه (۱).

آنالیز کتابخانه‌ای نمونه‌های خاک برای باند حرارتی
لندست ۰/۹۷۸ است.
ب) $NDVI < 0.5$: پیکسل‌های بالارزش NDVI
بزرگ‌تر از ۰/۵ مناطق با پوشش گیاهی کامل و مقدار
ارزش ثابت برای گسیل‌مندی ۰/۹۸۵ تخمین زده شده
است.

ج) $0.5 \leq NDVI \leq 0.2$: در این مورد پیکسل
ترکیبی است از پدیده‌های مختلف و مقدار گسیل‌مندی
با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

۲-۲-۲-۲- تهیه نقشه طبقه‌بندی حرارتی و تعیین

جزایر حرارتی

در این مرحله با استفاده از روابط ذکرشده، تصویر
حرارتی شهر تهران استخراج می‌شود و پس از انجام
عملیات طبقه‌بندی، تصویر حرارتی تقسیم‌بندی
می‌گردد و نقشه حرارتی سطح زمین تهیه می‌شود.
برای طبقه‌بندی تصویر حرارتی حاصل، از روشی که
Smith (1986) ارائه داد، استفاده شد. در این روش
نقشه حرارتی سطح زمین با توجه به منحنی توزیع
فراوانی تصویر حرارتی و براساس انحراف معیار تهیه
می‌شود.

۲-۲-۳- ارزیابی نقشه دمایی تهران

برای ارزیابی دقت داده‌های دمایی به دست آمده از باند
۶ سنجنده ETM+، آمار ساعتی داده‌های دمایی
سازمان هواشناسی تهیه شد. حرارت ناشی از تشعشع
سطحی جسمی که دارای حرارت سطحی (Ts) است با
دمای هوای (Ta) دربرگیرنده آن جسم، بسته به زمان و
ساعات شبانه روز دارای اندکی اختلاف است (Akbari,
2000).

Garcia-Cueto و همکارانش در سال ۲۰۰۶
مقاله‌ای را ارائه دادند و در آن توانستند تابع انتقال
دقیق بین دمای سطح زمین و دمای هوای نزدیک به
سطح را در مناطق شهری به دست بیاورند.

در این تحقیق، ساده‌ترین مدل خطی دمایی
تشعشعی از سطح (SRT) و دمای هوا (TAIR) برای
مناطق شهری به صورت رابطه ۸ به دست آمد.

رابطه (۸) $T_{AIR} = 14/6 + 0/44 \times SRT$

رابطه (۳) $\varepsilon = \varepsilon_V P_V + \varepsilon_S (1 - P_V) + d\varepsilon$

رابطه (۴) $P_V = \left[\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^2$

رابطه (۵) $d\varepsilon = (1 - \varepsilon_s)(1 - P_V)F\varepsilon_V$

$NDVI_{max} = 0/5$

$NDVI_{min} = 0/2$

$F =$ ضریب شکل (Sobrin et al., 1990) است که
مقدار میانگین آن با فرض توزیع هندسی متفاوت
سطوح، ۰/۵۵ است.

رابطه (۶) $T_s = BT / \{1 + [(\lambda BT / \rho) * \ln \varepsilon]\}$

$BT =$ دمای روشنایی؛ $\lambda =$ طول موج رادیانسی
ساطع شده (۱۱/۵ میکرومتر)؛ $hc/k = p$ ؛ $h =$ ثابت
پلانک ($6/62 \times 10^{-34}$ j.sec)؛ $c =$ سرعت نور

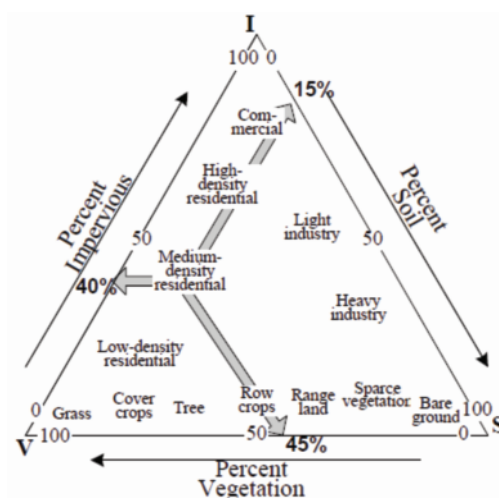
در نهایت پس از انجام تصحیحات بر روی تصویر
حرارتی و محاسبه گسیل‌مندی، دمای سطح زمین با
استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود (Artis and
Carnahand, 1982)

رابطه (۷) $BT =$ دمای روشنایی؛ $\lambda =$ طول موج رادیانسی

ساطع شده (۱۱/۵ میکرومتر)؛ $hc/k = p$ ؛ $h =$ ثابت
پلانک ($6/62 \times 10^{-34}$ j.sec)؛ $c =$ سرعت نور

۲-۲-۳- استخراج تصویر کسری پوشش اراضی

از روش‌های ساده اما قابل استفاده برای مشخص کردن ترکیب مناطق شهری، مدل V-I-S^۱ است که Ridd در سال ۱۹۹۵ بیان کرد. Ridd اظهار داشت که مدل V-I-S می‌تواند زیربنایی باشد برای درک بهتر محیط شهری، جغرافیای فیزیکی (مانند جزایر حرارتی شهری، مدل کردن رواناب و آشکارسازی تغییرات شهری) و نیز جغرافیای انسانی (مانند تخمین تراکم جمعیت و ارزیابی کیفیت زندگی). با استفاده از این سه مؤلفه اساسی می‌توان پوشش گیاهی، سطوح خاکی و سطوح ساخته‌شده شهری را با سه ترکیب ساده نمایش داد. شمای کلی این مدل می‌تواند به صورت شکل ۱ نشان داده شود. در این دیاگرام هر محور یک مؤلفه را نشان می‌دهد. ارزش‌ها در راستای هر محور درصد مؤلفه مورد نظر را نشان می‌دهند.



شکل ۱. سیمای عمومی شهر در مدل V-I-S (Ridd، ۱۹۹۵)

۲-۲-۳-۱- مبانی روش جداسازی طیفی^۲ (LSU)

به‌طور کلی جداسازی طیفی فرایندی است که با استفاده از سنجش علائم طیفی، امکان استخراج اطلاعات را در سطح زیرپیکسل^۳ می‌دهد و روشی مناسب را برای شناسایی عناصر در پیکسل‌های مختلط فراهم می‌کند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های جداسازی

طیفی، برخلاف طبقه‌بندی، دقیق و قابل اطمینان بودن نتایج به‌دست آمده از آنهاست، به‌طوری که می‌توان با استفاده از نتایج به‌دست آمده از این الگوریتم‌ها به انجام محاسبات کمی پرداخت و مساحت اشغال‌شده به‌وسیله مواد تشکیل‌دهندهٔ صحنه تصویربرداری را برآورد کرد (Rickard, 2003). مدل ترکیب خطی^۴، طیف مشاهده شده به‌وسیله هر پیکسل را که به‌صورت رابطه (۹) بیان می‌شود، نشان می‌دهد.

$$R_i = \sum_{k=1}^n f_k R_{ik} + \varepsilon_i \quad \text{رابطه (۹)}$$

R_i = بازتاب طیفی باند i ، i = تعداد باندهای طیفی، k = تعداد Endmember برای هر پیکسل که شامل یک یا چند Endmember است، f_k = سهم هر یک از Endmemberها در پیکسل، R_{ik} = بازتاب طیفی Endmember در هر پیکسل برای باند i و ε_i = خطا برای هر باند است (Weng et al., 2004).

خطای ریشه دوم میانگین (RMS) براساس باقی مانده‌های رابطه ۸ به صورت رابطه ۱۰ است (Weng et al., 2004):

$$RMS = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^m ER_i^2 \right) / m} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

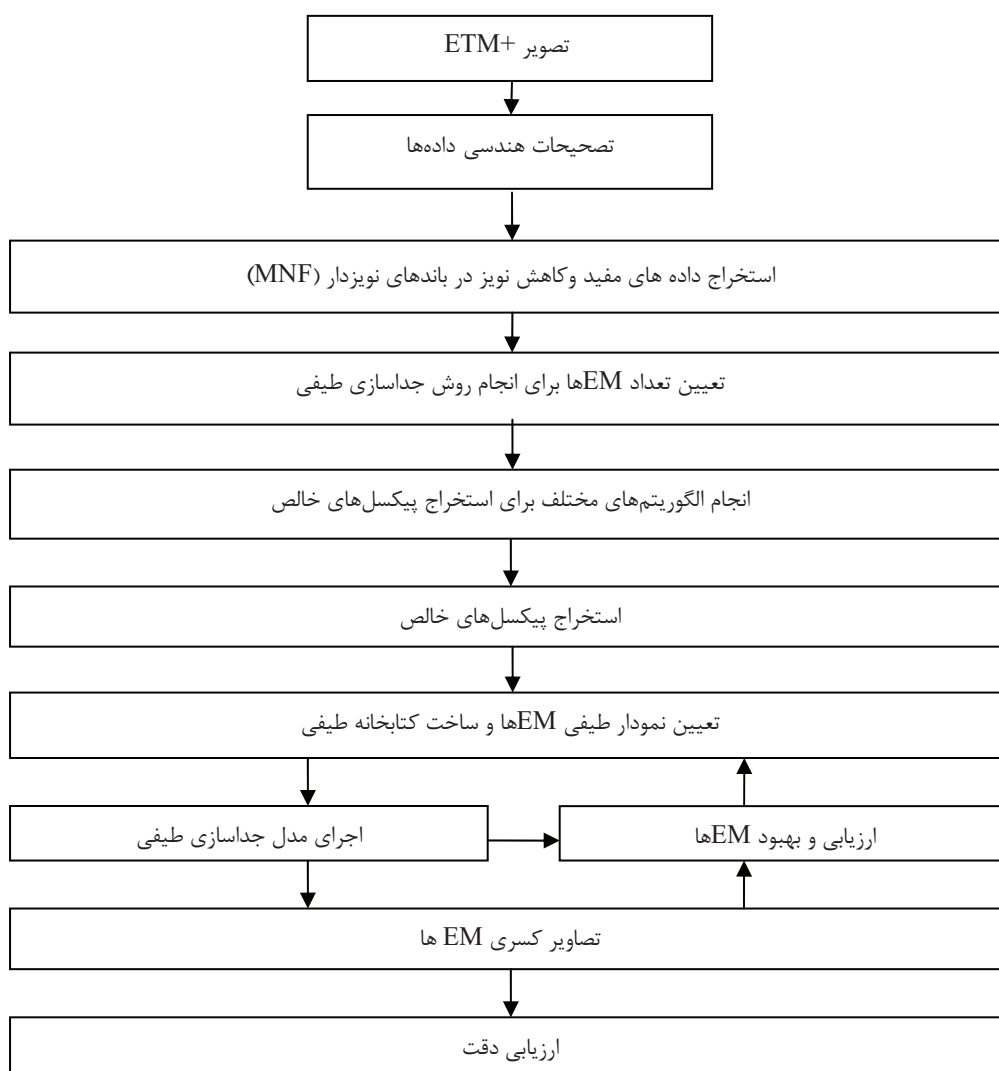
ER = مقدار خطا برای هر باند، m = تعداد باندها

۲-۲-۳-۲- مراحل پیاده‌سازی مدل جداسازی

طیفی خطی

در این تحقیق برای جداسازی طیفی پدیده‌های مختلف از تصویر ETM+ استفاده شد. به‌منظور استخراج اطلاعات از تصویر، مراحل انجام جداسازی طیفی در چندین مرحله متوالی به صورت شکل ۲ انجام پذیرفت.

1. Vegetation-Impervious surface-Soil
2. Linear Spectral Unmixing
3. Subpixel
4. Linear Mixing Model



شکل ۲. مراحل انجام جداسازی طیفی

خانه‌سازی مربوط است و نشان از درصد جمعیت دارد (Changshan, 2003). در این تحقیق بعد از تعیین End memberها و بررسی نتایج مشخص شد که سطوح نفوذناپذیر باید از لحاظ طیفی به دو کلاس سطوح تاریک و سطوح روشن تقسیم‌بندی شوند و در نهایت سطوح نفوذناپذیر را می‌توان به صورت تقریبی از رابطه (۱۱) محاسبه کرد.

رابطه (۱۱)

$$(impervious) = F(\text{dark surface}) + F(\text{light surface}) + e$$

= F(impervious) = درصد سطوح نفوذناپذیر،

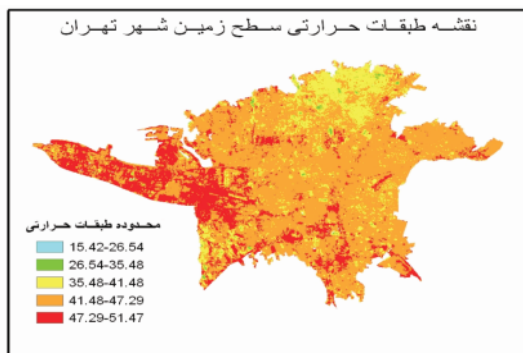
۲-۳-۳- محاسبه درصد سطوح نفوذناپذیر

به عنوان مؤلفه اصلی زیربنایی شهر، سطوح نفوذناپذیر، متغیر اصلی در برنامه‌ریزی شهری و مدیریت محیط به‌شمار می‌آیند (Ridd 1995; Ji and Jensen 1999). درصد سطوح نفوذناپذیر به عنوان بخشی از سطوح نفوذناپذیر بر روی منطقه‌ای کوچک، بیشتر درباره مناطق ساخته شده (ساختمانی) اطلاعات می‌دهد تا طبقه‌بندی کاربری / پوشش اراضی (Ji and Jensen 1999). به عنوان مثال، برای تخمین جمعیت، سطوح نفوذناپذیر در مناطق مسکونی به‌طور کل با میزان

پس از انجام عملیات طبقه‌بندی، تصویر حرارتی براساس انحراف از معیار به پنج کلاس تقسیم‌بندی شد (جدول ۱) و نقشه حرارتی سطح زمین تهیه گردید (شکل ۴). در این تقسیم‌بندی جزایر حرارتی بر روی نقشه حرارتی، محدوده‌های دمایی ۵۱/۴۷-۴۷/۲۹ را شامل می‌شوند.

جدول ۱. طبقات دمایی شهر تهران براساس محدوده حرارتی آنها

محدوده‌های دمایی	دما (درجه سانتی‌گراد)
بسیار خنک	۱۵/۴۲-۲۶/۵۴
خنک	۲۶/۵۴-۳۵/۴۸
معمولی	۳۵/۴۸-۴۱/۴۸
گرم	۴۱/۴۸-۴۷/۲۹
بسیار گرم	۴۷/۲۹-۵۱/۴۷



شکل ۴. نقشه طبقات حرارتی سطح زمین شهر تهران

با توجه به نقشه طبقات دمایی شهر تهران، جزایر حرارتی شهر تهران منطبق است بر مراکز تجاری، فرودگاه‌ها، مراکز حمل‌ونقل و مناطق خاکی و بایر. در این تحقیق سعی شده است که هر یک از جزایر حرارتی و عوامل تشکیل‌دهنده آن مورد بررسی قرار بگیرد.

$F(\text{dark surface}) =$ درصد سطوح تاریک،

$F(\text{light surface}) =$ درصد سطوح روشن،

$E =$ مقدار خطای ناشی از اجرای مدل LSU.

۲-۲-۴- بررسی رابطه بین دما و توصیف‌گرهای بیوفیزیکی شهر

در این مرحله از آنالیز رگرسیون چندمتغیره برای دستیابی به تأثیر نسبی هر یک از متغیرهای بیوفیزیکی بر الگوی LST استفاده می‌شود و سپس با استفاده از این نتایج آماری، رابطه میان توصیف‌گرهای بیوفیزیکی به دست آمده از روش LSU و UHI مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

۳- نتایج

۳-۱- نتایج تهیه نقشه طبقه‌بندی حرارتی و تعیین جزایر حرارتی

در این مرحله با استفاده از روابط ذکر شده، تصویر حرارتی شهر تهران استخراج شد (شکل ۳). همان‌طور که بیان گردید، برای طبقه‌بندی تصویر حرارتی حاصل، از روش Smith (1986) استفاده شد. پس از انجام عملیات طبقه‌بندی و تقسیم‌بندی تصویر حرارتی به پنج کلاس، نقشه حرارتی سطح زمین تهیه شد (شکل ۲). جدول ۱ طبقات دمایی شهر تهران را براساس محدوده حرارتی آنها نشان می‌دهد. در این تقسیم‌بندی بر روی نقشه‌های حرارتی، جزایر حرارتی محدوده‌های دمایی بسیار گرم را شامل می‌شوند.



شکل ۳. تصویر حرارتی تولید شده حاصل از سنجنده ETM+

۳-۲- نتایج ارزیابی نقشه دمایی تهران

با ایجاد مدل رگرسیونی میان دمای سطح زمین که از تصاویر ETM+ استخراج شده است و دمای هوای ایستگاه‌های هواشناسی و همچنین دمای هوای حاصل از رابطه (۶) و دمای هوای ایستگاه‌های موجود، صحت رابطه (۸)، برای تبدیل داده‌های دمای سطح زمین به دمای هوا تأیید می‌شود، چرا که میزان همبستگی میان داده‌های سطح زمین و داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، از ۰/۸۰ به ۰/۹۸ در داده‌های تبدیل شده سطح زمین (Tst) و داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی می‌رسد. نتایج اجرای مدل‌های رگرسیونی در جدول ۲ آمده است. با توجه به دقت بالای اطلاعات به دست آمده، می‌توان از این داده‌ها و رابطه ایجاد شده، دمای هوای دیگر نقاط شهر تهران را تخمین زد.

جدول ۲. نتایج اجرای مدل‌های رگرسیونی بر روی دمای Ts، Tst و Ta

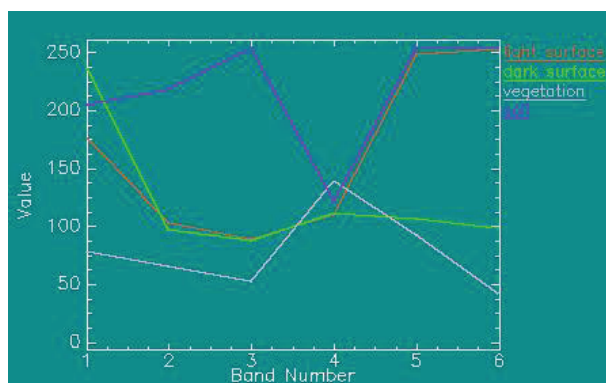
مدل رگرسیونی	R ²
$Ta = 44/33 - 0/19 \times Ts$	۰/۸۰
$Ta = 17/31 + 0/49 \times Tst$	۰/۹۸

۳-۳- نتایج مدل جداسازی طیفی

برای تعیین EMها، با توجه به نمونه‌ای از نمودار

طیفی پدیده‌های مختلف به دست آمده از تصاویر ETM+ و همچنین با در نظر گرفتن پوشش‌های اراضی موجود در شهر و با استناد به مدل V-I-S، سه نوع EM در نظر گرفته شد که شامل پوشش گیاهی، خاک و سطوح نفوذناپذیر بود. در نتیجه با حذف مناطق آبی به‌وسیله الگوریتم طبقه‌بندی نظارت‌نشده^۱ (K_MEAN)، پس از بررسی تصاویر نتایج مدل LSU و تصویر خطا، از آنجا که میزان خطا بیشتر از حد مناسب و پذیرفتنی یعنی یک بود، با انجام طبقه‌بندی نظارت نشده بر روی تصویر ETM+ و مطابقت نتایج آن با تصویر RMS، مشخص شد که مناطق نفوذناپذیر از لحاظ طیفی می‌بایست به دو کلاس تقسیم‌بندی شوند که شامل سطوح تاریک و سطوح روشن‌اند (شکل ۶).

پس از تعیین پیکسل‌های خالص (شامل سطوح روشن، سطوح تاریک، خاک و پوشش گیاهی) این نمونه‌ها به تصویر اصلی منتقل شد و براساس میانگین بازتاب طیفی هر یک، کتابخانه طیفی پدیده‌ها در تصویر ۶ باندهای استخراج گردید. شکل ۵ منحنی طیفی سطوح روشن، سطوح تاریک، خاک و پوشش گیاهی را نمایش می‌دهد. با توجه به کتابخانه طیفی تهیه شده، از آنجا که در باندهای مختلف پدیده‌های مختلف از هم تفکیک‌شدنی‌اند، همه باندهای تصویر در اجرای مدل جداسازی طیفی باید مورد استفاده قرار گیرند.

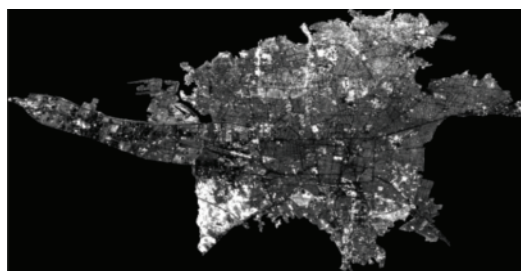


شکل ۵. منحنی طیفی کلاس‌های مختلف و کتابخانه طیفی با به‌کارگیری تصویر ETM+

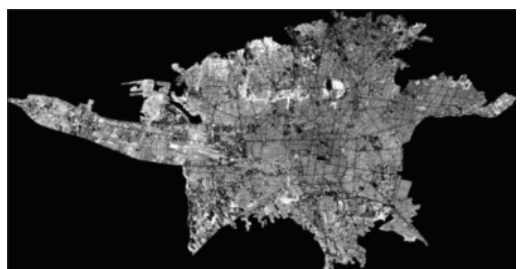
1. Unsupervised Classification



تصویر باند سطوح روشن



تصویر باند پوشش گیاهی



تصویر باند خاک



تصویر باند سطوح تاریک

شکل ۶. تصاویر کسری هر یک از EMها

۳-۴- نتایج ارزیابی مدل LSU

علاوه بر آنکه مدل V-I-S همه پوشش‌های اراضی - مانند آب - را شامل نمی‌شود و در تصاویر سنجش از دوری امکان نشان دادن سطوح نفوذناپذیر به وسیله EM وجود ندارد، و همچنین درجه دقت طبقه‌بندی زیرپیکسل مدل V-I-S براساس سه EM بالا نبود، اما آزمون این مدل نشان داد که برای طبقه‌بندی مناطق شهری مناسب است، چرا که ساختار فیزیکی این سه پوشش اراضی با هم متفاوت است و هر یک از سطوح پوشش گیاهی، سطوح نفوذناپذیر و خاک دارای انرژی و رطوبت منحصر به فرد است، به همین علت در این تحقیق برای استخراج پوشش اراضی بر مدل V-I-S تأکید شده است و درواقع مبنای چارچوب مفهومی مطالعه قرار گرفته است.

پس از بهبود EMها، با توجه به نتایج به دست آمده دقت روش انجام شده بسیار مناسب به نظر رسید، به آن معنی که کسر پوشش گیاهی در مناطق مرکزی تجاری نزدیک به صفر، در مناطق مسکونی متراکم ۰ تا ۱۵ درصد، در مناطق مسکونی کم‌تراکم ۱۵ تا ۴۰ درصد، و در فضاهای سبز شهری و در زمین‌های کشاورزی نزدیک به ۱۰۰ درصد است. همچنین کسر

پس از استخراج کتابخانه طیفی، الگوریتم LSU بر روی تصویر اعمال شد. خروجی این الگوریتم همواره یک مؤلفه بیشتر از تعداد EMها دارد، که تصویر مربوط به RMSE نتایج است. شکل ۶ تصاویر طبقه‌بندی شده سطوح روشن، سطوح تاریک، خاک و پوشش گیاهی را در سطح زیرپیکسل نشان می‌دهد.

همان‌طور که اشاره شد، با استفاده از EMهای سطوح تاریک و سطوح روشن می‌توان کسر سطوح نفوذناپذیر را در هر پیکسل مشخص کرد. درواقع مقدار سطوح نفوذناپذیر را به صورت تقریبی می‌توان از رابطه (۱۱) محاسبه کرد.

از آنجا که عدد خطا نزدیک به صفر بود و در نتیجه رابطه تأثیر بسیار ناچیزی داشت، سطوح نفوذناپذیر از مجموع سطوح تاریک و سطوح روشن به دست آمد. شکل ۷ تصویر سطوح نفوذناپذیر را نشان می‌دهد.



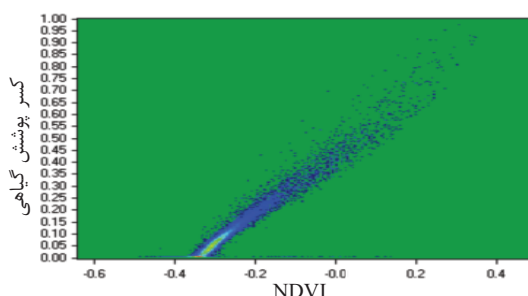
شکل ۷. تصویر کسری سطوح نفوذناپذیر

شهری با توجه به اندازه پیکسل‌های تصویر حرارتی که ۶۰ متر است، برای حذف خطای ناشی از اختلاف اندازه پیکسل‌های تصویر کسری پوشش اراضی، اندازه پیکسل‌های این تصاویر به ۶۰ متر تبدیل شد. سپس از آنالیز رگرسیون چندمتغیره برای دستیابی به تأثیر نسبی هر یک از متغیرهای بیوفیزیکی بر الگوی LST استفاده شد و با استفاده از این نتایج آماری رابطه میان توصیف‌گرهای بیوفیزیکی به دست آمده از روش LSU و UHI تحلیل گردید.

مشهود است که سطوح نفوذناپذیر و خاک به علت جذب و نگه داشتن انرژی خورشیدی اثر گرم‌کننده دارند، در حالی پوشش گیاهی به علت تبخیر - تعرق، دارای اثر خنک‌کننده است. بنابراین دما با افزایش سطوح نفوذناپذیر و خاک افزایش می‌یابد و با افزایش پوشش گیاهی کاهش پیدا می‌کند. جدول ۳ نتایج رگرسیون چندمتغیره میان LST و هر یک از متغیرهای استخراج شده از تصاویر سنجش از دوری را نشان می‌دهد.

از آنجا که شهر تهران به علت وسعت آن در عرض جغرافیایی وسیعی پراکنده شده و مقدار دما تحت تأثیر عرض جغرافیایی و آلودگی است، مقدار همبستگی R^2 در این مدل عدد بسیار بالایی را نشان نمی‌دهد و رابطه معناداری میان پوشش‌های اراضی و دما دیده نمی‌شود. برای بررسی‌های بیشتر اثر پوشش‌های اراضی مختلف بر روی دما، هر یک از جزایر حرارتی تهران با توجه به نقشه حرارتی به تفکیک مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۴).

پوشش خاک رابطه منطقی با توزیع خاک در منطقه مورد مطالعه دارد، چرا که کسر پوشش خاک در مناطق مرکزی تجاری کمتر از ۱۵ تا ۲۰ درصد و بیشتر از ۵۰ درصد در حواشی مناطق شهری است. همچنین در مورد مناطق مسکونی و خیابان‌ها کسر سطوح تیره ۲۰ تا ۷۰ درصد و کسر سطوح تیره ۱۰ تا ۲۰ درصد مشاهده شده که نشان‌دهنده تطابق زیاد آن با واقعیت است. بیشینه RMS محاسبه شده با این روش ۰/۰۰۰۰۰۲ بود که این عدد، نشان‌دهنده حداقل خطا و دقت بسیار مناسب (کمتر از ۰/۰۲) در مدل است. همچنین با بررسی رابطه میان تصویر کسر پوشش گیاهی و تصویر NDVI استخراج شده از تصاویر ETM+ با ضریب همبستگی ۹۷ درصد و با توجه به مقدار Pvalue کوچک‌تر از ۰/۰۵ (که بیانگر رابطه معنادار این تصاویر است)، صحت نتایج به دست آمده تأیید می‌شود (شکل ۸).



شکل ۸. اسکترپلات تصویر NDVI و تصویر کسر پوشش گیاهی

۳-۵- نتایج بررسی رابطه میان دما و جزایر حرارتی با پوشش‌های اراضی

پس از استخراج سهم هر یک از پوشش‌های زمین

جدول ۳. نتیجه مدل رگرسیون چندمتغیره میان LST و تصاویر کسری پوشش‌های اراضی

مدل رگرسیونی	R^2
$LST = 44/37 - 11/94 V - 1/85I + 1/89 S$	۰/۳۴

جدول ۴. نتایج هر یک از مدل‌های رگرسیون چندمتغیره اجرا شده برای جزایر حرارتی شهر تهران

جزیره حرارتی	مدل رگرسیونی	R ²
فرودگاه مهرآباد	$LST = 47/70 + 0/66 S - 0/61 I - 10/827$	0/58
جنوب تهران	$LST = 45/38 - 3/36 S - 2/281 I - 19/507$	0/67
منطقه بازار	$LST = 48/6 - 2/07 S - 1/171 I - 29/357$	0/52
بزرگراه مدرس	$LST = 41/65 + 4/27 S - 0/61 I - 12/377$	0/72
مناطق صنعتی غرب تهران	$LST = 44/47 + 0/58 S + 2/251 I - 11/427$	0/59
فرودگاه قلعه مرغی	$LST = 46/40 + 3/20 S - 1/341 I - 13/057$	0/62
منطقه صنعتی - مزروعی جنوب غرب	$LST = 46/59 - 0/04 S - 0/141 I - 8/297$	0/63

جدول ۵. مقایسه نتایج اجرای مدل رگرسیون چندمتغیره مناطق آلوده و با آلودگی کم

جزیره حرارتی	مدل رگرسیونی	R ²
منطقه آلوده	$37/5 + 6/92 I - 8/477$	0/75
منطقه با آلودگی کم	$38/66 + 2/81 I - 9/547$	0/59

به نقشه حرارتی طبقه‌بندی شده جزایر حرارتی در مناطقی با پوشش‌های اراضی مختلف تشکیل شده است و آنها را نمی‌توان به پوشش اراضی خاصی نسبت داد و مناطقی با شرایط ذیل را در بر می‌گیرد:

- مناطق تجاری و مسکونی با تراکم بالا مانند میدان امام خمینی منطقه بازار که مهمترین مرکز تجاری تهران است، علاوه بر جنس مواد تشکیل‌دهنده ساختمان‌ها که دارای ظرفیت حرارتی و هدایت حرارتی بالایی هستند و میزان آلودگی آنها کم است، جمعیت زیاد و حجم بالایی از ترافیک را دارد. همچنین انرژی زیادی که به علت اثر دره‌ای ساختمان‌ها در طول روز گذشته در زمین ذخیره شده است و گرمای آنتروپوژنیک تولید شده از سیستم‌های خنک‌کننده و وسایل نقلیه نیز از عوامل افزایش گرمای این منطقه است.
- در خیابان‌ها و بزرگراه‌های دارای تردد و ترافیک بالا مانند بزرگراه خاوران و دماوند که جزایر حرارتی این مناطق، علاوه بر عوامل ذکر شده بر

در ادامه تحلیل رابطه میان دما و کسر پوشش اراضی به دست آمده، به بررسی عامل آلودگی بر رابطه میان پوشش زمین و جزایر حرارتی پرداخته شده و دو منطقه آلوده و با آلودگی کم تهران، به‌منظور فهمیدن تأثیر آلودگی ترافیک و گرمای آنتروپوژنیک که از ویژگی‌های سطوح نفوذناپذیر است، با هم مقایسه شد (جدول ۵).

همان‌طور که از نتایج مدل رگرسیونی این مناطق مشاهده می‌شود، تأثیر سطوح نفوذناپذیر در مناطق آلوده در قیاس با مناطق دارای آلودگی کم، در ایجاد جزایر حرارتی بیشتر است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

دمای سطح زمین از جمله پارامترهای اصلی در مطالعه شهرهاست، چرا که تقریباً با دمای هوای لایه‌های پایینی اتمسفر شهری که مرکز موازنه انرژی سطح است و تعیین‌کننده اقلیم میان ساختمان‌ها و مؤثر بر زندگی و آسایش ساکنان شهری است، برابری می‌کند. با توجه

آلودگی و همچنین وجود سطوح نفوذناپذیر نیز از دلایل افزایش دمای این فرودگاه است.

- در مناطق بایر و نیمه‌بایر داخل شهر مانند پارک پردیسان و اطراف بزرگراه مدرس و همچنین در مناطق بایر و نیمه‌بایر حاشیه شهر در جنوب غربی و شمال تهران، به علت ظرفیت حرارتی بالای خاک خشک و عدم انجام تبخیر - تعرق، جزایر حرارتی تشکیل شده است.

- در مناطق صنعتی غرب و شرق تهران به علت ایجاد سطوح نفوذناپذیر، پوشش گیاهی کم، گرمای ناشی از سوخت‌های فسیلی و تولید آلودگی زیاد، در محدوده‌های وسیعی از زمین جزایر حرارت تشکیل شده است.

همان‌طور که اشاره شد، در این تحقیق برای طبقه‌بندی تصویر شهر تهران با در نظر گرفتن پیچیدگی سطوح شهری و قدرت تفکیک مکانی تصاویر سنجنده ETM+ از روش زیرپیکسل استفاده شد. با توجه به نتایج حاصل از مدل جداسازی طیفی، موارد زیر در خور توجه‌اند:

- با توجه به قدرت تفکیک طیفی و مکانی سنجنده ETM+، تصاویر حاصل از این سنجنده، دارای قابلیت مناسبی برای طبقه‌بندی سطوح شهری دارند.

- نتایج حاصل از کتابخانه طیفی بیانگر آن است که برای طبقه‌بندی مناطق شهر با استفاده از تصویر ETM+، بهتر است که از تمام باندهای مرئی و مادون قرمز میانی این سنجنده استفاده شود، زیرا در باندهای مختلف این سنجنده پدیده‌های مختلف از یکدیگر تفکیک‌شدنی‌اند.

- اگر چه مدل V-I-S همه پوشش اراضی مانند آب را دربرنمی‌گیرد و درجه دقت طبقه‌بندی با استفاده از این مدل و براساس سه EM بالا نبوده است، اما آزمون این مدل نشان داد که برای طبقه‌بندی مناطق شهری مناسب است، چرا که ساختار فیزیکی هر یک از این سه پوشش اراضی با

افزایش دمای سطوح نفوذناپذیر و افزایش گرمای محسوس آنها، دارای گرما و آلودگی ناشی از سوخت خودروها نیز هست. در تابستان یکی از عوامل اصلی ایجاد گرما آلودگی ناشی از وسایل نقلیه است. خودروها تولیدکننده گازاکسید نیتروژن و مونواکسید کربن‌اند که این گازها پس از جذب تابش با طول موج بلند و بازتابش آنها به فضا موجب افزایش دما می‌شوند.

- در محدوده‌های میدان راه‌آهن و ایستگاه راه‌آهن و ترمینال جنوب و ترمینال غرب علاوه بر فقدان پوشش گیاهی که به‌وسیله ایجاد سایه و فرایند تبخیر - تعرق تعدیل‌کننده دمای هواست، وجود سطوح نفوذناپذیر، تردد و ترافیک خودروها و تولید گاز و آئروسول‌ها به‌وسیله آنها، تراکم بالای جمعیت در این منطقه، تردد زیاد اتوبوس‌ها و قطارهای بین شهری عوامل اصلی افزایش دمای این منطقه است.

- در مناطق دارای جمعیت زیاد در جنوب شهر تهران - مانند شهرک هجرت و دولت آباد - علاوه بر مناطق مسکونی که به علت نوع مواد تشکیل دهنده این سطوح و تولید گرمای آنتروپوژنیک موجب افزایش دما می‌شوند، وجود کارگاه‌های صنعتی نیز در این گونه مناطق بر ایجاد جزایر حرارتی اثر تشدیدکننده دارد.

- در فرودگاه‌های شهر تهران - همچون فرودگاه نیروی هوایی، فرودگاه قلعه‌مرغی و همچنین فرودگاه مهرآباد - پوشش گیاهی اندک، وجود سطوح آسفالت که دارای آلودگی کم و ظرفیت هدایت حرارتی بالایی هستند، و مناطق بایر حاشیه فرودگاه‌ها که در فصل تابستان به علت فقدان رطوبت عمل تعدیل‌کننده تبخیر را انجام نمی‌دهند، از عوامل تشکیل جزایر حرارتی این مناطق به شمار می‌آیند. علاوه بر این، در فرودگاه مهرآباد و مناطق اطراف آن تردد زیاد خودروها و هواپیماها و تولید گرمای آنتروپوژنیک و ایجاد

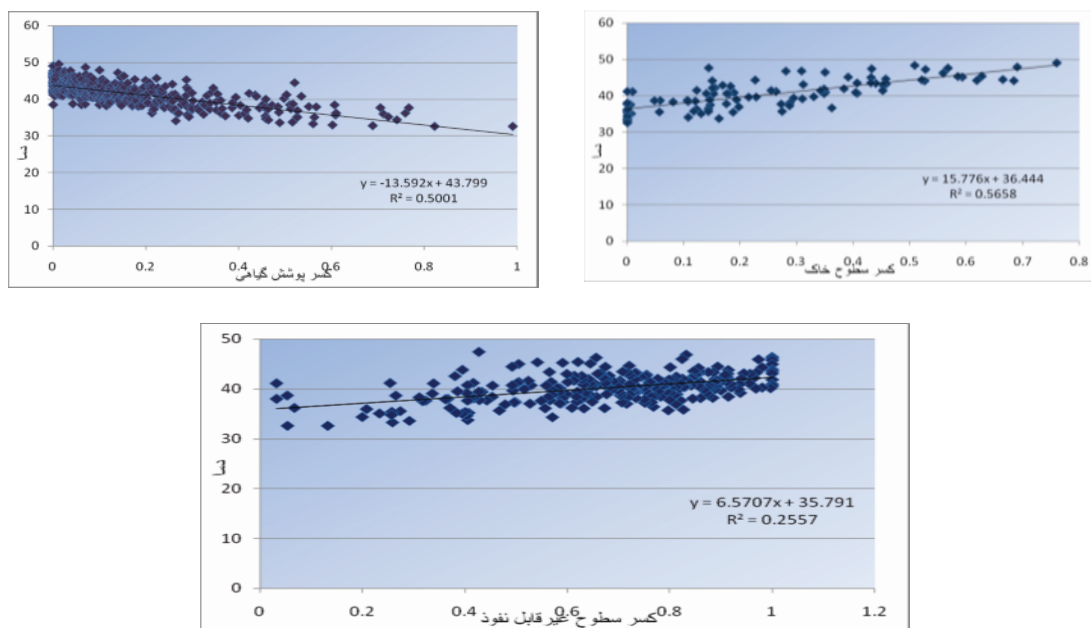
دمای سطح را کنترل می‌کنند که بیشتر به نوع کاربری‌های اراضی شهری و جمعیت مناطق مختلف شهر مربوط می‌شود. شکل ۹ چگونگی رابطه هر یک از پوشش‌های اراضی را با دما در سطح شهر تهران نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج، مشخص می‌شود که سطوح نفوذناپذیر از طریق جذب و ذخیره انرژی خورشیدی و تولید گرمای آنتروپوژنیک و همچنین تولید آلودگی خاک از طریق جذب و ذخیره انرژی خورشیدی اثر گرمایشی دارند، در حالی که پوشش گیاهی از طریق ایجاد توازن گرمایی به‌وسیله تبخیر - تعرق و تولید سایه، اثر خنک‌کننده دارند. در ادامه با توجه به اینکه عوامل تشکیل جزایر حرارتی در هر یک از آنها متفاوت است، به بررسی و تحلیل این عوامل در جزایر حرارتی شهر تهران پرداخته می‌شود.

- در اطراف بزرگراه مدرس، با توجه به آنکه سطوح ساخته شده مساحت اندکی را اشغال می‌کنند اما بیشتر با خاک‌های بایر و نیمه‌بایر پوشیده شده‌اند. علت تشکیل این جزیره حرارتی وجود سطوح بایر و نیمه‌بایر در این منطقه است.
- در جزیره حرارتی فرودگاه مهرآباد به علت آلودگی ناشی از تردد خودروها و هواپیماها و همچنین سطوح باز باندهای فرودگاه و فقدان سایه و تأثیر خنک‌کننده آن، اختلاف بین ضریب تأثیر سطوح خاک و سطوح نفوذناپذیر بسیار کاهش می‌یابد؛ و ضریب تأثیر سطوح پوشش گیاهی نیز به علت پوشش گیاهی - که از نوع چمن است - در قیاس با پارک پردیسان کمتر است.
- در جزیره حرارتی منطقه بازار و جنوب تهران نیز با توجه به تراکم و تردد زیاد جمعیت و آلودگی زیاد ناشی از ترافیک، ضریب تأثیر خاک و سطوح نفوذناپذیر تفاوت زیادی را نشان نمی‌دهد؛ و با توجه به سطح محدود مناطق خاکی، علت اصلی تشکیل جزایر حرارتی در این منطقه گرمای آنتروپوژنیک ناشی از جمعیت زیاد و آلودگی نتیجه شده از تردد زیاد اتوبوس‌ها و خودروهاست.

دیگری متفاوت است و هر یک از این سطوح (پوشش گیاهی، سطوح نفوذناپذیر و خاک) انرژی و رطوبت منحصر به فردی دارد.

- با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق، بهترین ترکیب برای تعیین کلاس‌های سطوح ناهمگن شهری شامل پوشش گیاهی، خاک، سطوح تاریک و سطوح روشن است و سطوح نفوذناپذیر از مجموع سطوح تاریک و سطوح روشن حاصل می‌شود.
 - با توجه به ویژگی‌های مشابه ذرات سازنده خاک و مصالح مورد استفاده در برخی از ساختمان‌ها، با وجود حضور نداشتن سطوح خاکی در برخی از پیکسل‌ها، نتیجه مدل جداسازی طیفی نشان می‌دهد که در برخی از پیکسل‌های تصویر کسر سطوح خاکی، درصدی از پیکسل‌هایی که شامل سطوح نفوذناپذیرند، به‌وسیله سطوح خاکی اشغال شده‌اند.
 - تصاویر سنجنده ETM+ با توجه به محدودیت تعداد باندهای طیفی، قابلیت استخراج انواع خاک و پوشش گیاهی را از هم ندارند.
 - نتایج بررسی رابطه میان تصویر کسری پوشش گیاهی و NDVI بیانگر آن است که مدل جداسازی طیفی روشی مناسب برای استخراج دقیق سطح فضای سبز شهری است.
 - با توجه به نتایج منطقی حاصل از ارزیابی مدل جداسازی طیفی در مناطق مختلف شهر، که پیش‌تر بیان شد، مدل LSU روشی مناسب برای طبقه‌بندی سطوح شهری است.
- با توجه به اینکه هدف اصلی از انجام این تحقیق استخراج جزایر حرارتی و تعیین رابطه کمی آن با پوشش‌های اراضی مختلف شهری است، در ادامه به طبقه‌بندی سطوح شهری بر اساس توصیف‌گرهای بیوفیزیکی شهرها پرداخته شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در مناطق دارای پوشش اراضی مشابه، دماهای متفاوت وجود داشته است. این مطلب بیانگر آن است که علاوه بر پوشش اراضی، شرایط دیگری نیز



شکل ۹. رابطه هر یک از پوشش‌های اراضی با دما در شهر تهران

جزایر حرارتی با استفاده از فناوری سنجش از دور، تحقیق حاضر با توجه به مطالعه در سطح زیرپیکسل و تحصیل نتایج به صورت کمی، ظاهراً دقت بیشتری دارد. همچنین روش استفاده شده برای کسب بهترین نتایج از مدل LSU که با در نظر گرفتن ویژگی‌های بیوفیزیکی هر یک از کلاس‌های پوشش اراضی انجام شد، موجب بهبود نتایج با استفاده از یک روش تلفیقی گردید. بررسی تفکیکی جزایر حرارتی موجب شد که علاوه بر در نظر گرفتن پوشش‌های اراضی، تأثیر کاربری‌های مختلف شهری نیز بر تشکیل جزایر حرارتی مورد بررسی قرار گیرد. مقایسه نتایج نهایی تحقیق با تحقیقات صورت گرفته در سال‌های اخیر، از قبیل کار تحقیقی Weng در سال ۲۰۰۷، دلالت بر این داشت که تصاویر کسری استخراج شده، به صورت در خور توجهی بیانگر نوعی ریخت‌شناسی یا مورفولوژی از شهرند، که رابطه‌ای منطقی را با خصوصیات بیوفیزیکی شهر نشان می‌دادند. میزان دما با سطوح نفوذناپذیر رابطه منفی و با پوشش گیاهی سبز رابطه مثبت نشان داد. به‌علاوه، نتایج این تحقیق با نتایج Xiao, Moody در سال ۲۰۰۵ انطباق داشت، به گونه‌ای که بیان می‌کرد

- در جزیره حرارتی مناطق صنعتی غرب تهران با توجه به آلودگی فراوان ناشی از صنایع این منطقه، ضریب تأثیر سطوح نفوذناپذیر در گرمای این مناطق بیشتر از سطوح خاکی و بایر آنهاست و علت اصلی تشکیل جزایر حرارتی در آنها، علاوه بر وجود مناطق بایر و نیمه‌بایر و سطوح مبتنی و آسفالت که ظرفیت گرمایی بالایی دارند، وجود صنایع و آلودگی و گرمای تلف شده از کارخانجات است.
 - در جزیره حرارتی فرودگاه قلعه‌مرغی به علت وجود محدوده‌های بایر و نیمه‌بایر وسیع در اطراف باند فرودگاه، و وجود نداشتن تبخیر و تعرق و همچنین جذب و ذخیره انرژی خورشیدی، دمای این منطقه افزایش یافته و موجب تشکیل جزایر حرارتی شده است.
 - در منطقه مزروعی و صنعتی جنوب غرب، حضور سطوح خاکی و سطوح نفوذناپذیر و آلودگی ناشی از صنایع در کنار هم علت اصلی تشکیل جزیره حرارتی این منطقه است.
- در مقایسه با تحقیقات انجام شده در زمینه مطالعه

۵- منابع

- Akbari, H. 2000, **Study of Thermal Distribution Pattern Using TM Thermal Data in Tehran City**, M.Sc. Thesis, Tarbiat Modears University.
- Amiri, R., Alimohamadi, A., and Alavipanah, S.K. 2007, **Study of Spatio Temporal Variation of Temperature in Relation to Land Use/clover Using TM and ETM⁺ Data in Tabriz**, J. of Environmental Studies, 43: 107-120 .
- Artis, D.A. and Carnahan, W.H., 1982, **Survey of Emissivity Variability in Thermography of Urban Areas**, Remote Sensing of Environment, 12: 313-329.
- Chander, G. and Markham, B., 2003, **Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges**, IEEE Transactionson Geoscience and Remote Sensing, 41(11): 674-2677.
- Changshan W.U., 2003, **Remote Sensing, Geographical Information Systems, and Spatial Modeling for Analyzing Public Transit Services**, Columbus, Ohio University of Ohio.
- Gallo, K.P., McNab, A.L., Karl, T.R., Brown, J.F., Hood J.J. and Tarpley, J.D. 1993, **The Use of NOAA AVHRR Data for Assessment of the Urban Heat Island Effect**, Journal of Applied Meteorology, 32 (5): 899-908.
- دماهای بیشتر در مناطق شهری با الگویی توزیع شده بودند که رابطه‌ای مستقیم با توزیع الگوی پوشش اراضی داشتند.
- براساس نتایج و ارزیابی‌های انجام شده در این تحقیق، و به‌منظور بهبود نتایج به دست آمده، این پیشنهادها ارائه می‌گردد:
- به دلیل محدود بودن تعداد باندهای سنجنده ETM⁺، استخراج انواع خاک و پوشش گیاهی از تصاویر این سنجنده ممکن نیست. پیشنهاد می‌شود با استفاده از تصاویر سنجنده‌های ابرطیفی، انواع خاک‌های بایر و کشاورزی و همچنین انواع پوشش گیاهی چمن و درخت با تفکیک از یکدیگر استخراج شود و تأثیر هر یک از انواع مختلف خاک و پوشش گیاهی در افزایش و کاهش دما مورد بررسی قرار گیرد.
 - با توجه به دقت نتایج این تحقیق در استخراج سطوح نفوذناپذیر به عنوان بهترین شاخص سطوح ساخته‌شده شهری، با توسعه این نتایج و محاسبات کمی آنها در طول زمان‌های مختلف، می‌توان میزان توسعه سطوح شهری را به دست آورد و از اطلاعات آن برای تخمین تغییرات هیدرولوژیکی و همچنین آلودگی و برنامه‌ریزی‌های شهری استفاده کرد.
 - پیشنهاد می‌شود در تحقیقات بعدی از تصاویر با قدرت تفکیک بالاتر مانند تصاویر سنجنده ASTER برای استخراج کسر هر یک از پوشش‌های زمین استفاده شود و با نتایج تصاویر کسری استخراج شده به‌وسیله تصاویر ETM⁺ مقایسه گردد.
 - همچنین پیشنهاد می‌شود برای بالا بردن دقت نتایج، تأثیرات دیگر پارامترها مانند شرایط توپوگرافی و موقعیت جغرافیایی بر جزایر حرارتی در نظر گرفته شود.

- Gallo, K.P. and Tarpley, J.D., 1996, **The Comparison of Vegetation Index and Surface Temperature Composites for Urban Heat- island Analysis**, International Journal of Remote Sensing. 17(15): 3071-3076.
- Ji, M. and Jensen, J.R., 1999, **Effectiveness of Subpixel Analysis in Detecting and Quantifying Urban Imperviousness from Landsat Thematic Mapper Imagery**, *Geocarto International*, 14(4): 31-39.
- Landsat 7 Science Data Users Handbook, 2006, URL: http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook_toc.html
- Nakamura, M., 2002, **Evaluation of Vegetation for Mitigating Thermal Impact on Urban Area Using Remote Sensing (in Japanese)**, Unpublished Master's Thesis, Department of Civil Engineering, University of Tokyo.
- Rao, P.K., 1972, **Remote Sensing of Urban Heat Islands from an Environmental Satellite**, *Bulletin of the American Meteorological Society* 53: 647-648.
- Rao, P.S., Gavane, A.G., Ankam, S.S., Ansari, M.F., Pandit, V.I. and Nema, P., 2004, **Performance Evaluation of a Green Belt in a Petroleum Refinery: a Case Study**, *Ecological Engineering* 23(2): 77-84.
- Roth, M., Oke, T.R. and Emery, W.J., 1989, **Satellite Derived Urban Heat Islands from Three Coastal Cities and the Utilization of Such Data in Urban Climatology**, *International Journal of Remote Sensing*, 10 (11): 1699-1720.
- Rickard, 2003, **Time-frequency and Time-scale Representations of Doubly Spread Channels**, Ph.D. Thesis, Fine Hall Library, Princeton University, Princeton, NJ, USA: Dissertations/Theses.
- Ridd, M.K., 1995, **Exploring a V-I-S (vegetation.impervious surface.soil) Model for Urban Ecosystem Analysis through Remote Sensing: Comparative Anatomy for Cities**, *Int. J. Remote Sens.*, 16: 2165-2185.
- Smith R.M., 1986, **Comparing Traditional Methods for Selecting Class Intervals on Choropleth Maps**, *Prof Geogr* 38(1): 62-67.
- Sobrino, J.A., Caselles, V. and Becker, F., 1990, **Significance of the Remotely Sensed Thermal Infrared Measurements Obtained Over a Citrus Orchard**, *ISPRS Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44: 343- 354.
- Sobrino, J.A., Raissouni, N., and Li, Z. L., 2001, **A Comparative Study of Land Surface Emissivity Retrieval from NOAA Data**, *Remote Sensing of Environment*, 75: 255-267.
- Sobrino, A., Juan, C., Jiménez-Muñoz. and Leonardo Paolinib, 2004, **Land Surface Temperature Retrieval from LANDSAT TM 5**, *Remote Sensing of Environment*, 90: 434-440.

- Stathopoulou, M. and Cartalis, C., 2007, **Daytime Urban Heat Islands from Landsat ETM+ and Corine Land Cover Data: An Application to Major Cities in Greece**, Int. J. Remote Sens., 358–368.
- Voogt, J.A. and Oke, T.R., 2003, **Thermal remote sensing of urban climates**, Remote Sensing of Environment, 86(3): 370-384.
- Weng, Q., 2003, **Fractal Analysis of Satellite-Detected Urban Heat Island Effect**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 69(5): 555-566.
- Weng Q., Lu D., and Schubring J., 2004, **Estimation of Land Surface Temperature–Vegetation Abundance Relationship for Urban Heat Island Studies**, Remote Sens Environ 89(4):467–483.
- Weng, Q., Liu, H. and 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 Ecosyst, 10:203–219.
- Xian, G. and Crane, M., 2006, **An Analysis of Urban Thermal Characteristics and Associated Land Cover in Tampa Bay and Las Vegas Using Landsat Satellite Data**, Remote Sensing of Environment, 104: 147–156.
- Xiao, J. and 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 (2-3): 237-250.