

ارزیابی توزیع مکانی دمای سطح زمین در محیط زیست شهری با کاربرد سنجش از دور حرارتی

سید محمود هاشمی^۱، سید کاظم علوی پناه^۲، مرتضی دیناروندی^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری برنامه ریزی محیط زیست دانشگاه تهران hashemism@ut.ac.ir
۲- استاد گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی دانشگاه تهران salavipa@ut.ac.ir
۳- دانشجوی دکتری برنامه ریزی محیط زیست دانشگاه تهران
تاریخ دریافت: ۹۰/۹/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۱۹

چکیده

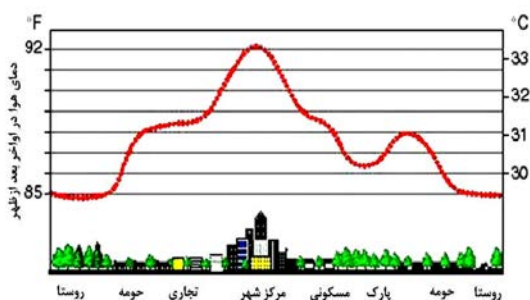
در عصر کنونی، شهرها به عنوان اصلی ترین زیستگاه گونه انسان، تأثیرات ژرفی بر بیوسفر گذاشته‌اند. این تغییرات گسترده انسانی، پیامدهای ناخواسته و ناخوشایندی همچون افت کیفیت محیط زیستی را نیز به همراه داشته است که سرانجام به کاهش «کیفیت زندگی» منجر می‌شود. گرمتر شدن محیط زیست شهری یکی از این آثار ناآگاهانه توسعه شهری ناپایدار است که «جزیره حرارتی شهری» نامیده می‌شود. جزایر حرارتی سطحی به گرمتر بودن سطوح شهری نسبت به شرایط گذشته آنها و همچنین نسبت به سطوح پیراشهری دلالت می‌کند و از طریق سنجش از دور حرارتی قابل شناسایی و تجزیه و تحلیل است. در برنامه‌ریزی محیط زیست دو مرحله اساسی قابل تمیز است: یکی تحلیل و تبیین و دیگری ترکیب و تجویز. تأکید اصلی در این پژوهش بر ارزیابی شرایط دمای سطح محیط زیست شهری معطوف شده است تا به تجویز راه حل. در این مطالعه، توزیع مکانی و گرادینت تغییرات دمای سطح و همچنین شاخص پوشش گیاهی NDVI در منطقه شهری تهران با استفاده از تصویر ماهواره‌ای لندست ETM+7 تجزیه و تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد بر خلاف انتظار، حداکثرهای دمایی سطح در پهنه‌های مترکم شهری حضور گسترده‌ای ندارند و در پهنه‌های کوهستانی، ارتباط بین LST و NDVI پایین است و به طور کلی گرادینت توزیع دمایی در منطقه شهری تهران از شمال شرق به جنوب غرب کاهش می‌یابد. همچنین حداکثر دماهای LST، بیشتر در پهنه‌های کوهستانی شرق (بی بی شهربانو) و پهنه صنعتی غرب مشاهده می‌شوند.

کلید واژه

ارزیابی محیط زیست شهری؛ دمای سطح زمین؛ سنجش از دور حرارتی؛ منطقه شهری تهران

سر آغاز

تعرق (۳) تغییرات در شار تابشی^۶ و جریان‌های نزدیک به سطح^۷؛
(۴) انتشار گرمای انسان ساز.



شکل شماره (۱): نيمرخ جزیره حرارتی شهری
(منبع: U.S. EPA, 2007).

یکی از آثار ناخواسته و منفی توسعه شهری، افزایش دمای محیط زیست شهری است. شهرها نسبت به پیرامون خود دمای بیشتری دارند و این پدیده به عنوان جزیره حرارتی شهری (UHI)^۱ شناخته می‌شود (شکل شماره ۱). فرایندهای متعددی در بین اجزای ساختاری شهر حضور دارند که در عملکرد حرارتی شهر و تشکیل جزایر حرارتی مؤثرند که مهم‌ترین آنها عبارت است از (Xiao, et al., 2007):

(۱) تغییر در ویژگی‌های فیزیکی سطوح (آلبيدو^۲، ظرفیت حرارتی^۳، هدایت حرارتی^۴) به علت جایگزینی پوشش گیاهی با آسفالت و بتون؛ (۲) کاهش رطوبت سطحی^۵ مورد نیاز برای تبخیر و

برای نقشه سازی دمایی کوچک-مقیاس^{۱۱} شهر مناسب است؛ پس از آن داده‌های مادون قرمز حرارتی Landsat TM و Landsat ETM+ با توان تفکیک ۱۲۰ و ۶۰ متر، به ترتیب، برای استخراج دمای سطحی به کار برده شد.

توزیع مکانی دمای سطح زمین در چهار شهر ایالات متحده (Atlanta, Baton Rouge, Salt Lake City and Sacramento) با استفاده از سنسجس از دور حرارتی توسط Quattrochi و همکاران (2000) مطالعه شده و نتایج آنها نشان می‌دهد که رشد گسترده شهر، باعث افت کیفیت کلی هوای شهر شده است. ازن سطحی^{۱۲} در شرایط باد آرام، تابش خورشیدی متراکم و دمای زیاد هوا (بیش از ۲۶ درجه سانتیگراد) از واکنش شیمیایی مواد آلی فرار (VOCs) و اکسیدهای نیتروژن (NOx) شکل می‌گیرد.

از این رو جزایر حرارتی شهری (UHIs) که دمای هوا را ۴ تا ۵ درجه سانتیگراد افزایش می‌دهد، اثر پس زمینه‌ای در شکل‌گیری ازن سطحی دارد و باعث تقویت آن می‌شود. بنابراین با کاهش شدت جزایر حرارتی به احتمال زیاد کاهش معنی‌داری در میزان ازن رخ خواهد داد. این مطالعه ترکیب هماهنگی از فناوری سنسجس از دور، سامانه اطلاعات جغرافیایی، مشارکت نهادهای دولتی کلان و محلی، برنامه ریزان شهری و عموم مردم را در شکل‌گیری سامانه اطلاعاتی پشتیبان تصمیم‌گیری^{۱۳} برای مدیریت محیط زیست شهری پیشنهاد می‌کند.

ارزیابی آثار توسعه شهری بر جزایر حرارتی شهر Guangzhou چین توسط Weng و Yang (۲۰۰۴) با استفاده از تصاویر Landsat TM نشان داد که گسترش ساخت و سازهای شهری موجب تقویت اثر جزایر حرارتی با بزرگی^{۱۴} ۰/۲ تا ۴/۷ درجه سانتیگراد شده است.

برخی از کاربردهای ارزیابی جزایر حرارتی شهری در برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست شهری حاصل از این پژوهش ذکر می‌شود: تعیین لکه‌های حساس و پهنه‌های مداخله و تخصیص مکان بهینه فضای سبز با اندازه و شکل مناسب برای کاهش آثار منفی حرارتی؛ مدل‌سازی و پیش‌بینی آثار حرارتی طرح‌های توسعه پیشنهادی آبی (تغییرات کاربری‌های مختلف و آثار حرارتی آن)؛ فضای سبز و لکه‌های پوشش گیاهی نقش مؤثری در کاهش تابش‌های حرارتی بالارو ایفا می‌کنند، بنابراین حفاظت، حمایت، ارتقا و گسترش کمی و کیفی طبیعت-درون-شهری از اهمیت بسزایی

جزایر حرارتی آثار سوء بر اراضی پیرامونی، بر خرد اقلیم (میزان بارش، دما و جریان باد)، آلودگی‌ها و مصرف منابع آب می‌گذارد، بنابراین شناسایی و ارائه راهکار برای کاهش شدت آن ضروری است. در ماههای گرم سال به دلیل پدیده جزیره حرارتی نیاز به استفاده بیشتر از تجهیزات خنک‌کننده است که موجب مصرف بیشتر انرژی می‌شود (U.S. EPA, 2007). افزایش دما در نتیجه پدیده جزیره حرارتی، باعث بروز فرایندهای شیمیایی می‌شود که تشکیل مولکول‌های ازن را تشدید می‌کند و تهدید جدی برای سلامت انسان است. ازن سطح زمین ارتباط تنگاتنگی با جزیره حرارتی شهری دارد (U.S. EPA, 2007). در پهنه‌هایی که جزیره حرارتی شدت بیشتری دارد، کمبود شدید پوشش گیاهی و بیشبود سطوح نفوذناپذیر انسان ساخت^{۱۵} مشاهده می‌شود (Xian and Crane, 2006) که در واقع نقاط مشکل آفرین شهر را نشان می‌دهد و در این پهنه‌ها به علت فقدان فرایندهای مؤثر اکولوژیکی، افزایش سطح آلاینده‌های گوناگون هوا، آلودگی صوتی، مشکلات روانی و غیره مشاهده می‌شود. با شناسایی پهنه‌های مداخله می‌توان راهکارهایی برای ارتقای کیفیت محیط زیستی از جمله کاشت درختان مناسب و افزایش آلبیدو پیشنهاد کرد. کاهش شدت جزیره حرارتی شهری به معنای پیشگیری از هدر رفتن سرمایه، ذخیره سازی انرژی و پول و جلوگیری از آلودگی هوا و آثار زیانبار آن بر سلامت جسمی، روحی و روانی جامعه است.

مرور منابع

جزایر حرارتی شهری (UHI) به طور گسترده‌ای از طریق مشاهدات زمینی^{۱۶} با استفاده از شبکه‌های ثابت دماسنجی^{۱۷}، یا پیمایش با دماسنج‌های نصب شده بر روی وسایل نقلیه، در مطالعات اقلیم شناسی شهری بررسی شده است (Spronken-Smith and Oke 1998, Wong and Yu 2005, رنجبر سعادت آبادی و همکاران ۱۳۸۳، ۱۳۸۵).

با ورود فناوری سنسجس از دور حرارتی بررسی جزایر حرارتی شهری به صورت غیرمستقیم با استفاده از سکوه‌های ماهواره‌ای و هواپیمایی در مقیاس‌های قاره‌ای و جهانی امکان پذیر شد و دروازه‌های جدیدی برای مشاهده جزایر حرارتی و تحلیل علل و عوامل آن فراهم شد (Voogt and Oke 2003, Weng, et al., 2004)؛ مطالعه پدیده جزایر حرارتی شهری با استفاده از اندازه‌گیری دمای سطح زمین در ابتدا با کاربرد ماهواره NOAA AVHRR صورت گرفت که توان تفکیک مکانی ۱/۱ کیلومتری این ماهواره

(۱) ابعاد مکانی و زمانی دسترسی به منابع و حضور شرایط و ارزشهای گذرای زماندار (فصلی) در مکان (ارتفاع)؛
 (۲) ارتباطات یا وابستگی متقابل عمودی بین اجزای ساختاری و بخش‌های نامتجانس منطقه؛
 (۳) عدم تجانس ساختاری در سه مقیاس منطقه‌ای، سیمای سرزمین، و اکوسیستمی در تحلیل و برنامه ریزی.

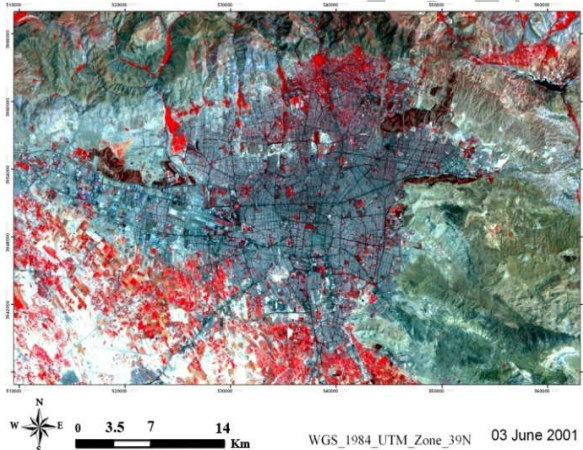
روش کار داده ها

تصویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این پژوهش مربوط به Landsat 7 ETM+ است. تصویر ETM+ تهران مربوط به گذر ۱۸، ردیف ۱۶۴ و ردیف ۳۵ از طریق سازمان فضایی ایران در فرمت bil تهیه شد که ویژگی‌های آن در جدول شماره (۱) ذکر شده است.

جدول شماره (۱): ویژگی‌های تصویر ماهواره‌ای مورد استفاده

سنجنده	تاریخ اخذ تصویر	تاریخ شمسی	ساعت تصویربرداری (به وقت محلی)	تعداد باندها	زاویه ارتفاع خورشیدی	زاویه آزیموت خورشیدی	زاویه میل
ETM+	03 June 2001	۱۲ خرداد ۱۳۸۰	۹:۴۵	۸	۶۵/۷	۱۱۸/۱	-۹/۵۴

تصویر،^{۳۳} UT بیضوی WGS-84 زون ۳۹ شمالی است (شکل شماره ۴).



شکل شماره (۴): تصویر ماهواره‌ای ETM+ تصحیح هندسی شده با ترکیب رنگی کاذب (FCC) ۲-۳-۴

بازیابی دمای سطح زمین (LST)

برای استخراج دمای سطح، سه مرحله انجام شد:
 الف: تبدیل عدد رقومی (DN)^{۲۴} به تابش طیفی^{۲۵}:

مهم بر ویژگی‌های فضاهای شهری تهران داشته است (شکل شماره ۲ و ۳). امروزه شهر تهران با سابقه ۲۰۰ سال پایتختی (که نسبت به سایر شهرهای قدیمی ایران قدمت کمتری دارد) به کلان شهری بزرگ در جهان تبدیل شده است. شهری که جمعیت آن در سال ۱۲۶۲، ۱۰۶ هزار نفر بود در سال ۱۳۸۵ به ۱۳ میلیون و ۴۱۳ هزار نفر رسید که نشان دهنده افزایش بیش از حد جمعیت در این فاصله زمانی است. از سوی دیگر، رشد جمعیت موجب گسترش فیزیکی شهر شد و شهری که تا اوایل دهه ۱۳۰۰ درون حصار به وسعت ۲۴ کیلومتر مربع قرار داشت امروزه تبدیل به کلانشهری با هسته‌های متعدد مسکونی و صنعتی شده است (مطالعات طرح جامع شهر تهران، ۱۳۸۶). ویژگی‌های اکولوژیکی ساختار فلات ایران و ماهیت مکانیابی تهران تحت تأثیر عوامل زیر است (Yavari, et al., 2007):

در بحث تفسیر تصاویر ماهواره‌ای مراحل زیر طی شد (پردازش تصاویر^{۲۰}):

آماده سازی داده‌ها برای پردازش

به دلیل جدا بودن فایل‌های مربوط به باندهای انعکاسی (باندهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷) و باند حرارتی (باند ۶) و تفاوت در توان تفکیک مکانی و سطر و ستون تصاویر، قبل از انجام تصحیح هندسی، باند حرارتی به ابعاد باندهای انعکاسی با روش نزدیکترین همسایه تبدیل گشته (از ۶۰ متر به ۳۰ متر) و پس از تغییر فرمت در مجموعه داده‌ها بر اساس موقعیت گوشه‌های تصویر افزوده شد (عملیات Layer Stacking).

تصحیح هندسی

تصحیح هندسی تصویر ماهواره‌ای ETM+ از طریق ارجاع و تطبیق با نقشه توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری با استفاده از ۱۶ نقطه کنترل زمینی (GCP)^{۳۱} بیشتر شامل تقاطع خیابان‌ها و جاده‌ها با پراکنش مناسب در سطح تصویر، انجام شد. دقت تصحیح هندسی معمولاً باید کمتر از یک پیکسل و مناسب‌تر نیم پیکسل باشد که در این مطالعه خطای^{۳۲} RMS کمتر از نیم پیکسل (۰/۴۶۷) بود. در ضمن سیستم مختصاتی مورد استفاده برای

(۲) $NDVI > 0.5$ ؛ که نشان دهنده پهنه‌های با پوشش گیاهی فراوان است و توان تشعشعی پوشش گیاهی برای آن فرض می‌شود ($\epsilon_{veg} = 0.99$);

(۳) $0.5 \geq NDVI \geq 0.2$ ؛ که در این مورد پیکسل‌ها مخلوطی از خاک و پوشش گیاهی است و توان تشعشعی (ϵ_{Mix}) بر این اساس محاسبه می‌شود:

$$\epsilon = \epsilon_{veg} P_v + \epsilon_{soil} (1 - P_v) \quad (3)$$

که P_v همان نسبت پوشش گیاهی است و از معادله زیر بدست می‌آید:

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (4)$$

که $NDVI_{max} = 0.2$ و $NDVI_{min} = 0.5$ است. نحوه محاسبه NDVI در بخش بعد آورده شده است.

با به‌دست آوردن مقادیر توان تشعشعی، دمای سطح زمین (LST) از فرمول زیر محاسبه می‌شود (Artis and Carnahan, 1982):

$$LST = \frac{T_B}{1 + (\lambda \times T_B / \rho) \ln \epsilon} \quad (5)$$

که λ = طول موج رادیانس ساطع شده ($11.5 \mu m$); $\rho = 10^{-2} \times 1.438$; ϵ = توان تشعشعی است.

سرانجام نقشه حرارتی بر اساس رابطه (۶) از درجه کلون به درجه سانتیگراد تبدیل شد (شکل شماره ۶).

$$S = Kelvin - 273.15 \quad (6)$$

د: محاسبه NDVI

شاخص گیاهی تفریقی نرمال شده^{۲۷} از پرکاربردترین شاخص های فراوانی پوشش گیاهی است که از طریق نسبت گیری باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک به‌دست می‌آید (علوی پناه، ۱۳۸۵). با توجه به سنجنده ETM+ می‌شود:

$$NDVI = \frac{\rho(\text{band } 4) - \rho(\text{band } 3)}{\rho(\text{band } 4) + \rho(\text{band } 3)} \quad (7)$$

که در آن، $b_4 = \text{band } 4$ ؛ $b_3 = \text{band } 3$ ؛ و ρ ضریب انعکاس^{۲۸} باند است که از رابطه زیر به‌دست می‌آید (Landsat Project Science Office, 2002):

$$\rho_p = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cdot \cos \theta_s} \quad (8)$$

که ρ = ضریب انعکاس باند (بدون واحد)؛ L_λ = رادیانس طیفی؛ d = فاصله زمین-خورشید در واحد نجومی (1.496×10^8); $ESUN_\lambda$ =

تبدیل عدد رقومی به تابش طیفی بر اساس مقادیر مرجع تابش طیفی ارائه شده در کتابچه راهنمای سنجنده (Landsat Project Science Office, 2002) بر اساس فرمول زیر صورت گرفت:

$$L_\lambda = [(LMAX - LMIN) / (QCALMAX - QCALMIN)] * (QCAL - QCALMIN) + LMIN$$

که در این رابطه، $QCALMIN$ = کوچکترین عدد رقومی = ۱؛ $QCALMAX$ = بزرگترین عدد رقومی = ۲۵۵؛ $QCAL$ = عدد رقومی در محل پیکسل مورد نظر؛ $LMIN$ = ارزش تابش طیفی باند ۶ در مقدار DN صفر ($W m^{-2} sr^{-2} \mu m^{-1}$)؛ $LMAX$ = ارزش تابش طیفی باند ۶ در مقدار DN ۲۵۵ ($W m^{-2} sr^{-2} \mu m^{-1}$). مقادیر $LMIN$ (۳/۲۰۰) و $LMAX$ (۱۲/۶۵۰) از فایل هدر تصویر استخراج شده و در رابطه استفاده شد.

ب: تبدیل رادیانس طیفی به دمای جسم سیاه

داده های باند حرارتی ETM+ با استفاده از رابطه پلانک، از تابش طیفی به دمای جسم سیاه (T_B) که در آن توان تشعشعی یک حداکثر توان تشعشعی فرض می‌شود، تبدیل می‌شود (Landsat Project Science Office, 2002):

$$T_B = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1 \right)} \quad (2)$$

که T_B = دمای مؤثر در ماهواره بر حسب کلون ($^{\circ}K$)؛ K_1 = ثابت کالیبراسیون اول معادل 1.438×10^{-2} ؛ K_2 = ثابت کالیبراسیون دوم معادل 0.014388 ؛ L_λ = رادیانس طیفی پیکسل مورد نظر ($W m^{-2} ster^{-1} \mu m^{-1}$).

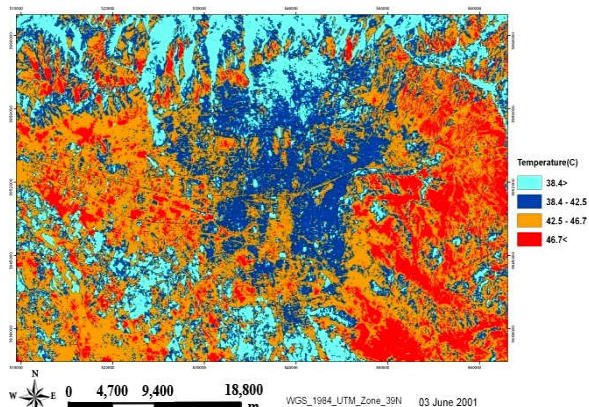
ج: تصحیح توان تشعشعی

تصحیح توان تشعشعی بر بازیابی صحیح دمای سطحی و همچنین بر کیفیت اطلاعات حاصل از داده های مادون قرمز حرارتی مؤثر است (علوی پناه ۱۳۸۵). تصحیح توان تشعشعی برای تبدیل دمای جسم سیاه به دمای سطح زمین (LST) بر اساس (Sobrino, et al., 2004) انجام گرفت. یکی از گزینه‌های عملیاتی و کاربردی برای به‌دست آوردن توان تشعشعی، (روش آستانه NDVI)^{۲۶} است، که بر این اساس توان تشعشعی سطحی به سه طبقه بر اساس مقادیر NDVI تقسیم بندی شد (Sobrino, et al., 2004):

(۱) $NDVI < 0.2$ ؛ که حاکی از خاک لخت است و توان

تشعشعی خاک لخت لحاظ می‌شود ($\epsilon_{Soil} = 0.97$);

میانگین منهای انحراف معیار] $38/4 >$ درجه سانتیگراد؛ طبقه (۲): میانگین منهای انحراف معیار تا میانگین $38/4$ تا $42/5$ درجه سانتیگراد؛ طبقه (۳): میانگین تا میانگین افزون بر انحراف معیار $42/5$ تا $46/7$ درجه سانتیگراد؛ طبقه (۴): مقادیر بزرگتر از میانگین افزون بر انحراف معیار $46/7 <$ درجه سانتیگراد]



شکل شماره (۷): نقشه طبقه بندی توزیع LST در سطح

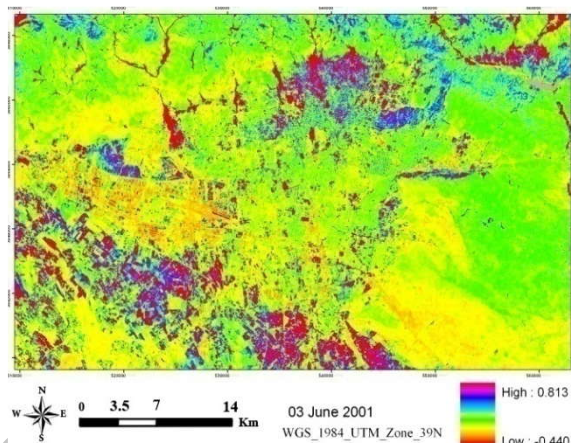
منطقه شهری تهران

در کل منطقه شهری تهران، میانگین LST، $42/54$ ، انحراف معیار $4/14$ ، حداقل $14/18$ و حداکثر $51/48$ درجه سانتیگراد است. طبقه ۱ دمایی (کمتر از $38/4$) که نشان دهنده خنک ترین پهنه هاست در دو بخش کوهستانی شمالی و کشاورزی جنوبی بیشترین گسترش را دارد. در بخش‌های کوهستانی شمالی، این نواحی شامل رود دره‌ها (که پوشش گیاهی متراکم و جریان مؤثر باد در آن وجود دارد)، پهنه‌های حومه شهری شمالی (بیشتر منطقه ۱ شهرداری تهران) و دریاچه سد لتیان است که توزیع دمای سطح پیوسته‌ای از لحاظ طبقه ۱ دارند.

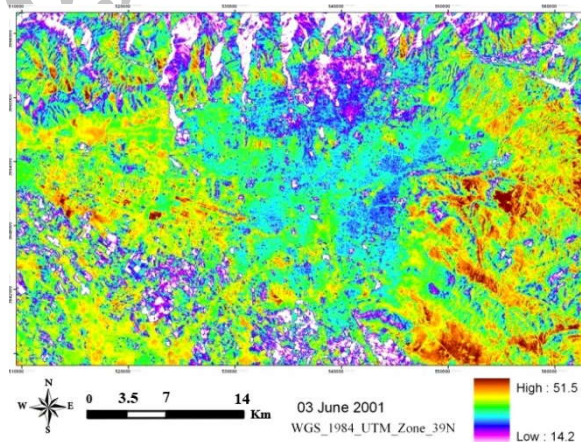
طبقه ۱ در بخش‌های کوهستانی شرق، بر خلاف انتظار به صورت لکه‌هایی اندک وجود دارد؛ همچنین در پهنه‌های غربی (حومه شهری و در امتداد آزاد راه تهران-کرج)، این طبقه، حضور کم‌رنگ، تنک و گسسته‌ای دارد. در هسته شهرنشینی (بخش مرکزی تصویر با حداکثر ساخت و ساز)، طبقه ۱ دمایی به صورت لکه‌هایی پراکنده، منطبق بر پارک‌های شهری، گسترده شده است. در پهنه‌های کشاورزی جنوبی طبقه ۱ توزیع نسبتاً پیوسته‌ای دارد که منطبق بر اراضی زراعی پوشیده از گیاه است.

طبقه ۲ دمایی $38/4$ تا $45/5$ درجه سانتیگراد) بیشتر در نواحی شهری، پیرامون هسته قدیمی شهر به سمت بیرون، قرار گرفته است. در سایر نواحی طبقه ۲ به صورت بافری پیرامون طبقه ۱، به

(میانگین بازتابندگی خورشیدی اگزواتمسفریک)^{۳۹} (باند $3 = 1551/000$ ، باند $4 = 1044/000$ * watts/(meter squared * $1/4m$))؛ $\theta =$ زاویه زینتی خورشید به درجه $(24/3)$. همه مشخصه‌های فوق از Landsat Project Science Office (2002)، به دست آمد به جز θ که از فایل هدر ETM+ به دست آمد.



شکل شماره (۵): نقشه NDVI منطقه شهری تهران



شکل شماره (۶): نقشه توزیع دمای سطح در منطقه شهری تهران

تجزیه و تحلیل

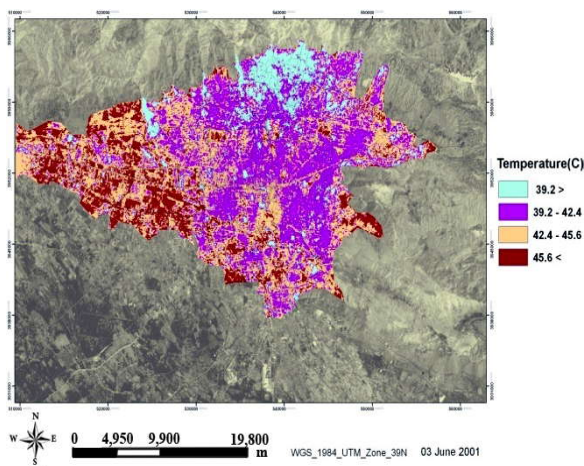
توزیع مکانی دمای سطح

بررسی توزیع مکانی دمای سطح در دو بخش صورت گرفت: (۱) توزیع LST در سطح منطقه شهری تهران، (۲) توزیع LST در سطح سیمای سرزمین شهری که در ادامه هر یک جداگانه بررسی می‌شود.

توزیع دمای سطح در منطقه شهری تهران

برای بررسی نقشه توزیع دمای سطح (شکل شماره ۶)، دمای سطح به چهار طبقه بر اساس میانگین و انحراف معیار تقسیم بندی شد (شکل شماره ۷ و جدول شماره ۲): طبقه (۱): مقادیر کوچکتر از

شماره (۹) قابل تشخیص است. طبقه ۴ دمایی که حاکی از جزایر حرارتی سطحی است، بیشتر در بخش غربی شهر گسترده‌اند که شاید به دلیل حضور گسترده صنایع در این بخش باشد. طبقه ۲ دمایی، بخش عمده سطوح ساخت و ساز در هسته شهرنشینی را در بر می‌گیرد و در حدود ۴۰٪ از پهنه‌ها را شامل می‌شود. طبقه ۳ دمایی حضور گسترده‌ای در بخش غربی و در هسته قدیمی شهر و همچنین فضاهای باز دارد. بر خلاف انتظار، فضاهای باز مانند تپه‌های عباس آباد، پارک پردیسان در طبقه ۳ و ۴ قرار گرفته‌اند.



شکل شماره (۸): طبقه بندی توزیع LST در سیمای سرزمین شهری تهران

جدول شماره (۳): ویژگی‌های طبقات دمایی در سطح سیمای

طبقه ۴	طبقه ۳	طبقه ۲	طبقه ۱	
۴۵/۶ <	۴۲/۴ - ۴۵/۶	۳۹/۲ - ۴۲/۴	۳۹/۲ >	دما (درجه سانتیگراد)
٪۱۶/۷۴	٪۴۲/۴۸	٪۳۹/۳۴	٪۱/۴۵	مساحت (درصد)

تجزیه و تحلیل ترانسکت

برای درک شفاف‌تری از گرادیان‌های محیط زیستی، از تجزیه و تحلیل ترانسکت استفاده شد. ۸ ترانسکت در جهت‌های غربی-شرقی و شمالی-جنوبی در محدوده انتخاب شدند تا تغییرات LST و NDVI در طول ترانسکت به صورت دقیق‌تری بررسی شود (شکل شماره ۹). شکل شماره ۱۰ نیمرخ حاصل از ترانسکت‌ها را نشان می‌دهد که در اینجا به بررسی ترانسکت‌های B-B' و H-H' پرداخته می‌شود.

شکل نوار باریکی قرار گرفته است. طبقه ۳ دمایی (۴۲/۵ تا ۴۶/۷ درجه سانتیگراد) بیشتر در نواحی غربی تا جنوب غربی به صورت متراکم و پیوسته واقع شده است. این طبقه ماتریس پس زمینه دمای سطح در منطقه شهری تهران است. طبقه ۲ دمایی در پهنه شهری بر روی هسته قدیمی شهر (بازار سنتی و ...) قرار گرفته است که پیوستگی آن به سمت جنوب امتداد می‌یابد.

تپه‌های شاخص شهر شامل لویزان، عباس آباد، پردیسان و چیتگر، بیشتر در این طبقه دمایی قرار می‌گیرند. حداقل حضور این طبقه دمایی در پهنه‌های شمالی است. طبقه ۴ دمایی (مقادیر بیشتر از ۴۶/۷ درجه سانتیگراد) در نگاه اول، بیشتر در پهنه کوهستانی شرق و جنوب شرقی منطقه واقع شده که جالب توجه به نظر می‌آید. پس از آن پهنه غربی منطقه، بیشترین گسترش را از نظر طبقه ۴ داراست.

جدول شماره (۲): ویژگی‌های طبقات دمایی در سطح

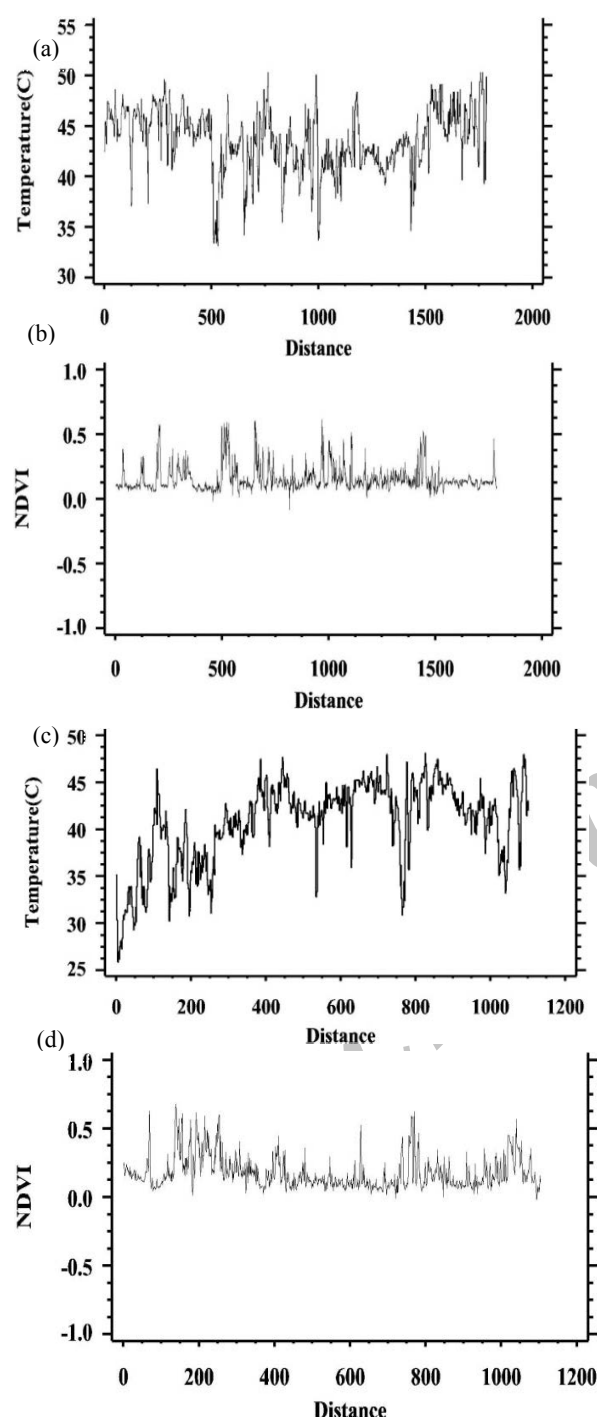
منطقه شهری تهران

طبقه ۴	طبقه ۳	طبقه ۲	طبقه ۱	
۴۶/۷ <	۴۲/۴ - ۴۶/۷	۳۸/۴ - ۴۲/۵	۳۸/۴ >	دما (درجه سانتیگراد)
٪۱۳/۳۰	٪۴۱/۴۴	٪۲۹/۹۵	٪۱۵/۳۰	مساحت (درصد)

توزیع دمای سطح در سیمای سرزمین شهری

برای بررسی توزیع دمای سطح در سیمای سرزمین شهری ابتدا مرز پهنه‌های شهری مشخص و سپس از سایر منطقه شهری جدا شد. طبقه بندی LST بر اساس همان روش بخش قبل در اینجا نیز استفاده شد: طبقه (۱): مقادیر کوچکتر از ۳۹/۲ درجه سانتیگراد؛ طبقه (۲): ۳۹/۲ تا ۴۲/۴ درجه سانتیگراد؛ طبقه (۳): ۴۲/۴ تا ۴۵/۶ درجه سانتیگراد؛ طبقه (۴): بیشتر از ۴۵/۶ درجه سانتیگراد.

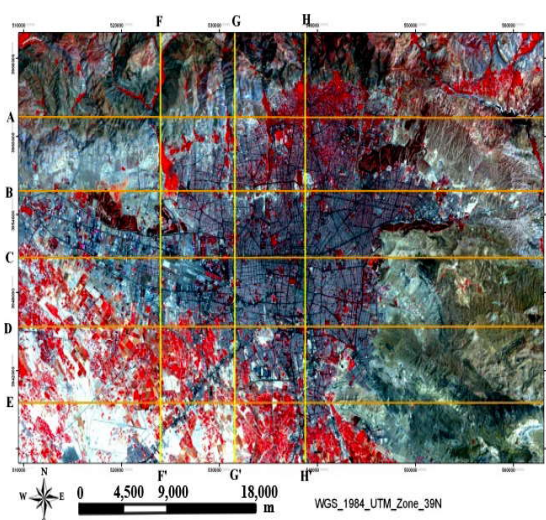
شکل شماره (۸) و جدول شماره (۳) ویژگی‌های توزیع طبقات دمایی فوق در سطح سیمای سرزمین شهری را نشان می‌دهد. به طور کلی در سطح سیمای سرزمین شهری میانگین دمای سطح ۴۲/۳۶ با انحراف معیار ۳/۲، حداقل دما ۱۴/۴۸ و حداکثر آن ۵۱/۴۸ درجه سانتیگراد است. طبقه ۱ دمایی که حاکی از جزایر خنک شهری است بیشتر در پهنه‌های شمالی شهر (منطقه ۱ شهرداری تهران) - به خاطر حضور گسترده پوشش گیاهی در رود دره‌ها و امتداد آن - قابل توجه است. در سایر نقاط شهری این طبقه نشان دهنده پارک‌های شهری است که موقعیت آنها به خوبی در شکل



شکل شماره (۱۰): تغییرات LST و NDVI در طول ترانسکت ها.

موقعیت ترانسکت ها: [(a) و (b) ترانسکت B-B'; (c) و (d) ترانسکت H-H']
 H' شاخص ها: [(a) و (d) دمای سطح LST؛ (b) و (c) NDVI]. در محور افقی تمام نمودارها، فاصله‌ها بر اساس اندازه پیکسل (۳۰ متر) است.

در فاصله ۴۵۰۰ متری تا انتها، فضاهای باز کوهستانی غالب می‌شود که حداقل نوسان‌های NDVI (SD کم) و نوسان‌های



شکل شماره (۹): موقعیت ترانسکت ها در منطقه شهری تهران

ترانسکت B-B' طوری انتخاب شد تا از تپه‌های چیتگر (در غرب)، پردیسان و عباس آباد (در مرکز)، پهنه‌های ساخت و ساز و همچنین کوههای شرق تهران عبور کند و رفتارهای این عناصر شاخص سیمای سرزمین از نظر LST و NDVI بررسی شود (شکل شماره ۹).

از فاصله ۰ تا ۱۰۰۰ متری فضاهای باز (خاک لخت و تپه ماهورها) غالب هستند که گهگاه لکه‌های سبزی در بین آنها ظاهر می‌شود. اوج‌های منحنی NDVI و همچنین فرودهای منحنی LST متناظر با آن، نشان دهنده این فضاهای سبز است. در فاصله ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متری لکه‌های ساخت و ساز حضور بیشتری می‌یابند که نوسان‌های اندک (SD کم) منحنی LST و NDVI آن را نشان می‌دهد.

در فاصله ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متری مخلوطی از لکه‌های ساخت و ساز، فضاهای باز (تپه‌های پردیسان و عباس آباد) و پوشش گیاهی حضور دارند که اوج‌های منحنی LST در این فاصله، مبین فضاهای باز و فرودهای آن نشان دهنده فضای سبز و محدوده‌های با نوسان اندک (SD کم) نشان دهنده ساخت و سازند.

در همین فاصله در منحنی NDVI، اوج‌ها نشان دهنده پوشش گیاهی و مناطق با نوسان کم (SD پائین) نشان از فضاهای باز و ساخت و ساز است. در فاصله ۳۲۰۰ تا ۴۲۰۰ متری، لکه‌های ساخت و ساز بر دیگر لکه‌ها غلبه می‌یابد که نوسان کم منحنی LST و NDVI (کاهش تفاوت بین حداقل‌ها و حداکثرها) در این محدوده کاملاً واضح است و همچنان اوج‌های NDVI با فرودهای LST (که حاکی از پوشش گیاهی است) همراه است.

آن افزایش می‌یابد. روند کلی منحنی NDVI از ۰ تا ۷۵۰ کاهش و نوسان‌های آن افزایش می‌یابد.

به طور کلی در ترانسکت H-H، روند منحنی NDVI از ۰ تا ۷۵۰ متری افزایش، از ۷۵۰ تا ۲۲۵۰ کاهش و پس از آن تا انتها افزایش می‌یابد. منحنی LST نیز همین روند را به طور معکوس دنبال می‌کند.

بحث و نتیجه گیری

شهرنشینی به واسطه حضور ساختارهای مصنوعی، سطوح نفوذناپذیر، تراکم زیاد جمعیت و کاربری‌ها، گیاهان و حیوانات اهلی شده^{۳۰} و جریان تغییر یافته‌ی انرژی و مواد به طور بارزی مشخص می‌شود (Hahs, McDonell, 2006).

معمولا شدت اثرگذاری فعالیت‌های انسان بر محیط زیست شهرها، به عنوان متمرکزترین پهنه‌های استفاده انسان از محیط زیست، بستگی زیادی به فاصله از مرکز شهری^{۳۱} دارد.

هر چه از مرکز شهرنشینی دورتر و به نواحی روستایی نزدیکتر شویم، آثار فعالیت‌های انسان بر روی محیط زیست به صورت معینی تغییر و کاهش می‌یابد (Forman and Godron 1986) که این پدیده گرادینت شهری - روستایی ذکر می‌شود (Pickett, et al., 2001). تجزیه و تحلیل گرادینت یکی از فنون^{۳۲} متداولی است که برای بررسی تغییرات الگوهای مکانی و فرایندهای اکولوژیکی در پهنه‌ی سیمای سرزمین مورد استفاده قرار می‌گیرد (McDonell and Pickett 1990).

این فن برای بررسی آثار شهرنشینی بر روی جوامع بی مهرگان^{۳۳} (McIntyre, et al., 2001)، ترکیب و تولید مثل پرندگان (Crooks, et al., 2004)، توزیع و ترکیب پوشش گیاهی (McDonell, et al., 1997)، تجزیه لاشبرگ گیاهان و چرخه مواد غذایی (Pouyat, et al., 1995; McDonell, 1991)، آلودگی (Gingrich and Diamond, 2001) و کیفیت آب (Wear et al., 1998)، مورد استفاده قرار گرفته است. اکولوژیست‌های سیمای سرزمین نیز ساختار عناصر سیمای سرزمین را با استفاده از متریک‌ها در طول گرادینت شهری - روستایی مطالعه کرده‌اند (Luck and Wu 2002, Kong and Wakagoshi, 2005).

به طور کلی گرادینت توزیع دمایی در منطقه شهری تهران از شمال شرق به جنوب غربی کاهش می‌یابد. حداکثر دماهای LST، بیشتر در پهنه‌های کوهستانی شرق (بی بی شهربانو) و پهنه صنعتی

گسترده LST (SD زیاد) متمایز کننده آن است. به طور کلی ترانسکت H-H از پهنه‌های کوهستانی شمالی، رود دره دارآباد، لکه‌های ساخت و ساز کم‌تراکم، تپه‌های عباس آباد، لکه‌های ساخت و ساز متراکم و اراضی زراعی جنوبی، به ترتیب، عبور می‌کند (شکل شماره ۹).

در فاصله ۰ تا ۳۰۰ متری فضای باز کوهستانی غالب است و LST روند افزایش کلی دارد و NDVI روندی تقریباً ثابت با نوسان‌های نسبتاً اندک را دنبال می‌کند. از ۳۰۰ تا ۴۵۰ متری فضاهای باز کاهش و پوشش گیاهی و تا اندازه‌ای ساخت و ساز افزایش می‌یابند که افزایش مقادیر و نوسان‌های NDVI و کاهش LST آن را نشان می‌دهد.

در فاصله ۴۵۰ تا ۷۵۰ متری نوسان‌های NDVI افزایش می‌یابد. اما LST در حول مقدار ۳۶ درجه سانتیگراد در حال نوسان است. این محدوده ترکیب دره‌می از پوشش سبز، ساخت و ساز و فضای باز است. از ۷۵۰ تا ۱۰۵۰ متری، نوسان‌های NDVI نسبتاً کاهش و به طور کلی مقادیرش، سیر نزولی دارند که با روند کلی افزایش LST با نوسان‌های اندک همراه است که گویای حضور گسترده لکه‌های ساخت و ساز است.

در فاصله ۱۰۵۰ تا ۱۲۰۰ متری، فضاهای باز (تپه‌های عباس آباد) غلبه می‌یابند که مقادیر و نوسان‌های NDVI کاهش زیادی می‌یابد ولی منحنی LST روند افزایشی طی می‌کند. از ۱۲۰۰ تا ۱۳۵۰ متر، نوسان‌های NDVI و مقادیر آن نسبتاً افزایش و مقادیر LST و نوسان‌های آن کاهش می‌یابد که حضور توأمان پوشش گیاهی و ساخت و ساز را نشان می‌دهد.

در محدوده ۱۳۵۰ تا ۲۲۵۰ متری، لکه‌های ساخت و ساز افزایش می‌یابند و بر دیگر لکه‌ها غلبه می‌یابند که نوسان‌های اندک NDVI و LST نشان دهنده این موضوع است. البته گاهی منحنی NDVI اوج‌هایی دارد و LST فرودهایی، که حاکی از پوشش سبز شهری است. از ۲۲۵۰ تا ۲۵۵۰ متری، فضاهای باز و پوشش گیاهی غلبه می‌یابند و موجب افزایش نوسان‌های NDVI و LST می‌شوند.

در محدوده ۲۲۵۰ تا ۳۰۰۰ متری، دوباره نوسان‌های LST و NDVI کاهش می‌یابد که از وجود لکه‌های ساخت و ساز غالب، حکایت می‌کند. از ۳۰۰۰ تا انتها لکه‌های باز و پوشش گیاهی (اراضی زراعی جنوبی) غلبه می‌یابند که به صورت کلی نوسان‌های NDVI و مقادیر آن افزایش و مقادیر LST کاهش و نوسان‌های

نتایج این مطالعه نیز نشان داد که سطوح پوشیده از گیاه، دمای سطح کمتری دارند و پوشش گیاهی آثار خنک‌کنندگی بر پیرامون دارد.

بام‌های سبز^{۳۴} که پوشش گیاهی زنده را در بام‌ها استفاده می‌کنند، انباشت گرمایی ساختمان‌ها را کاهش می‌دهند. بام‌های سبز، خیلی خنک‌تر از بام‌های سنتی هستند، زیرا به جای گرم کردن بام و هوای روی آن بخش اعظم انرژی جذب شده برای تبخیر آب استفاده می‌شود. ایجاد فضاهای سبز از قبیل پارک‌ها می‌تواند برای کمک به خنک کردن محلات استفاده شود و ایجاد فضای سبز سرتاسری^{۳۵} در شهر می‌تواند اتمسفر شهری را خنک‌تر کند.

یادداشت‌ها

- 1-Urban Heat Island (UHI)
- 2-Albedo
- 3-Thermal Capacity
- 4-Thermal Conductivity
- 5- Surface Moisture
- 6-Radiative Fluxes
- 7-Near-Surface Flow
- 8- Anthropogenic Impervious Surface
- 9- Ground-based
- 10- Fixed Thermometer
- 11- Small-Scale
- 12- Ground Level Ozone
- 13- Decision Support Information System
- 14- Magnitude
- 15- Vegetation Fraction
- 16- Imperviousness
- 17- Environmental Quality
- 18- Path
- 19- Row
- 20- Image Pre-Processing
- 21- Ground Control Point (GCP)
- 22- Root Mean Square Error (RMS)
- 23- Universal Transverse Mercator (UTM)
- 24- Digital Number (DN)
- 25- Spectral Radiance
- 26- NDVI Threshold Method
- 27- Normalized Difference Vegetation Index
- 28- Reflectance
- 29- Mean solar exoatmospheric irradiances
- 30- Domesticated
- 31- Urban Centre
- 32- Techniques
- 33- Invertebrate Communities
- 34- Green Roofs
- 35- Overall Greening

غرب مشاهده می‌شوند. علت گرم‌تر بودن پهنه‌های کوهستانی شرق، با توجه به زمان تصویر برداری ماهواره Landsat ETM+ که حدود ۱۰ صبح است، قابل توجیه است.

چون در این هنگام، جهت‌های جنوب شرقی و شرق بیشترین انرژی تابشی خورشید را دریافت می‌کنند. البته از اثر سایه نیز که در پهنه‌های کوهستانی، به دلیل تنوع شکل زمین، حضور گسترده‌ای دارد باید به عنوان عامل بروز نوسان‌های دمای سطح نیز نام برد، چون دمای هوا در تهران در طول گرادیانت شمالی- جنوبی به‌طور بارزی کاهش می‌یابد بین دمای سطح و دمای هوا به دلیل وجود سازوکارهای متفاوت ارتباط مشخصی و مستقیمی وجود ندارد (Voogt and Oke 2003, Weng, et al., 2004) که در این مطالعه نیز تأیید شد؛ اما این موضوع در مورد دمای سطح صادق نیست. یعنی LST با ارتفاع (عامل تغییر دهنده دما) ارتباط معنی داری نداشت و اختلاف ارتفاع در حدود ۲۰۰۰ متری پهنه‌های جنوبی با پهنه‌های شمالی تأثیر نیرومندی بر الگوی LST نداشت. همان‌طور که از مشاهده تصویر (شکل ۷) دریافت می‌شود، بر خلاف انتظار، حداکثرهای دمایی سطح در پهنه‌های متراکم شهری حضور گسترده‌ای ندارند. در پهنه‌های کوهستانی، ارتباط بین LST و NDVI پایین است.

شاخص NDVI نشان‌دهنده ویژگی‌های بیوفیزیکی پوشش گیاهی - مانند شاخص سطح برگ، ظرفیت فتوسنتزی (میزان کلروفیل) و فراوانی پوشش گیاهی است (Weng, et al., 2004). افزایش NDVI به معنی افزایش فراوانی پوشش گیاهی و همگن‌تر و یکدست شدن پوشش زمین است. اما کاهش NDVI معرف پدیده‌های متنوع‌تر (آب، فضای باز، خاک لخت، ساخت و ساز و...) و ناهمگن‌تر شدن موزاییک سرزمین است.

با افزایش NDVI (یکدست‌تر شدن پوشش زمین)، همبستگی LST-NDVI نیز قوی‌تر می‌شود. بررسی ترانسکت‌ها نیز این موضوع را تأیید می‌کند، چرا که قله‌های NDVI با دره‌های LST همراه است اما دره‌های LST لزوماً با قله‌های NDVI همراه نیست.

نکته جالب توجه، انحراف معیار اندک LST در ساخت و ساز است. نوسان‌های کم (انحراف معیار اندک) نشان‌دهنده یکدست بودن و تغییرات بیشتر انحراف معیار، نشان از ناهمگونی و تنوع بیشتر است.

منابع مورد استفاده

- بحرینی، س.ح. و همکاران. ۱۳۷۵. کاربرد مطالعات هواشناسی آلودگی هوا در طراحی شهری (نمونه خاص: شهر تهران). مجله محیط شناسی، ۱۸: ۱۷ تا ۳۲.
- رنجبر سعادت آبادی، ع. آزادی، م. علی اکبری بیدختی، ع. ۱۳۸۳. شبیه سازی عددی جزیره گرمایی تهران. نهمین کنفرانس دینامیک شارها، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز.
- رنجبر سعادت آبادی، ع. علی اکبری بیدختی، ع. صادقی حسینی، س.ع. ۱۳۸۵. آثار جزیره گرمایی و شهرنشینی بر روی وضع هوا و اقلیم محلی در کلان شهر تهران بر اساس داده های مهرآباد و ورامین. مجله محیط شناسی، ۳۴: ۲۹ تا ۳۸.
- سعید نیا، ا. ۱۳۶۸. مکان شهر تهران. مجله محیط شناسی، ۱۵: ۱ تا ۱۰.
- علوی پناه، ک. ۱۳۸۵. سنجش از دور حرارتی و کاربرد آن در علوم زمین. انتشارات دانشگاه تهران.
- مخدوم، م. ۱۳۸۱. شالوده آمایش سرزمین. انتشارات دانشگاه تهران.
- مطالعات طرح جامع شهر تهران. ۱۳۸۶. وزارت مسکن و شهرسازی.
- Artis, D.A., W.H., Carnahan. 1982. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment* 12, 313–329.
- Crooks, K.R., A.V., Suarez, D.T., Bolger. 2004. Avian assemblages along a gradient of urbanization in a highly fragmented landscape. *Biological Conservation*, 115: 451–462.
- Forman, R.T.T., M., Godron. 1986. *Landscape Ecology*. Wiley, New York, NY, 619 pp.
- Gingrich, S.E., M.L., Diamond. 2001. Atmospherically derived organic surface films along an urban–rural gradient. *Environ. Sci. Tech.* 35, 4031–4037.
- Hahs, A. K., M.J., McDonnell. 2006. Selecting independent measures to quantify Melbourne’s urban–rural gradient. *Landscape Urban Plan.* 78(4): 435–448.
- Kong, F., N., Nakagoshi. 2005. Spatial-temporal gradient analysis of urban green spaces in Jinan, China. *Landscape Urban Plan.* 78(3): 147–164.
- Landsat Project Science Office. 2002. *Land sat 7 Science Data User’s Handbook*. Available online from following website: http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc. Html, Goddard Space Flight Center, NASA, Washington, DC.
- Luck, M., J., Wu. 2002. A gradient analysis of urban landscape pattern: a case study from the Phoenix metropolitan region of USA. *Landscape Ecol.* 17, 327–339.
- McDonnell, M.J., S.T.A., Pickett. 1990. Ecosystem structure and function along urban–rural gradients: an unexploited opportunity for ecology. *Ecology* 71, 1232–1237.
- McDonnell, M.J., et al. 1997. Ecosystem processes along an urban-to-rural gradient. *Urban Ecosys.* 1, 21–36.
- McIntyre, N.E., et al. 2001. Ground arthropod community structure in a heterogeneous urban environment. *Landsc. Urban Plann.* 52, 257.

- Pickett, S.T.A., et al. 2001. Urban ecological systems: Linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 32, 127–157.
- Pouyat, R.V., M.J., McDonnell. 1991. Heavy metal accumulations in forest soils along an urban-rural gradient in southeastern New York, USA. *Water Air Soil Pollut.* 57, 797–807.
- Pouyat, R.V., M.J., McDonnell, S.T.A., Pickett. 1995. Soil characteristics in oak stands along an urban-rural land-use gradient. *J. Environ. Qual.* 24, 516–526.
- Quattrochi, D.A., et al. 2000. A decision support information system for urban landscape management using thermal infrared data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(10), 1195–1207.
- Sobrino, J.A., M., Jiménez, C.J., Paolinib. 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90: 434-440.
- Spronken-Smith, R.A., T.R., Oke. 1998. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing*, 19(11): 2085 – 2104.
- U.S.EPA. 2007. Basic Information about Heat Island. Available online from following website: <http://www.epa.gov/heatland/about/index.html>.
- Voogt, J.A., T.R., Oke. 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of environment*. 86(3): 370-384.
- Wear, D., M., Turner, R., Naiman. 1998. Land cover along an urban-rural gradient: Implications for water quality. *Ecol. Appl.* 8, 619–630.
- Weng, Q., D., Lu, J., Schubring. 2004. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*. 89, 467–483.
- Weng, Q., S., Yang. 2004. Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city. *Journal of Environmental Management*, 70: 145-156.
- Wong, N.H., C., Yu. 2005. Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat International*, 29, 547–558.
- Xian, G., M., Crane. 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(2): 147-156.
- Xiao, R., et al. 2007. Spatial Pattern of impervious surfaces and their impacts on land surface temperature in Beijing, China. *Journal of Environ. Science*, 19: 250- 256.
- Yavari, A.R., A., Sotoudeh, P., Parivar. 2007. Urban Environmental Quality and Landscape Structure in Arid Mountain Environment. *International Journal of Environmental Research*, 1: 325-340.