

## تحلیل تغییرات جزیره حرارتی سطوح شهری در روز و شب با استفاده از محصولات چند زمانه سنجنده مادیس (مطالعه موردی: کلانشهر تهران)

دریافت مقاله: ۹۶/۳/۱۹ پذیرش نهایی: ۹۷/۳/۳۰

صفحات: ۱۲۸-۱۱۳

سیروس هاشمی دره بادامی: دانشجوی دکتری سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی دانشگاه تهران، تهران، ایران.<sup>۱</sup>

Email: siroushashemi@ut.ac.ir

علی درویشی بلورانی: استادیار سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

Email: ali.darvishi@gmail.com

سید کاظم علوی پناه: استاد سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

Email: salavipa@ut.ac.ir

محمد ملکی: کارشناس ارشد سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

Email: Malekimohamad14@gmail.com

رضا بیات: دانشجوی دکتری مهندسی محیط‌زیست دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران تهران، ایران، تهران، ایران.

Email: bayat7@gmail.com

### چکیده

اصطلاح جزیره حرارتی شهری (UHI)، پدیده تغییر دمای مناطق شهری در مقایسه با مناطق پیرامون آن را توصیف می‌کند. اثرات UHI شامل: افزایش مصرف انرژی و آب، افزایش آلودگی هوا و تداخل در آسایش حرارتی می‌باشد. جزیره حرارتی سطوح شهری (SUHI) در برگیرنده الگوهای دمای سطح زمین (LST) در مناطق شهری است که با UHI در لایه تاج پوشش شهری و لایه مرز شهری (UBL) در ارتباط است و با سنجش از دور حرارتی قابل بررسی است. با توجه به اینکه SUHI دارای نوسانات روزانه و فصلی می‌باشد لذا نیاز به داده‌های چند زمانه در تحلیل SUHI، دور از انتظار نیست. در این تحقیق از داده‌های چند زمانه MODIS (آکوا و ترا)، به منظور تحلیل SUHI در شب و روز در کلانشهر تهران استفاده شد. خواص فیزیکی و بیوفیزیکی سطح زمین از قبیل کاربری اراضی، ارتفاع، آلبدو، شاخص پوشش گیاهی NDVI و شاخص سطوح نفوذناپذیر NDBI به منظور تفسیر تغییرات LST و SUHI استفاده شد. نتایج نشان داد که SUHI در تهران، دارای نوسانات مکانی و زمانی روزانه و فصلی است به طوری که در ایام گرم سال در طول روز جزیره سرمایایی سطوح شهری<sup>۲</sup> (SUCL) در سطح شهر تهران تشکیل می‌شود. در شب مقدار شاخص SUHI بین ۲ تا ۵ درجه سانتی‌گراد (حداکثر در بهار) متفاوت است. همچنین نتایج نشان داد که ویژگی‌های حرارتی متفاوت پوشش‌های زمین، آلبدو و ارتفاع مهمترین عوامل تغییرات روزانه

۱. نویسنده مسئول: تهران، خیابان انقلاب، خیابان وصال، کوچه آذین، دانشکده جغرافیایی دانشگاه تهران.

## SUHI تهران است در حالی که تغییرات فنولوژیکی پوشش گیاهی و آلودگی، مهمترین عوامل تغییرات فصلی SUHI تهران می باشد.

کلید واژگان: جزیره حرارتی سطوح شهری، جزیره سرمای شهری، محصولات مادیس، خواص بیوفیزیکی سطوح شهری.

### مقدمه

در یک شهر، دمای هوا، اغلب به اندازه ۳ تا ۴ درجه سانتی گراد بالاتر از سایر مناطق غیرشهری است (Camilloni and Barros, 1997). این درجه حرارت بالا توسط احتراق سوخت در کارخانه ها، حرارت و سیستم های حمل و نقل و انتشار گرمای اضافی در شب که در طول روز توسط سطوح شهری ذخیره شده است، تولید می شود (Rose and Devadas, 2009). این پیامد توسط آلودگی هوا که سبب کاهش تابش زمینی شبانه می شود، تشدید می یابد. رطوبت کم ناشی از نبود پوشش گیاهی و سطوح نفوذ ناپذیر، و شرایط آرام هوا، منجر به افزایش حرارت می شود (Oke, 1987). علاوه بر این هندسه شهری از طریق ساختمان های بلند و خیابان های کانیونی، می تواند از انتشار امواج بلند به اتمسفر جلوگیری کند (Kleerekoper, et al, 2012). این عوامل موجب می شود دمای سطح و هوای شهری، از مناطق پیرامون بالاتر باشد که به این پدیده جزیره حرارتی شهری<sup>۱</sup> (UHI) می گویند. اثرات نامطلوب جزیره حرارتی شهری شامل افزایش مصرف انرژی (Akbari 2005, 2012)، افزایش مصرف آب در ایام گرم سال (Guhathakurta & Gober, 2007)، افزایش ناراحتی های حرارتی (Almusaed, 2011) و افزایش آلودگی هوا (Rosenfeld et al, 1998) می باشد. شرایط اتمسفر راکد از موج گرما، آلاینده ها را در مناطق شهری محبوس نموده و وارد کردن تنش شدید زباله سمی به تنش خطرناک هوای گرم ایجاد شده، یک مشکل بهداشتی در ابعاد ناشناخته را به وجود می آورد. همچنین در شب یا در زمستان وجود هوای سرد در پشت بام ها باعث می شود که لایه هوای گرم تر زیر آن به همراه لایه گردوغبار ثابت بماند (Almusaed, 2011). با توجه به افزایش جمعیت و شهرنشینی، گرمایش جهانی و اهمیت بیشتر آب و انرژی، انتظار می رود UHI به یکی از بحران های زیست محیطی عمده در دهه های آینده تبدیل شود.

تجزیه و تحلیل UHI در یک محیط شهری در سه لایه مختلف و مجزا انجام می شود. این لایه های شهری، شامل لایه سطحی<sup>۲</sup>، لایه تاج پوشش<sup>۳</sup> و لایه مرزی شهری<sup>۴</sup> نام دارند که مرز لایه های و محل آنها در شکل (۱) معرفی شده اند. لایه سطحی شامل سطوح زمین که در تماس مستقیم با اتمسفر است. لایه تاج پوشش بخشی از فضای بین لایه سطحی و پشت بام های خانه های شهری است. لایه مرزی شهری منطقه اتمسفر بالای مناطق شهری است که توسط انتقال حرارت از لایه تاج پوشش تحت تأثیر قرار می گیرد. ویژگی ها و مکانیک جزایر حرارتی بین این سه لایه متفاوت است. با این حال، رفتار جزایر گرمایی وابسته به تعامل بین این لایه ها است

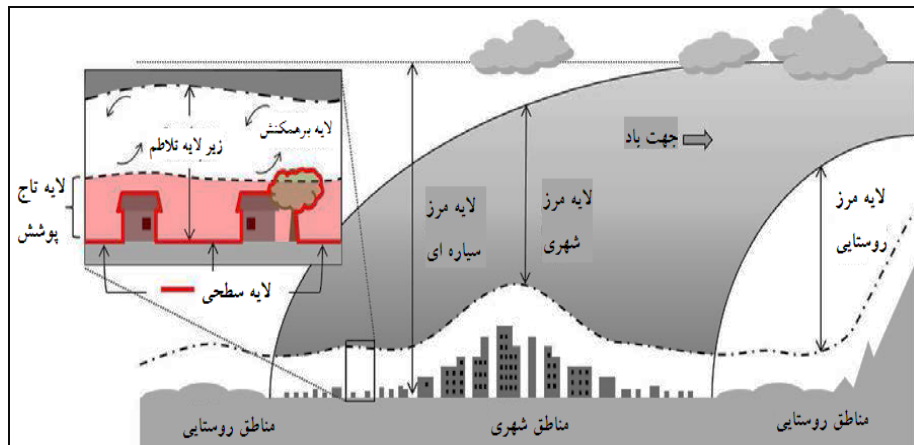
1 Urban Heat Island

۲ Surface layer

۳ Urban Canopy layer

3 Urban boundary layer

(Arnfield, 2003). شدت UHI در لایه تاج پوشش و لایه مرزی شهری بوسیله داده های ایستگاه های هواشناسی، رادیوسوندها و دماسنج های نصب شده بروی اجسام متحرک، اندازه گیری می شود.



شکل (۱). لایه های شهری، مرزهای لایه و محل آن ها. منبع (Black, 2013)

رایج ترین روش برای تجزیه و تحلیل دمای سطح، استفاده از تکنیک های سنجش از دور است. شدت تشعشع طیفی شناسایی شده در ناحیه مادون قرمز حرارتی از طیف الکترومغناطیس می تواند برای تخمین دمای سطح، با استفاده از اعمال قانون پلانک، بکار برده شود (Weng, 2004). اطلاعات سنجش از دور غالباً برای ارزیابی UHI سطح، که جزیره حرارتی سطوح شهری<sup>1</sup> (SUHI) نام دارد، استفاده می شود (Voogt and Oke, 2003; Weng, 2009). استفاده از داده های سنجش از دور حرارتی در قدرت تفکیک های فضایی-زمانی متفاوت و در انواع مناطق جغرافیایی به منظور بررسی اقلیم شهری به ویژه SUHI مستند شده است. بیشتر این مطالعات بر پایه یافتن رابطه بین دمای سطح زمین (LST) و شدت SUHI با کاربری/پوشش زمین (LULC)، فراوانی پوشش گیاهی، سطوح نفوذ ناپذیر و دیگر خواص فیزیکی و بیوفیزیکی سطح زمین در مناطق شهری استوار بوده است. (Zhou et al, 2014) رابطه بین پوشش زمین و جزیره حرارتی سطحی: تغییرات فصلی و اثر قدرت تفکیک های مکانی و موضوعی از داده های پوشش زمین بروی پیش بینی دمای سطح زمین را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که اثرات LULC بر پیش بینی LST در فصول مختلف متغیر است و سازگارترین پوشش برای پیش بینی LST پوشش گیاهی متراکم است. (Deng and Wu, 2013) اثر ترکیبات بیوفیزیکی بر جزیره حرارتی سطحی را با استفاده از رویکرد غیر مخلوط طیفی و مخلوط دمایی (SUTM) بررسی کردند. نتایج نشان داد که SUTM بهتر از همه مدل های رگرسیون، با پایین ترین ریشه میانگین مربعات خطا (K ۲,۸۹) و متوسط خطای مطلق (K ۲,۱۱) می باشد. (Connors et al, 2013) به منظور ارتباط بین پیکربندی چشم انداز و اثرات جزیره حرارتی شهری، ارتباط بین ویژگی های چشم انداز و دمای سطح زمین در فونیکس آریزونا را بررسی کردند. ضرایب همبستگی پیرسون روابط معنادار بین مقیاس های مختلف پیکربندی فضایی و LST را

<sup>1</sup> Surface Urban Heat Island

نشان داد، اما این روابط برای کاربری زمین متفاوت بود. ارتباط سهم رطوبت سطح زمین شهری (ULSM) در تسکین SUHI با استفاده از تصاویر لندست ۸ توسط (Zhang et al, 2015) بررسی شد. نتایج آنها نشان داد که LST با افزایش ارزش ULSM کاهش می‌یابد. مناطق بارزش بالا ULSM یک اثر کاهش آشکار در دمای مناطق اطراف خود تا شعاع ۱۵۰ متر دارند. مدل‌سازی جزایر حرارتی شهری و ارتباط آن‌ها با سطوح نفوذناپذیر با استفاده از تصاویر ASTER توسط (Weng, 2011) انجام شد که رابطه مثبت بین درصد سطوح نفوذناپذیر و افزایش دمای سطح زمین را نشان می‌دهد. (Lazzarini et al, 2013) فعل‌وانفعالات پوشش زمین-دما را بررسی کردند که نتایج آنها گویای وارونگی پدیده جزیره حرارتی سطحی شهر SUHI (مناطق مرکز شهر سردتر از حومه بود) در مناطق شهرهای بیابانی بود. (Sobrino et al, 2013) اثر جزیره حرارتی سطح شهر در شهر مادرید را با سنجش از دور حرارتی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که اثر SUHI بالاترین ارزش را در شب داشت اما در طول روز، این وضعیت معکوس شده و در شهر جزیره حرارتی منفی می‌شود. (Rasul et al, 2015) نیز تشکیل جزایر سرد شهری (UCI) در طول فصل خشک در اربیل، کردستان عراق، را مشاهده کردند که رطوبت سطح به عنوان عامل تعیین‌کننده اصلی در UCI معرفی شد.

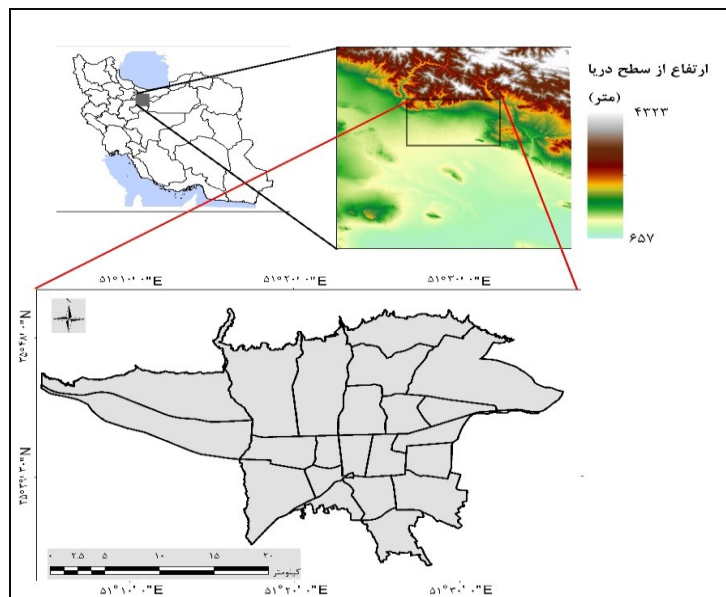
علاوه بر این شاخص‌های بسیاری نیز به منظور اندازه‌گیری شدت SUHI توسعه داده شده‌اند. رویکرد کلاسیک تجزیه و تحلیل شدت SUHI، تفاوت درجه حرارت مناطق شهری و روستایی است (Kottmeier et al, 2007). با این حال، تمایز بین مناطق "شهری" و "روستایی" متنوع و چالش برانگیز باقی مانده است (Stewart & Oke, 2009). در مدل مفهومی مناطق روستایی را به‌عنوان بخش‌هایی از یک منطقه شهرستان که توسط SUHI تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد، تعریف کرده است. در نتیجه تمایز بین مناطق شهری و روستایی نتیجه تجزیه و تحلیل SUHI است. با این حال، مطالعات سنجش از راه دور اغلب شامل تعاریف پیشینی از مناطق "شهری" در مقابل "روستایی" با توجه به پوشش زمین می‌باشد. علاوه بر شاخص SUHI شهری-روستایی، شاخص‌های دیگری نیز برای بررسی وضعیت SUHI طراحی شده است که می‌توان از شاخص تفاوت دمای مناطق شهری-کشاورزی (Jin et al, 2005)، شاخص مرکز شهر-پیرامون (Zhang et al, 2010)، شاخص شهری-غیر شهری (Tomlinson et al, 2012) و شاخص شهری-آب (Chen et al, 2006)، نام برد.

مطالعات قبلی که به بررسی جزیره حرارتی شهر تهران با تصاویر حرارتی پرداخته‌اند بر اساس بررسی رابطه دمای سطح زمین با LULC (شکیبا و همکاران، ۱۳۸۸؛ ملک پور و همکاران، ۱۳۸۹) با استفاده از تصاویر ETM+ و یا تحلیل فضایی-زمانی جزیره حرارتی با استفاده از سری زمانی تصاویر لندست و شاخص‌های جزیره حرارتی (صادقی نیا و همکاران، ۱۳۹۱) بوده‌اند. این مطالعات توانسته‌اند توزیع دمای سطح زمین، رابطه آن با LULC، شناسایی خوشه‌های داغ و تغییرات شاخص جزیره حرارتی در روز در شهر تهران را به خوبی نمایش دهند. با این حال SUHI دارای نوسانات روزانه است و شدت آن در شب و روز متفاوت است. بنابراین با داشتن یک تصویر حرارتی در شب و یا در روز نمی‌توان تفسیر خوبی از SUHI بدست آورد. بنابراین در این مقاله از محصولات سنجنده چند زمانه مادیس (ترا<sup>۱</sup> و آکوا<sup>۱</sup>) برای بررسی SUHI در شب و روز کلانشهر تهران استفاده شده است.

## روش تحقیق

## منطقه مورد مطالعه

آب‌وهوای تهران متأثر از کوهستان در شمال و دشت در جنوب است. غیر از شمال تهران که تحت تأثیر کوهستان، آب‌وهوای آن تا حدی معتدل و مرطوب است، آب‌وهوای بقیه شهر کلاً گرم و خشک و در زمستان‌ها اندکی سرد است. از نظر فصلی، هوای تهران در زمستان تحت تأثیر سیستم پرفشار شمالی (سیبری) قرار دارد. این تأثیر باعث شده است که در این فصل هوا در قسمت‌های مرکزی و جنوبی معتدل و در قسمت‌های شمالی شهر سرد باشد، به طوری که در این قسمت‌ها دمای هوا در زمستان بارها به زیر صفر می‌رسد. همچنین در این فصل به دلیل پدیده وارونگی هوا، میزان آلودگی جوی بالاست. در تابستان‌ها عامل مهم، سیستم کم‌فشار حرارتی کویر مرکزی است که سبب می‌شود هوا گرم و خشک باشد. شرایط اقلیمی ذکر شده به همراه تراکم بالای جمعیت و وسعت زیاد شهر تهران و همچنین تمرکز کارگاه‌ها و مناطق صنعتی در حاشیه شهر، شرایط را برای تولید جزیره حرارتی شهری و آلودگی هوای شهری به وجود آورده است. موقعیت محدوده مورد مطالعه به همراه کاربری/ پوشش اراضی (بروز شده نقشه کاربری اراضی تهران سال ۱۳۹۰) در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل (۲). محدوده مورد مطالعه (منبع: نگارندگان)

داده های مورد استفاده

MODIS<sup>۱</sup> یا اسپکترورادایومتر تصویربرداری با قدرت تفکیک مکانی متوسط، ابزاری است که بر روی ماهواره ترا (EOS AM)، راهاندازی شده در ماه دسامبر سال ۱۹۹۹ و ماهواره آکوا (EOS PM) راهاندازی شده در ماه مه ۲۰۰۲، نصب شده است. MODIS داده‌ها را با ۳۶ باند طیفی با عبور زمانی بالاتر از خط استوا در حدود ۱۰،۳۰ و ۲۲،۳۰ برای ماهواره ترا و ۱۳،۳۰ و ۰۱،۳۰ برای ماهواره آکوا جمع‌آوری می‌کند. MOD09GA، این محصول تخمینی از انعکاس طیفی سطح باندهای ۱ تا ۷ مادیس ترا، اصلاح‌شده برای شرایط جوی مانند گازها، ذرات معلق در هوا و پراکندگی ریلی را فراهم می‌کند. از لایه‌های بازتاب سطح MOD09GA به‌عنوان منبع داده برای بسیاری از محصولات زمین مادیس استفاده می‌شود. اعتبار سنجی در سطح ۳ برای تمام محصولات بازتابندگی سطح مادیس انجام‌شده است. MOD11\_A2 و MYD11\_A2، دمای سطح زمین (LST) و توان تشعشعی ۸ روزه در سطح ۳، تشکیل شده از محصول LST روزانه ۱ کیلومتر مادیس (MOD11A1 و MYD11A1) می‌باشد و بر روی یک شبکه سینوسی ۱ کیلومتر به عنوان مقدار متوسط LSTs در آسمان صاف در طول ۸ روز در طول روز و شب (۱۰:۳۰ و ۲۲:۳۰ برای مادیس ترا و ۱۳:۳۰ و ۰۱:۳۰ برای مادیس آکوا)، ذخیره شده است (Lazzarini et al, 2013). این داده از سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS) و در دوره زمانی آوریل ۲۰۱۳ تا آوریل ۲۰۱۴ (فروردین ۱۳۹۲ تا فروردین ۱۳۹۳) تهیه شده است. برای بررسی تغییرات شبانه روزی SUHI، از داده‌های MOD11\_A2 و MYD11\_A2 (LST ۸ روزه در تفکیک مکانی ۱ کیلومتر در روز و شب در ساعات (۱۰:۳۰، ۱۳:۳۰، ۱۶:۳۰، ۱۹:۳۰) در دوره زمانی آوریل ۲۰۱۳ تا آوریل ۲۰۱۴ (فروردین ۱۳۹۲ تا فروردین ۱۳۹۳) استفاده شد. برای بررسی شدت SUHI از شاخص تفاضل دمای مناطق شهری-روستایی پیشنهادی (Voogt and Oke, 2003) و از رابطه (۱) استفاده شد.

$$SHUI = LST_{urban} - LST_{rural} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در اینجا  $LST_{urban}$  و  $LST_{rural}$  به ترتیب میانگین دمای سطح زمین برای مناطق شهری، و مناطق روستایی (غیر شهری) می‌باشد. برای تمایز مناطق شهری و مناطق روستایی (غیر شهری) از لایه مرز شهر تهران (مناطق ۲۲ گانه تهران) به عنوان مناطق شهری و بقیه محدوده مورد مطالعه به عنوان مناطق غیر شهری (روستایی)، استفاده شد. چهار ویژگی بیوفیزیکی سطحی، به منظور تفسیر تغییرات LST و SUHI انتخاب شد. یکی از این متغیرها ارتفاع از سطح دریا می‌باشد. ویژگی بعدی آلبدو سطح زمین است که اثر افزایش آن در کاهش LST و SUHI مستند شده است و به‌عنوان یکی از راه‌های مقابله با SUHI شناخته‌شده است (Akbari and Matthews, 2012; Santamouris, 2014). چندین الگوریتم توسط (Liang et al, 2000) به منظور استخراج آلبدو در سنجنده‌های با پهنای باند وسیع با استفاده از ترکیب باندهای مختلف ارائه شده است. آلبدو برای تصاویر مادیس از رابطه (۲) بدست می‌آید.

<sup>1</sup> Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

$$\alpha_{short} = 0.160\alpha_1 + 0.291\alpha_2 + 0.243\alpha_3 + 0.116\alpha_4 + 0.112\alpha_5 + 0.081\alpha_7 - 0.0015 \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در اینجا  $\alpha_{short}$  آلبدوی طول موج کوتاه سنجنده مادیس و  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_7$  به ترتیب بازتاب سطح زمین در باندهای یک، دو، سه، چهار، پنج و هفت سنجنده مادیس می باشد. شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) که نشان دهنده فراوانی پوشش گیاهی در واحد پیکسل، و شاخص تفاضل نرمال شده ساخته شده (NDBI) که نشان دهنده میزان سطوح نفوذناپذیر در واحد پیکسل است و به طور معمول برای تفسیر LST و SUHI به کار می روند نیز در این تحقیق استفاده شده است. 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 (Laney et al, 1996) و از رابطه (۳) بدست می آید. NDBI نه تنها می تواند به عنوان شاخصی برای میزان فضای شهری و شدت توسعه استفاده شود، بلکه به عنوان شاخصی از سطوح نفوذناپذیر شهری که در آن تبادل حرارت محسوس صورت می گیرد نیز مورد استفاده بوده است (Li and Liu, 2008). این شاخص از رابطه (۴) بدست می آید.

$$NDVI = \frac{PNIR - PRED}{PNIR + PRED} \quad \text{رابطه (۳)}$$

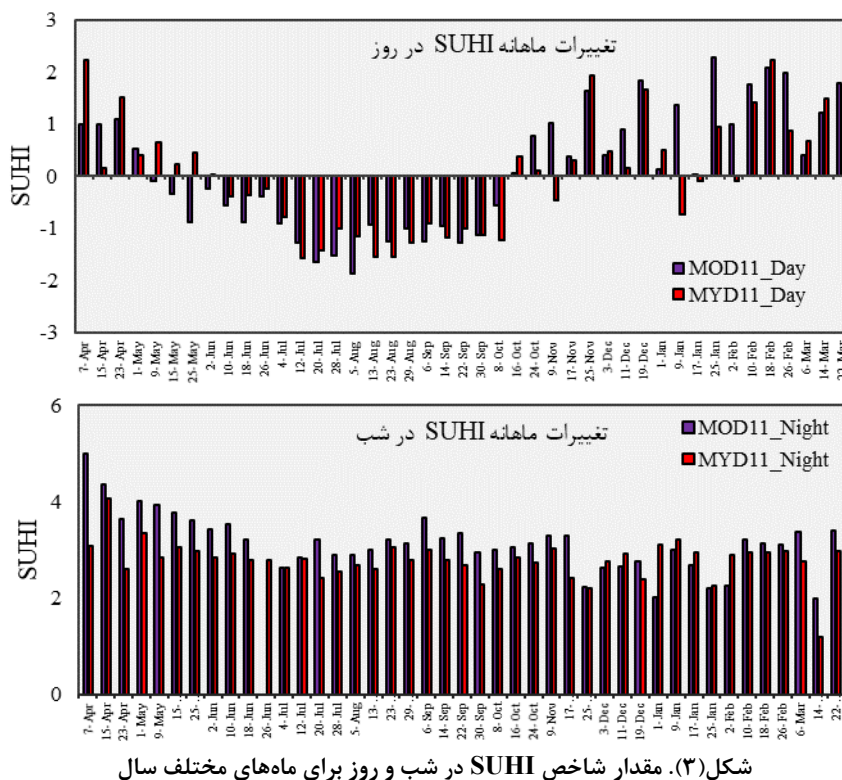
$$NDBI = \frac{PSWIR - PNIR}{PSWIR + PNIR} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در اینجا  $PNIR, PRED, PSWIR$  به ترتیب بازتاب طیفی در باند یک، باند دو و باند شش در سنجنده مادیس می باشد.

## نتایج

### تغییرات روزانه و ماهانه شدت جزیره حرارتی سطحی

با توجه به اینکه محاسبه شاخص های جزیره حرارتی شهری با استفاده از تصاویر حرارتی با تفکیک مکانی پایین مانند MODIS (یک کیلومتر)، با توجه به تفاوت مناطق شهری با روستایی و یا غیرشهری انجام می شود، تفاوت در رفتار پوشش های مختلف زمین در تعامل با نور خورشید رسیده به زمین (روزانه و ماهانه) موجب تغییراتی در مقدار شاخص های جزیره حرارتی شهری (روزانه و ماهانه) می شود. در این تحقیق از روش معمول محاسبه شاخص جزیره حرارتی، تفاوت دمای مناطق شهری با غیرشهری استفاده شد که نتایج این شاخص ها در ماه های مختلف سال در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل در روش شهری-غیر شهری در ماه های گرم سال، در روز شاهد جزیره حرارتی وارونه (جزیره سرمای شهری) هستیم. علت این پدیده اینست که بیشتر مساحت مناطق غیر شهری از خاک بایر است و در طول روز دمای سطح خاک به علت ظرفیت گرمایی پایین به سرعت بالا می رود. مناطق شهری به علت وجود مصالح با ظرفیت حرارتی بالا، در حال ذخیره کردن انرژی گرمایی خورشید می باشد و در این ساعت از روز (۱۰:۳۰ و ۱۳:۳۰) دمای مناطق ساخته شده از خاک بایر پایین تر است. در شب مقدار شاخص جزیره حرارتی بین ۲ تا ۵ درجه سانتی گراد متفاوت است که بیشترین مقدار مربوط به فصل بهار است. در هنگام شب دمای سطح خاک به سرعت کاهش می یابد این در حالی است که مناطق ساخته شده هنوز دمای خود را حفظ کرده و دمای بالاتری نسبت به خاک بایر دارد.

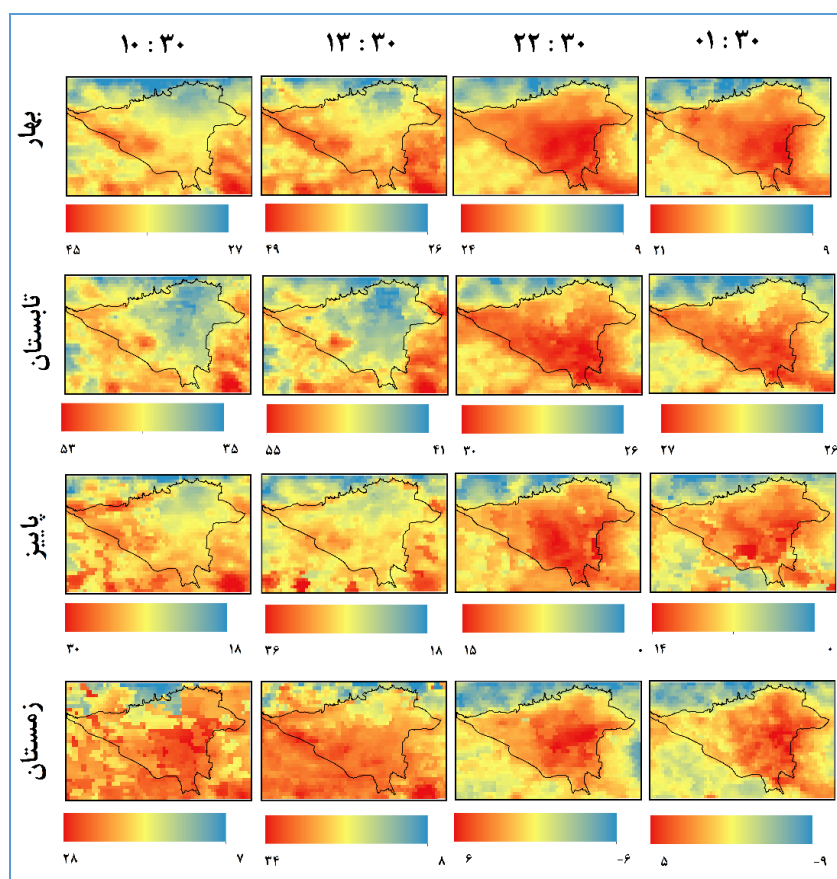


#### تغییرات مکانی روزانه دمای سطح زمین در فصول مختلف

داده‌های دمای سطح زمین (MOD11 و MYD11) برای هر فصل، میانگین‌گیری شد تا تغییرات مکانی روز و شب دمای سطح زمین در هر فصل مشخص شود. در فصل بهار، شکل (۴) در ساعت ۱۰:۳۰ دو جزیره گرمایی سطحی قابل مشاهده است، یکی در جنوب شرق تهران در کوه‌های مسگرآباد و دیگری در منطقه فرودگاه مهرآباد و مناطق صنعتی شرق که در ساعت ۱۳:۳۰ وسعت آنها افزایش می‌یابد. مناطق ذکر شده در ساعت ۱۳:۳۰ توسعه می‌یابند. در ساعت ۲۲:۳۰ حومه تهران و مناطق غیرشهری به سرعت دمای خود را از دست می‌دهند اما مناطق شهری به خصوص بخش مرکزی شهر هنوز دمای خود را از دست نداده به طوری که دو جزیره گرمایی سطحی در بخش مرکزی شهر قابل مشاهده است. در ساعت ۱:۳۰ شب از شدت تفاوت دمای سطح مناطق شهری و غیرشهری کاسته می‌شود ولی همچنان جزایر گرمایی سطحی در مرکز شهر قابل مشاهده هستند. در فصل تابستان در طول روز جزایر گرمایی سطحی در مناطق شهری (به جز در منطقه فرودگاه مهرآباد و مناطق صنعتی شرق تهران) مشاهده شد که این ناشی از گرم شدن سریع خاک است (در این فصل تقریباً بدون پوشش است) که موجب گرم شدن مناطق شرقی و جنوبی تهران نسبت به مناطق شهری در طول روز می‌شود. در شب مانند فصل بهار در این فصل نیز مناطق مرکزی شهر دمای سطح بالاتری دارند و جزایر گرمایی سطحی در مرکز شهر تشکیل می‌شود. در فصل پاییز از شدت تفاوت دما بین مناطق شهری و غیر شهری در شب و روز کاسته می‌شود. در فصل زمستان در مجموع مناطق شهری هم در روز و هم در شب



دمای سطح بالاتری نسبت به مناطق غیر شهری تجربه می کنند. این به علت افزایش رطوبت موجود در خاک در این فصل است. رطوبت خاک موجب بالا رفتن ظرفیت گرمایی خاک و همچنین افزایش تبخیر و کاهش دمای سطح خاک می شود.

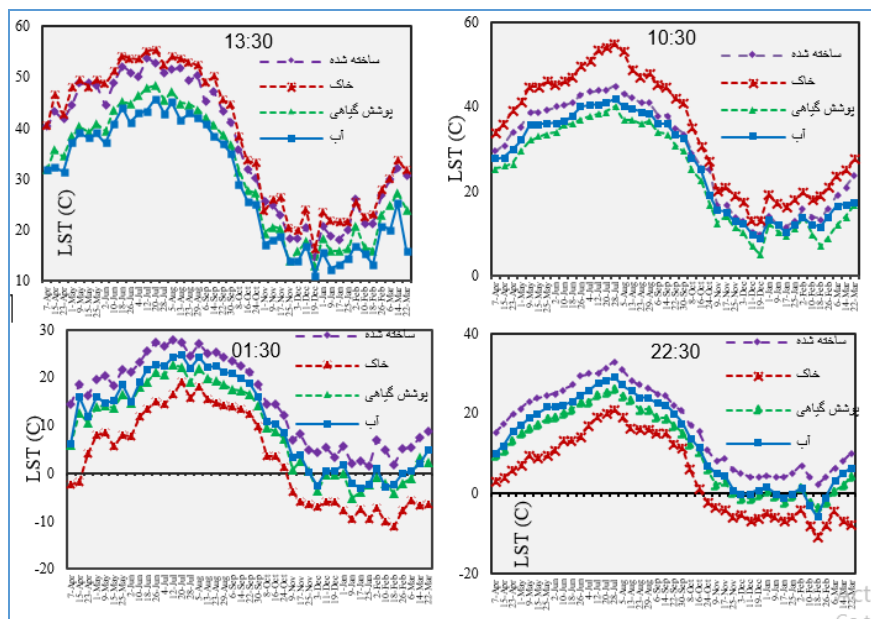


شکل (۴). توزیع مکانی LST در ساعات مختلف شبانه روز و در فصول مختلف

#### تغییرات LST در پوشش های مختلف زمین در شبانه روز

یکی از عوامل مؤثر در تغییرات مکانی روزانه دمای سطح زمین، تفاوت در واکنش پوشش های مختلف زمین در برابر نور خورشید رسیده به سطح می باشد. در شکل (۵) تغییرات دمای سطح زمین در پوشش های مختلف زمین در محدوده مورد مطالعه در ساعات مختلف شبانه روز و در ماه های مختلف سال را نشان می دهد. با توجه به شکل، در ساعت ۱۰:۳۰، دمای سطح خاک به علت ظرفیت گرمایی پایین به سرعت بالا می رود. این در حالی است که مناطق ساخته شده، آب و پوشش گیاهی دماهای بعدی را به ترتیب به خود اختصاص می دهند. در ساعت ۱۳:۳۰، دمای سطح خاک همچنان بالاست و دمای مناطق ساخته شده نیز در حدود دمای خاک بالا می رود. در این ساعت دمای پوشش گیاهی از آب بالاتر است. در هنگام شب دمای سطح خاک به سرعت کاهش می یابد و از بقیه پوشش ها سردتر می شود. این در حالی است که دمای مناطق ساخته شده هنوز دمای خود را

حفظ کرده و دمای بالاتری نسبت به آب و پوشش گیاهی دارد. پوشش آب نیز به علت ظرفیت حرارتی بالا و حفظ دمای ذخیره‌شده روز، در شب دمای بالاتری از پوشش گیاهی دارد. این تغییرات دمای سطح در پوشش‌های مختلف در ماه‌های مختلف سال متفاوت است به طوری که در ایام تابستان تفاوت دمای سطح بین پوشش‌های مختلف، بیشتر است.



شکل (۵). تغییرات روزانه و ماهانه دمای سطح انواع پوشش زمین

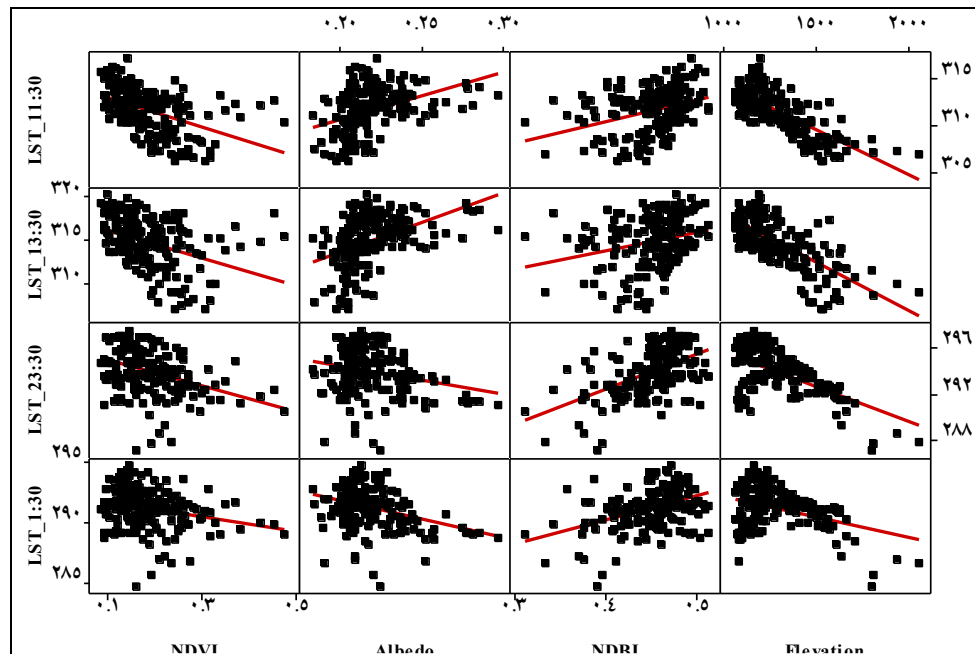
#### رابطه خصوصیات فیزیکی و بیوفیزیکی سطح زمین با LST

به منظور بررسی رابطه خصوصیات فیزیکی و بیوفیزیکی سطح زمین با تغییرات LST، ۲۰۰ نمونه تصادفی در تفکیک مکانی مشابه داده‌های حرارتی MODIS از سطح منطقه انتخاب شد. سپس داده‌های متناظر با این نمونه‌ها از هر یک از تصاویر LST در ساعات مختلف شب و روز و ویژگی‌های سطحی استخراج شد و ضریب همبستگی پیرسون از داده‌های دمای سطح با سایر ویژگی‌های سطح در ماه‌های مختلف محاسبه شد و نتایج آن در جدول (۱) خلاصه شد. با توجه به جدول، دمای سطح زمین در روز بیشترین همبستگی را با ارتفاع دارد و در شب دمای سطح زمین تحت تأثیر سطوح نفوذناپذیر و آلبدو قرار دارد. با افزایش ارتفاع دمای سطح زمین در روز و شب و در همه فصل‌ها کاهش می‌یابد این همبستگی در شب کمتر از روز است. مکان‌هایی که آلبدوی بالایی دارند در شب دمای سطح پایین‌تری دارند که این نشان‌دهنده این است که هرچقدر آلبدوی جسمی بالا باشد جذب و ذخیره سازی نور خورشید کمتر صورت می‌گیرد و در شب به سرعت دمای آن جسم کاهش می‌یابد.

جدول (۱). ضریب همبستگی پیرسون بین داده‌های LST در ساعات مختلف روز و شب و فصل‌های سال با خصوصیات فیزیکی و بیوفیزیکی سطح زمین.

ارتفاع	NDBI	آلبدو	NDVI	LST	
-۰/۷۴۶	۰/۳۳۹	۰/۴۱۲	-۰/۴۶۸	۱۱:۰۰	بهار
-۰/۷۱۱	۰/۳۵۵	۰/۴۵۱	-۰/۳۹۱	۱۳:۰۰	
-۰/۵۵۴	۰/۵۴۰	-۰/۲۳۲	-۰/۳۸۶	۲۳:۰۰	
-۰/۳۷۵	-۰/۴۲۳	-۰/۳۴۷	-۰/۳۶۸	۱:۰۰	
-۰/۴۹۳	۰/۰۶۲	۰/۵۷۷	-۰/۳۱۱	۱۱:۰۰	تابستان
-۰/۴۵۸	۰/۰۳۶	۰/۵۷۱	-۰/۳۰۷	۱۳:۰۰	
-۰/۶۶۴	۰/۴۵۶	-۰/۱۷۳	-۰/۳۴۵	۲۳:۰۰	
-۰/۴۵۰	۰/۵۰۰	-۰/۳۸۹	-۰/۳۹۷	۱:۰۰	
-۰/۵۴۷	۰/۱۴۷	۰/۴۹۰	-۰/۱۶۶	۱۱:۰۰	پاییز
-۰/۵۰۶	۰/۱۹۵	۰/۴۵۴	-۰/۲۷۳	۱۳:۰۰	
-۰/۳۹۰	۰/۴۰۵	-۰/۵۴۷	-۰/۱۸۹	۲۳:۰۰	
-۰/۲۱۹	۰/۳۴۷	-۰/۵۶۵	-۰/۱۷۰	۱:۰۰	
-۰/۵۶۱	۰/۲۹۰	-۰/۳۵۰	۰/۰۸۹	۱۱:۰۰	زمستان
-۰/۸۷۰	۰/۳۴۴	-۰/۱۷۱	۰/۲۶۲	۱۳:۰۰	
-۰/۳۸۸	۰/۵۰۱	-۰/۷۸۱	-۰/۰۸۸	۲۳:۰۰	
-۰/۱۱۶	۰/۳۵۹	-۰/۶۶۷	-۰/۱۵۶	۱:۰۰	

اما همبستگی مثبتی که آلبدو با دمای سطح در روز دارد به علت وجود خاک در نمونه‌های تصادفی است. خاک بایر معمولاً دارای آلبدوی بالایی است ولی با توجه به اینکه ظرفیت گرمایی پایینی دارد به سرعت گرم شده و دمای سطح آن بالا می‌رود به این ترتیب خاک در روز هم آلبدوی بالایی دارد و هم دمای سطح بالا. همبستگی مثبت بالا بین شاخص NDBI و دمای سطح زمین در ادبیات تحقیق مستند شده است. در این تحقیق این رابطه وجود دارد اما چون تحت تأثیر ارتفاع قرار دارد این رابطه کمتر از مطالعات قبلی، بدست آمد. رابطه بین پوشش گیاهی و دمای سطح زمین نیز همبستگی منفی پایینی را نشان می‌دهد که علت آن وسعت کم فضای سبز داخل شهر است که تحت تأثیر تراکم بالای مناطق ساخته شده، اثر پوشش گیاهی در کاهش دمای سطح و جزیره گرمایی کم‌رنگ شده است. شکل (۶) نمودار پراکندگی ماتریسی از داده‌های LST در ساعات ۱۱:۳۰، ۱۳:۳۰، ۲۲:۳۰ و ۱:۳۰ با خصوصیات سطح زمین ترسیم شده است. تغییرات رابطه LST با خصوصیات سطح در ساعات مختلف روز و شب از روی شکل (۶) قابل مشاهده است.



شکل (۶). نمودار پراکندگی ماتریسی از داده‌های LST در ساعات ۱۱:۳۰، ۱۳:۳۰، ۲۲:۳۰ و ۱:۳۰ با خصوصیات سطح زمین

### نتیجه گیری

در این تحقیق سعی بر آن بود که با استفاده از داده‌های چندزمانه مادیس تغییرات روزانه جزیره حرارتی سطوح شهری (SUHI) بررسی شده و رابطه آن با خصوصیات فیزیکی و بیوفیزیکی سطح زمین مشخص شود. نتایج نشان داد که با توجه به تغییرات و تنوع فنولوژیکی در پوشش گیاهی شهر تهران و همچنین تعامل متفاوت پوشش‌های زمین با نور خورشید ورودی در شبانه‌روز و ماه‌های مختلف سال و دیگر خصوصیات تأثیرگذار سطحی (آلبدو، ارتفاع، سطوح نفوذناپذیر و کاربری/زمین) SUHI در ماه‌های مختلف از لحاظ مکانی و شدت، دارای نوسان است. همچنین نتایج این تحقیق از بررسی SUHI نشان داد که علاوه بر تغییرات مقدار شاخص جزیره حرارتی در شبانه‌روز و ماه‌های مختلف سال، از لحاظ مکانی نیز این پدیده تغییرات روزانه و ماهانه دارد. تغییرات روزانه ناشی از خصوصیات حرارتی پوشش‌های مختلف زمین است با طلوع خورشید پوشش خاک با توجه به ظرفیت حرارتی پایین به سرعت گرم می‌شود و دمای آن از سایر پوشش‌ها بالاتر می‌رود. در اواسط روز دمای مناطق ساخته‌شده نیز بالاتر رفته و به نزدیکی دمای خاک می‌رسد. با غروب خورشید پوشش خاک گرمای خود را به سرعت از دست داده و دمای آن از سایر پوشش‌ها کمتر می‌شود. این در حالی است که مناطق ساخته‌شده با توجه به ظرفیت حرارتی بالا، گرمای ذخیره‌شده در طول روز را به آرامی به اتمسفر تابش می‌کنند و تا اواسط شب دمای سطح بالایی دارند. پوشش گیاهی و آب نیز ظرفیت حرارتی بالایی دارند اما با توجه به تبخیر و تعرقی که دارند در روز و شب دمای سطح متوسطی دارند. استفاده از داده‌های حرارتی MODIS با تفکیک زمانی بالا (۴ بار در شبانه‌روز) امکان بررسی تغییرات روزانه دمای سطح و جزیره حرارتی را فراهم می‌کند. در تغییرات سالانه جزیره حرارتی نتایج نشان داد که رابطه متفاوت بین متغیرهای سطحی و LST

موجب تغییرات مقداری و مکانی ماهانه جزیره حرارتی می‌شود به طوری که در فصل تابستان در طول روز جزیره حرارتی منفی (جزیره سرد شهری) مشاهده شد. در بین خصوصیات فیزیکی و بیوفیزیکی سطح زمین، ارتفاع از سطح دریا در طول روز و سطوح نفوذناپذیر در شب، کنترل توزیع دمای سطح را بر عهده‌دارند. همچنین در مکان‌هایی که در طول روز آلودگی سطح بالایی دارند در شب دمای آن‌ها کمتر از سایر مناطق است. در مقایسه با تحقیقاتی که دیگر پژوهشگران بروی ارزیابی جزیره حرارتی شهر تهران با استفاده از سنجش از دور حرارتی انجام داده‌اند، تحقیق حاضر به دلیل بررسی تغییرات فصلی و تفاوت‌های جزیره حرارتی در شب و روز، نتایج جامع‌تری را ارائه می‌دهد. به عنوان مثال صادقی نیا و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از تصاویر چند زمانه TM تغییرات جزیره حرارتی بین سالهای ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۰ را بررسی کردند. تصاویر مربوط به ماه‌های ژوئن تا آگوست برای سالهای مورد نظر متغیر بودند. هر چند که آنها با استفاده از نرمال سازی دمای سطح زمین و طبقه بندی حرارتی تغییرات مساحت طبقات دمایی را توانستند بررسی کنند با این حال این تصاویر مربوط به ساعت ۱۰ صبح بودند که در این ساعت دمای سطح خاک بالاتر از سایر پوشش‌ها است و توزیع مناسبی از جزیره حرارتی را نمی‌تواند ارائه دهد. همچنین در شهرهای نیمه خشک و خشک، جزیره حرارتی در شب قابل اندازه گیری است. علاوه بر این جزیره حرارتی دارای تغییرات فصلی نیز می‌باشد که باید بررسی شود. شکبیا و همکاران (۱۳۸۸) رابطه دمای سطح زمین را با کاربری/پوشش زمین در تهران بررسی کردند که نتایج آنها همانند نتایج این تحقیق همبستگی مثبت دمای سطح با سطوح نفوذناپذیر و همبستگی منفی دمای سطح با پوشش گیاهی را معرفی می‌نمایند. با این حال نتایج این تحقیق نشان داد که همبستگی دمای سطح زمین با کاربری/پوشش زمین دارای تغییرات فصلی و شبانه روزی است که باید در مطالعات جزیره حرارتی در نظر گرفته شود. در تحقیقات مشابهی که بروی جزیره حرارتی در مناطق خشک و نیمه خشک انجام شده است (Lazzarini et al, 2013; Rasul et al, 2015) حاکی از آن است که جزیره حرارتی سطحی در این مناطق در روز روند معکوسی را نمایش می‌دهد به این معنی که مناطق اطراف شهر در روز دمای سطح بالاتری از مناطق مرکزی شهر دارند و به نوعی در طول روز در این مناطق جزیره سرمای سطحی شهری (SUCI) ایجاد می‌شود که علت آن وجود خاک بایری است که در اطراف شهر وجود دارد و در طول روز به سرعت گرم می‌شود. در دهه‌های اخیر تکنیک‌های زیادی برای مقابله با اثر جزیره حرارتی شهری توسعه یافته است که هدف آن‌ها به تعادل رساندن بودجه حرارتی شهرها توسط افزایش تلفات حرارتی و کاهش جذب و ماندگاری حرارت می‌باشد. از جمله مهم‌ترین این استراتژی‌ها افزایش فضای سبز شهری و استفاده از بام‌های سبز و افزایش آلودگی و استفاده از کف‌سازی‌های سرد است. افزایش فضای سبز شهری و استفاده از بام‌های سبز علاوه بر کاهش اثر جزیره حرارتی، می‌تواند آسایش حرارتی را بهبود دهد، آلودگی هوا را کاهش دهد و در نهایت موجب بهبود کیفیت زندگی شهرنشینان شود؛ اما در شهرهای در حال توسعه با تراکم بالای ساختمانی، فضای خالی برای ایجاد فضای سبز نایاب و پرهزینه است همچنین هزینه نصب بام سبز می‌تواند دو برابر سقف‌های معمولی باشد و جرم اضافی بستر خاک و آب ذخیره شده در آن می‌تواند فشار زیادی به بدنه ساختمان وارد کند و هزینه‌های مقاوم‌سازی ساختمان نیز به هزینه‌های نصب بام سبز اضافه می‌شود. یکی از راه‌های کاهش جزیره حرارتی و مصرف انرژی استفاده از مواد با بازتاب بالا در پیاده‌روها، دیوارها و پشت‌بام‌های ساختمان‌ها است که عملی به

نظر می‌رسد. با توجه به اینکه در بیشتر مناطق شهری پیاده‌روها و پشت‌بام‌ها حدود ۶۰ درصد از مساحت شهری را به خود اختصاص می‌دهند، (سقف ۲۰ تا ۲۵ درصد و پیاده‌رو ۴۰ درصد) افزایش آلودگی در حدود ۰/۲۵ و ۰/۱۰ به ترتیب، منجر به افزایش آلودگی خالص در مناطق شهری در حدود ۰/۱ می‌شود. افزایش آلودگی در حدود ۰/۰۵ تا ۰/۱ منجر به کاهش دما در حدود ۱ تا ۲ درجه کلوین در حدود ۲۰ سال می‌شود (Akbari et al, 2008).

به علت پیچیدگی بالای عوارض شهری در پردازش‌های مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای، طیف یک پیکسل به‌خصوص برای تصاویر با تفکیک مکانی متوسط و پایین، ممکن است ترکیبی از چند نوع کاربری/پوشش زمین باشد. بنابراین استخراج زیر پیکسل توان تشعشعی و دمای سطح زمین می‌تواند دقت مطالعات درباره جزیره حرارتی شهری را بالا ببرد. بنابراین در پژوهش‌های آتی سعی بر آن خواهد بود که خصوصیات فیزیکی و بیوفیزیکی سطوح شهری از جمله: آلودگی، ظرفیت گرمایی، هدایت گرمایی، رطوبت خاک، پوشش گیاهی، توان تشعشعی و پوشش‌های مختلف شهری به‌صورت زیر پیکسل با استفاده از عضوهای پایانی چندگانه تخمین زده شود. با توجه به در دسترس بودن داده‌های LST شبانه سنجنده MODIS و استخراج LST روزانه از تصاویر لندست، ترکیب این تصاویر برای بدست آوردن اینرسی حرارتی ظاهری در تفکیک مکانی بالا، برای بدست آوردن توان تشعشعی مواد شهری و همچنین بررسی تعادل انرژی سطحی در مناطق شهری به نظر جالب می‌رسد.

### منابع

- شکیبا، علیرضا؛ ضیائیان فیروز آبادی، پرویز؛ عاشورلو، داوود و سودابه نامداری. (۱۳۸۸). تحلیل رابطه کاربری و پوشش اراضی و جزایر حرارتی شهر تهران با استفاده از داده‌های ETM + GIS. نشریه سنجش از دور و ایران، ۱۱(۱): ۳۹-۵۶.
- صادقی نیا، علیرضا؛ علیجانی، بهلول و ضیائیان فیروزآبادی، پرویز. (۱۳۹۲). تحلیل فضایی- زمانی جزیره حرارتی کلان‌شهر تهران با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۴): ۱-۱۷.
- ملک پور، پیمان. طالعی، محمد. رضایی، یوسف. خوش گفتار، مهدی. (۱۳۸۹). بررسی درجه حرارت سطح زمین و ارتباط آن با کلاس‌های پوشش- کاربری زمین شهری با استفاده از داده‌ی سنجنده ETM+، مطالعه موردی شهر تهران. همایش ملی ژئوماتیک ۸۹ - اردیبهشت ۱۳۸۹.
- Akbari, H. (2005). **Energy Saving Potentials and Air Quality Benefits of Urban Heat Island Mitigation**. Lawrence Berkeley. National Laboratory. 2005 Aug 23.
- Akbari, H., & Matthews, H. D. (2012). **Global cooling updates: Reflective roofs and pavements**. Energy and Buildings, 55, 2-6.
- Akbari, H., Menon, S., & Rosenfeld, A. (2008). **Global cooling: effect of urban albedo on global temperature**. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Almusaed, A. (2011). **The Urban Heat Island Phenomenon upon Urban Components. In Biophilic and Bioclimatic Architecture** (pp. 139-150). Springer London

- Arnfield, A. J. (2003). **Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island.** International journal of climatology, **23(1)**, 1-26
- Black, A. L. (2013). **Temperature Trends and Urban Heat Island Intensity Mapping of the Las Vegas Valley.**
- Camilloni, I., & Barros, V. (1997). **On the urban heat island effect dependence on temperature trends.** Climatic Change, **37(4)**, 665-681.
- Connors, J. P., Galletti, C. S., & Chow, W. T. (2013). **Landscape configuration and urban heat island effects: assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona.** Landscape ecology, **28(2)**, 271-283.
- Deng, C., & Wu, C. (2013). **Examining the impacts of urban biophysical compositions on surface urban heat island: A spectral unmixing and thermal mixing approach.** Remote Sensing of Environment, **131**, 262-274.
- Guhathakurta, S. & Gober, P. (2007). **The Impact of the Phoenix Urban Heat Island on Residential Water Use.** Journal of the American Planning Association, **73**, 317-329.
- Jin, M., Dickinson, R. E., & Zhang, D. A. (2005). **The footprint of urban areas on global climate as characterized by MODIS.** Journal of Climate, **18(10)**, 1551-1565.
- Kleerekoper, L., van Esch, M., & Salcedo, T. B. (2012). **How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect.** Resources, Conservation and Recycling, **64**, 30-38.
- Kottmeier, C., Biegert, C., & Corsmeier, U. (2007). **Effects of urban land use on surface temperature in Berlin: Case study.** Journal of urban planning and development, **133(2)**, 128-137.
- Lazzarini, M., Marpu, P. R., & Ghedira, H. (2013). **Temperature-land cover interactions: the inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas.** Remote Sensing of Environment, **130**, 136-152.
- 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.
- Li, H., & Liu, Q. (2008, December). **Comparison of NDBI and NDVI as indicators of surface urban heat island effect in MODIS imagery.** In International Conference on Earth Observation Data Processing and Analysis (pp. 728503-728503). International Society for Optics and Photonics.
- Liang, S. (2001). **Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms.** Remote Sensing of Environment, **76(2)**, 213-238.
- Lowry, W. P. (1977). **Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis.** Journal of Applied Meteorology, **16(2)**, 129-135.
- Oke, T.R., 1987. **Boundary Layer Climates.** Methen, London, second ed. 435pp.
- Rasul, A., Balzter, H., & Smith, C. (2015). **Spatial variation of the daytime surface urban cool island during the dry season in Erbil, Iraqi Kurdistan, from Landsat 8.** Urban Climate, **14**, 176-186.
- Rose, A. L., & Devadas, M. D. (2009, June). **Analysis of land surface temperature and land use/land cover types using remote sensing imagery a case in Chennai city, India.** In The seventh International Conference on Urban Climate (Vol. 29).

Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Romm, J. J., & Pomerantz, M. (1998). **Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction**. *Energy and Buildings*, **28**(1), 51-62.

Santamouris, M. (2014). **Cooling the cities—a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments**. *Solar Energy*, **103**, 682-703.

Sobrino, J. A., Oltra-Carrió, R., Sòria, G., Jiménez-Muñoz, J. C., Franch, B., Hidalgo, V., & Paganini, M. (2013). **Evaluation of the surface urban heat island effect in the city of Madrid by thermal remote sensing**. *International journal of remote sensing*, **34**(9-10), 3177-3192.

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2009). **A new classification system for urban climate sites**. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **90**(7), 922-923.

Tomlinson, C. J., Chapman, L., Thornes, J. E., & Baker, C. J. (2012). **Derivation of Birmingham's summer surface urban heat island from MODIS satellite images**. *International Journal of Climatology*, **32**(2), 214-224.

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., Rajasekar, U., & Hu, X. (2011). **Modeling urban heat islands and their relationship with impervious surface and vegetation abundance by using ASTER images**. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, **49**(10), 4080-4089.

Zhang, Y., Chen, L., Wang, Y., Chen, L., Yao, F., Wu, P. & Zhang, T. (2015). **Research on the Contribution of Urban Land Surface Moisture to the Alleviation Effect of Urban Land Surface Heat Based on Landsat 8 Data**. *Remote Sensing*, **7**(8), 10737-10762.

Zhou, W., Qian, Y., Li, X., Li, W., & Han, L. (2014). **Relationships between land cover and the surface urban heat island: seasonal variability and effects of spatial and thematic resolution of land cover data on predicting land surface temperatures**. *Landscape ecology*, **29**(1), 153-167.