



نسخه از دور

GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران / سال نهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۶
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol.9, No. 3, Autumn 2017

۳۳-۴۴



بهبود قدرت تفکیک مکانی باندهای حرارتی با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و سطوح غیرقابل نفوذ

داود اکبری^۱ و مینا مرادی‌زاده^{۲*}

۱. استادیار سنجش از دور، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل
۲. استادیار سنجش از دور، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۷/۲۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۱۴

چکیده

در چند سال اخیر، موضوع بهبود قدرت تفکیک مکانی تصاویر حرارتی سنجنده‌های فضایی در نواحی شهری به صورت یکی از چالش‌های جدید مطرح شده است. هدف این مقاله به کارگیری شاخص‌های سطوح غیرقابل نفوذ و شاخص‌های پوشش گیاهی برای بهبود قدرت تفکیک مکانی باند حرارتی سنجنده ETM+، مربوط به بخشی از شهر تهران، است. بدین ترتیب پس از پیش‌پردازش‌های اولیه، تصاویر به دست آمده با استفاده از فیلتر میانگین در قدرت تفکیک ۱۲۰، ۲۴۰، ۴۸۰ و ۹۶۰ متر شبیه‌سازی شده‌اند. سپس معادلات رگرسیون، به قصد تعیین روابط بین این تصاویر با درجه حرارت سطح، در قدرت تفکیک ۹۶۰ متر، استفاده شده‌اند. در ادامه به کمک روابط به دست آمده، که شامل شاخص‌های گیاهی و سطوح غیرقابل نفوذ می‌شوند، حرارت سطح در قدرت تفکیک‌های یادشده برآورد شد. در انتها، با استفاده از تصاویر حرارتی سنجنده ETM+ و سنجنده MODIS، دقت هریک از خروجی‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش دقت مکانی، مقدار خطاها نیز افزایش می‌یابد اما شیب تغییرات خطا ثابت نیست؛ به طوری که در تمامی شاخص‌ها، وقتی قدرت تفکیک از ۲۴۰ متر کمتر می‌شود، شیب تغییرات افزایش بیشتری نشان می‌دهد. به علاوه، ترکیب شاخص‌های سطوح غیرقابل نفوذ و پوشش گیاهی بهترین عملکرد را برای بهبود قدرت تفکیک مکانی تصاویر حرارتی شهر تهران دارد. با استفاده از ترکیب این شاخص‌ها، قدرت تفکیک مکانی سنجنده MODIS را می‌توان تا حدود ۲۴۰ متر افزایش داد؛ درحالی که مقدار خطای مطلق کمتر از ۱ درجه کلون است.

کلیدواژه‌ها: قدرت تفکیک مکانی، سطوح غیرقابل نفوذ، MAE، T-Sharp.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: استان اصفهان، شهرستان اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، گروه نقشه‌برداری. تلفن: ۰۹۱۳۳۰۶۳۹۹۴.

۱- مقدمه

موضوع قدرت تفکیک مکانی تصاویر حرارتی سنجنده‌های فضایی در نواحی شهری یکی از چالش‌های مطرح شده در دهه اخیر است. تغییرات زمانی و مکانی پدیده‌های شهری از یک سو و نبود تناسب میان قدرت تفکیک مکانی-زمانی تصاویر حرارتی با این تغییرات، از سوی دیگر، باعث شد تحقیقاتی پیرامون بهبود قدرت تفکیک مکانی تصاویر حرارتی انجام گیرد.

براساس اطلاعات جدول ۱، نیاز محققان به تصاویر حرارتی با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا، که متناسب با تغییرات پدیده‌های شهری باشد، با استفاده از سنجنده‌های کنونی فراهم نمی‌شود. برای نمونه، اگرچه تصاویر سنجنده MODIS^۱ تغییرات زمانی پدیده‌های شهری را به خوبی مدل‌سازی می‌کند؛ تصاویر حرارتی این سنجنده با تغییرات مکانی پدیده‌های شهری متناسب نیست.

جدول ۱. خصوصیت سنجنده‌های با قدرت تفکیک مکانی متفاوت

ماهواره	سنجنده	قدرت تفکیک مکانی (متر)		قدرت تفکیک زمانی
		باند انعکاسی	باند حرارتی	
Landsat5	TM	۳۰	۱۲۰	۱۶ روز
Landsat7	ETM+	۳۰	۶۰	۱۶ روز
Terra/Aqua	ASTER	۱۵-۳۰	۹	۱۶ روز
Terra/Aqua	MODIS	۲۵۰-۵۰۰	۱۰۰۰	۱-۲ روز

وجود هم‌زمان داده‌های حرارتی و طیفی روی سنجنده‌های موجود و همچنین، همبستگی این داده‌ها باعث شده در سال‌های اخیر، ایده بهبود قدرت تفکیک مکانی داده‌های حرارتی به کمک داده‌های انعکاسی، با استفاده از روابط آماری و ریاضی، مورد توجه قرار گیرد. در ادامه، به چند نمونه از این مطالعات اشاره می‌کنیم.

مطالعات کاستاس و نورمن^۲ (۲۰۰۳) اقدام مهمی برای بهبود قدرت تفکیک مکانی تصاویر حرارتی به‌شمار می‌آید. آنها با استخراج شاخص پوشش گیاهی از باندهای مرئی و فروسرخ نزدیک با قدرت تفکیک مکانی

بالتر از باندهای حرارتی، توانستند حرارت سطح را در قدرت تفکیک بالاتر برآورد کنند. آگام^۳ و کاستاس (۲۰۰۷)، برای برآورد حرارت سطح در قدرت تفکیک بالاتر، از شاخص کسر پوشش گیاهی و روش T-Sharp به جای شاخص پوشش گیاهی استفاده کردند. در سال ۲۰۰۹، استاتیپولو و کارتالیس^۴ به کمک داده‌های TM و NOAA و با استفاده از روش‌های بهبود قدرت تفکیک مکانی، حرارت سطح شهر آتن را تخمین. اساو و رباین^۵ (۲۰۱۲)، با استفاده از روش DisTrad و به کمک تصاویر پوشش گیاهی و شاخص سطوح غیرقابل نفوذ، به صورت جداگانه، در ناحیه شهری دوبلین حرارت سطح را تخمین زدند. افزون بر مطالعات یادشده، محققان در مناطق گوناگون تحقیقات متعددی به منظور بهبود قدرت تفکیک مکانی تصاویر با استفاده از روش‌های سری زمانی، زنجیره مارکوف و نیز داده‌های سنجنده‌های دیگر انجام داده‌اند که اهمیت موضوع را می‌رساند (Inamdar and French, 2008; Kallel and Otle, 2013; Liu and Pu, 2008; Merlin and Duchemin, 2010; Weng and Lu, 2004; Yuan and Bauer, 2007; Zhan and Chen, 2013; Moradzadeh and Saradjian, 2017)

اگرچه مطالعات بسیاری در این زمینه صورت گرفته؛ در بیشتر این روش‌ها، پس از بهبود قدرت تفکیک مکانی باندهای حرارتی، دقت افت زیادی داشته است. بنابراین، هدف این تحقیق بهبود قدرت تفکیک مکانی تصاویر حرارتی با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و سطوح غیرقابل نفوذ و ترکیبی از هر دو شاخص در نواحی شهری با دقت مطلوب است. به منظور ارزیابی دقت و اطمینان از عملکرد روش پیشنهادی در این مطالعه، از داده‌های سنجنده MODIS استفاده شده است؛ بدین ترتیب که، با استفاده از داده‌های باندهای حرارتی این سنجنده و روش پیشنهادی، قدرت تفکیک حرارت سطح بهبود می‌یابد و دقت آن بررسی می‌شود.

1. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer
2. Kustas and Norman
3. Agam
4. Stathopoulou and Cartalis
5. Essa and Verbeiren

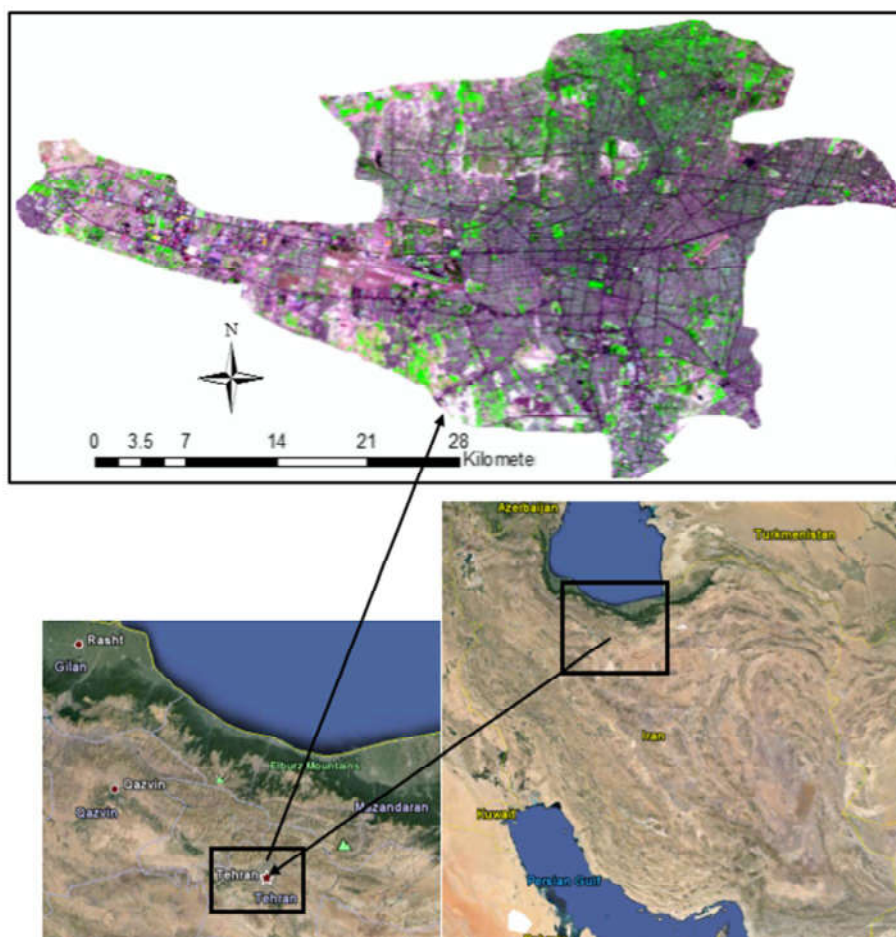
۲- منطقه مورد مطالعه

تهران، بزرگ‌ترین شهر ایران، با جمعیتی بالغ بر هشت میلیون نفر با مساحت تقریبی ۷۰۶ کیلومترمربع بزرگ‌ترین شهر خاورمیانه و دارای ترکیبی از انواع پوشش و کاربری زمینی است. از این‌رو، این شهر که در موقعیت جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۳ دقیقه طول شرقی در کوهپایه‌های جنوبی رشته‌کوه‌های البرز گسترده شده است، منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است (شکل ۱).

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق تصاویر ETM^۱ و MODIS اخذشده در تاریخ‌های ۱۶ آوریل ۲۰۰۱ (۲۷ فروردین ۱۳۸۰)، ۹ اوت ۲۰۰۱ (۱۸ مرداد ۱۳۸۰) و ۲۲ دسامبر ۲۰۰۲ (۲ دی ۱۳۸۱) است. ETM⁺ هفتمین ماهواره از سری ماهواره‌های Landsat است که قدرت تفکیک ۱۵، ۳۰ و ۶۰ متر در محدوده‌های طیفی گوناگون دارد.



شکل ۱. موقعیت منطقه جغرافیایی شهر تهران

ARVI^۱، MSAVI^۲، NDVI^۳، SLAVI^۴ و شاخص‌های سطوح غیرقابل نفوذ NDBI^۵ و UI^۶ با استفاده از روابط جدول ۲ محاسبه می‌شوند. در این تحقیق، به جای استفاده از تصویر حرارتی با دقت پایین، همچون تصویر حرارتی سنجنده مادیس، تصویر حرارتی سنجنده ETM+ با استفاده از فیلتر میانگین در قدرت تفکیک مکانی متفاوت، شامل ۱۲۰، ۲۴۰، ۳۶۰، ۴۸۰، ۷۲۰ و ۹۶۰ متر شبیه‌سازی شده است. این کار برای به حداقل رساندن تفاوت تصویر حرارتی بهبودیافته با تصویر حرارتی واقعی صورت گرفته است.

۳-۳- بهبود قدرت تفکیک مکانی باندهای حرارتی

پس از پیش‌پردازش‌های اولیه و آماده‌سازی تصاویر، به منظور بهبود قدرت تفکیک مکانی باندهای حرارتی، روش T-Sharp به کار می‌رود. این روش را آگام و کیوستاس مطرح کردند (۲۰۰۷). از آنجاکه این روش، در بسیاری از مطالعات پیشین، برای بهبود قدرت تفکیک مکانی تصاویر حرارتی به کار رفته است، اینجا مبنای نظری و مراحل انجام‌شدن این روش به طور خلاصه بیان می‌شود. این روش بر این فرض استوار است که در مناطق دارای پوشش گیاهی، برخلاف زمین‌های بایر و نواحی شهری، میزان انرژی گسیل‌شده از سطح کمتر است. دلیل آن عمل تعرق است و نشان می‌دهد که نوعی ارتباط منفی بین حرارت سطح و میزان پوشش گیاهی وجود دارد (Leblon, 2013). بدین ترتیب، با محاسبه رابطه میان حرارت سطح و شاخص پوشش گیاهی در قدرت تفکیک مکانی پایین، امکان بهبود قدرت تفکیک مکانی باندهای حرارتی، به کمک شاخص‌های پوشش گیاهی در قدرت تفکیک بالاتر، فراهم شده است (Moradizadeh and Saradjian, 2016). روابط (۳) تا (۷) در این روش به کار می‌روند.

1. Atmospherically Resistant Vegetation Index
2. Modified Soil Adjustment Vegetation Index
3. Normalized Difference Vegetation Index
4. Soil Leaf Adjusted Vegetation Index
5. Normalized Difference Build-up Index
6. Urban Index

سنجنده MODIS روی دو سکوی Aqua و Terra قرار دارد و داده‌ها را در ۳۶ باند، در محدوده طیفی ۰/۴ تا ۱۴/۴ میکرومتر، ذخیره می‌کند. این سنجنده شامل دو باند با قدرت تفکیک ۲۵۰ متر، ۵ باند ۵۰۰ متری و ۲۹ باند یک کیلومتری است و طی هر یک تا دو روز، از سطح زمین تصویربرداری می‌کند.

۳-۲- انجام دادن تصحیحات اولیه و آماده‌سازی داده‌ها

نخستین مرحله در به کارگیری تصاویر ماهواره‌ای تصحیحات اولیه و آماده‌سازی داده‌هاست. به همین منظور، ابتدا با استفاده از رابطه (۱)، مقادیر درجات خاکستری به تابش دریافت‌شده در سنجنده تبدیل می‌شوند.

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{max} - L_{min}}{255} \right) * DN + Bias \quad (1)$$

در این رابطه، L_{λ} تابش طیفی دریافت‌شده با سنجنده برحسب $w/m2Sr\mu m$ و اطلاعات L_m و L_{max} برابر با ماکزیمم و مینیمم رادیانس طیفی قابل تشخیص برحسب $w/m2Sr\mu m$ است که در فایل، همراه با داده‌های تصویر، عرضه می‌شود. Bias برابر با L_{min} است. سپس، با استفاده از رابطه (۲)، بازتابندگی طیفی برای هر باند جداگانه محاسبه شد.

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda}}{ESUN_{\lambda} * \cos\theta * d_r} \quad (2)$$

که در آن ρ_{λ} بازتابندگی طیفی نیمکره‌ای برای هر باند، $ESUN_{\lambda}$ میانگین تابش فرودی خورشید در بالای اتمسفر برای هر باند با واحد $w/m2Sr\mu m$ ، d_r معکوس مربع فاصله نسبی زمین تا خورشید و $\theta = 90 - \beta$ که β برابر با ارتفاع خورشید است. پس از آن، با توجه به وجود تک‌باند حرارتی، از روش سبال و رابطه پلانک برای برآورد گسیل‌مندی و حرارت سطح زمین استفاده شد (Bastiaanssen and Pelgrum, 1998; Roerink and Su, 2000). در ادامه، شاخص‌های پوشش گیاهی

جدول ۲. روابط محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی و سطوح غیرقابل نفوذ

نام شاخص	توضیحات	شیوه محاسبه شاخص‌ها
ARVI	شاخص پوشش گیاهی که سعی در کاهش اثر اتمسفر دارد.	$ARVI = (b4 - (b3 - (b1 - b3))) / (b4 + (b3 - (b1 - b3)))$
NDVI	شاخص پوشش گیاهی نرمال شده	$NDVI = (b4 - b3) / (b4 + b3)$
SAVI	شاخص پوشش گیاهی که سعی در کاهش اثر خاک پس‌زمینه دارد.	$SAVI(0.5) = (b4 - b3) \cdot (1 + 0.5) / (b4 + b3 + 0.5)$
MSAVI	شاخص اصلاح شده SAVI	$MSAVI = 0.5 \cdot (2 \cdot b4 + 1 - (2 \cdot b4 + 1)^2 - 8 \cdot (b4 - b3)^2)^{0.5}$
SLAVI	شاخص پوشش گیاهی ویژه سطح برگ	$SLAVI = b4 / (b3 + b7)$
NDBI	شاخص نرمال شده نواحی ساخته شده	$NDBI = (b5 - b4) / (b5 + b4)$
UI	شاخص نواحی ساخته شده	$UI = (b7 - b4) / (b7 + b4)$

شاخص‌های ARVI، MSAVI، NDVI، SLAVI و SAVI، NDBI، UI، ترکیبی از این شاخص‌ها و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) این شاخص‌ها، به‌منزله ورودی مدل، در نظر گرفته می‌شود و حرارت سطح برآورد می‌گردد. فرض اولیه این روش مشابهت بین ضرایب حرارت سطح با شاخص‌های یادشده در قدرت تفکیک مکانی پایین و بالاست. بنابراین، با در نظر گرفتن این فرض و با استفاده از رابطه (۱)، ضرایب بین شاخص‌های یادشده و حرارت سطح در قدرت تفکیک پایین محاسبه می‌شود. در این تحقیق، هریک از تصاویر شاخص‌های پوشش گیاهی، سطوح غیرقابل نفوذ، ترکیب شاخص‌های پوشش گیاهی و سطوح غیرقابل نفوذ و تحلیل مؤلفه اصلی به‌دست‌آمده از این شاخص‌ها، جداگانه، در قدرت تفکیک مکانی ۹۶۰ متر، به‌منزله ورودی، و حرارت سطح در قدرت تفکیک مکانی ۹۶۰ متر، به‌منزله خروجی مدل، در نظر گرفته می‌شود. پس از محاسبه ضریب همبستگی (در صورت بالا بودن ضریب همبستگی)، به‌کمک رابطه به‌دست‌آمده در قدرت تفکیک مکانی پایین و تصاویر ذکر شده، در قدرت تفکیک‌های ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۴۸۰ و ۷۲۰ متر حرارت سطح برآورد می‌شود. تمامی این مراحل به‌طور خلاصه در شکل ۲ نشان داده شده است. در نهایت، به‌منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی، قدرت تفکیک باندهای حرارتی سنجنده مادیس با این روش بهبود می‌یابد.

$$T_{low\ resolution} = a_0 \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$+ a_1 f_c \text{ low resolution}$$

$$\bar{T}_{high\ resolution} = a_0 \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$+ a_1 f_c \text{ high resolution}$$

$$\bar{T}_{low\ resolution} = a_0 \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$+ a_1 f_c \text{ low resolution}$$

$$\Delta \bar{T}_{low\ resolution} = T_{low\ resolution} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$- \bar{T}_{low\ resolution}$$

$$\bar{T}_{high\ resolution} = \bar{T}_{low\ resolution} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$- \Delta \bar{T}_{low\ resolution}$$

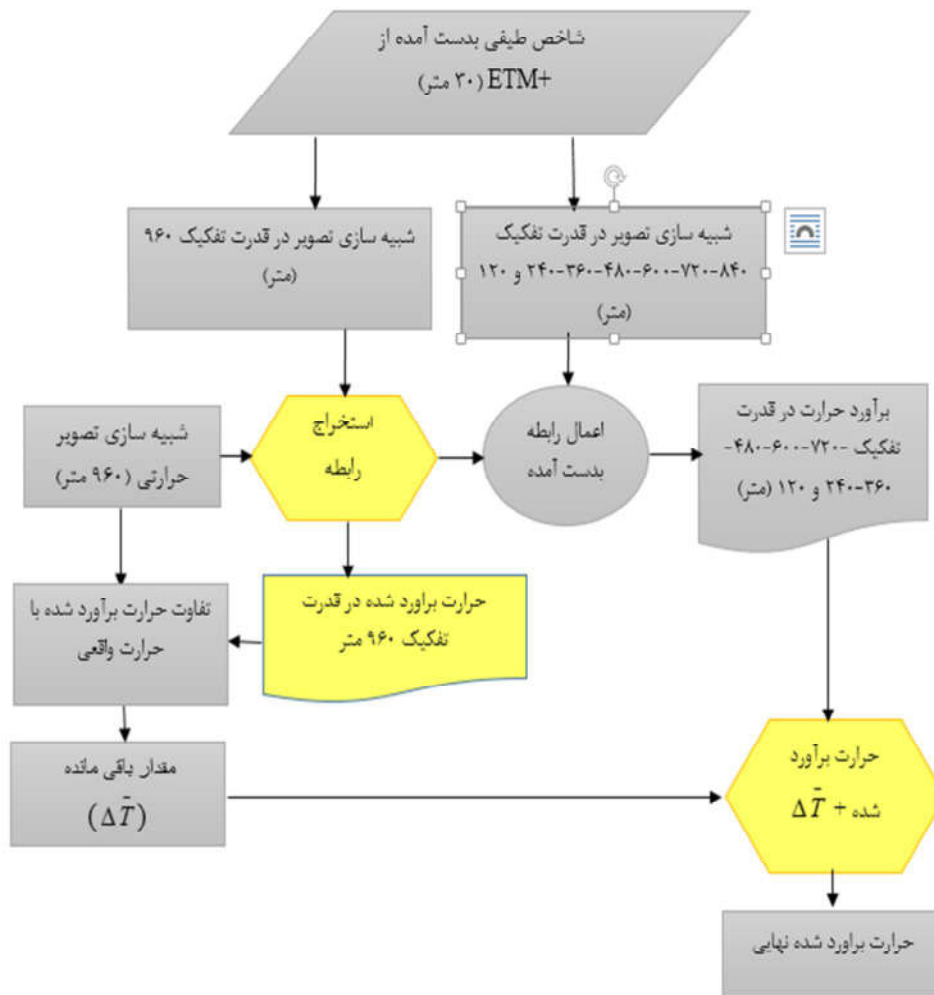
T درجه حرارت سطح اندازه‌گیری شده با ماهواره، \bar{T} درجه حرارت سطح تخمین زده شده، $\Delta \bar{T}$ تفاوت درجه حرارت سطح تخمین زده شده با درجه حرارت سطح اولیه، low resolution و high resolution، به ترتیب، قدرت تفکیک مکانی پایین و قدرت تفکیک مکانی بالا، a1 و a0، به ترتیب، ضریب و بایاس و f_c برابر با کسر پوشش گیاهی است که با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$f_c = 1 - \left(\frac{NDVI_{MAX} - NDVI}{NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN}} \right)^{0.625} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$NDVI = \left(\frac{NIR - R}{NIR + R} \right) \quad \text{رابطه (۹)}$$

در رابطه (۹)، مقادیر NIR برابر با باند فرسرخ و R برابر با باند قرمز است. در این تحقیق، افزون بر شاخص f_c

1. fractional vegetation



شکل ۲. روند نمای کلی تحقیق

۳-۴- ارزیابی

برای ارزیابی شاخص‌های مورد استفاده، از MAE^۱ استفاده شده است. MAE خطای متوسط است که میانگین خطای موجود را بیان می‌کند و با استفاده از رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

$$\text{رابطه (۱۰)} \quad MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |T - \bar{T}|$$

T حرارت سطح واقعی، \bar{T} حرارت سطح تخمین زده شده با مدل و N تعداد پیکسل است.

۳-۵- بحث و نتایج

ضرایب همبستگی بین حرارت سطح با شاخص‌های پوشش گیاهی و سطوح غیرقابل نفوذ در قدرت تفکیک

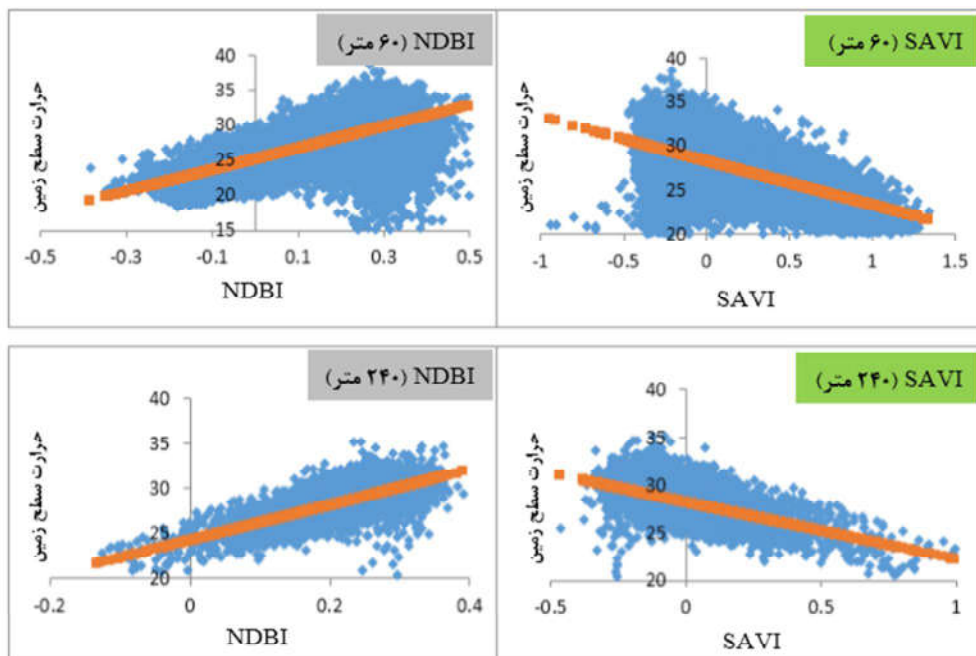
حدود یک کیلومتر در جدول ۳ نشان داده شده است. طبق این نتایج، بین حرارت سطح با سطوح غیرقابل نفوذ و پوشش گیاهی همبستگی نسبتاً بالایی وجود دارد. در این قدرت تفکیک، ضریب همبستگی شاخص‌های یادشده با حرارت سطح بین ۰/۶۳ تا ۰/۷۳ متغیر است. بالاترین ضریب همبستگی به رابطه حرارت سطح، با ترکیب شاخص‌های سطوح غیرقابل نفوذ و پوشش گیاهی، بازمی‌گردد. همچنین، نتایج حاصل از ضرایب این معادلات بیانگر وجود رابطه مثبت بین شاخص‌های سطوح غیرقابل نفوذ و حرارت سطح است

1. mean absolute error

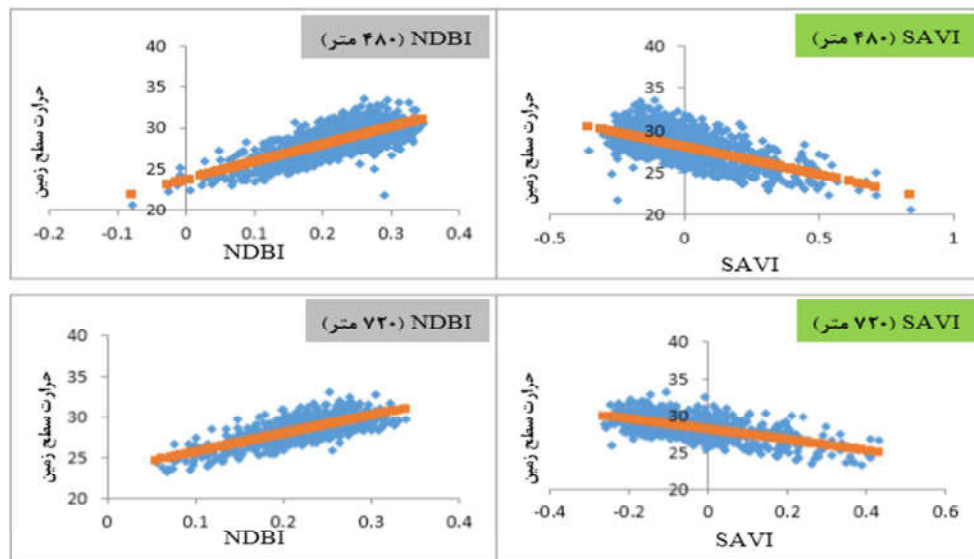
جدول ۳. ضرایب همبستگی و روابط به دست آمده بین حرارت سطح با شاخص های پوشش گیاهی و سطوح غیرقابل نفوذ

نام شاخص	ضریب همبستگی	معادله به دست آمده
ARVI	۰/۶۷	$-12.53 \times \text{ARVI} + 26.13$
NDVI	۰/۶۴	$-11.45 \times \text{NDVI} + 27.94$
SAVI	۰/۶۴	$-7.66 \times \text{SAVI} + 27.94$
MSAVI	۰/۶۶	$-7.66 \times \text{MSAVI} + 27.94$
SLAVI	۰/۶۳	$-10.66 \times \text{SLAVI} + 32.94$
NDBI	۰/۷۳	$23.67 \times \text{NDBI} + 23.06$
UI	۰/۷۲	$15.30 \times \text{UI} + 25.90$
ARVI, NDVI, NDBI, UI	۰/۷۵	$24.21 - 15.5 \times \text{ARVI} + 25.16 \times \text{NDVI} - 16.75 \times \text{NDBI} + 37.78 \times \text{UI}$
PCA1,2,3	۰/۷۴	$25.22 - 16.28 \times \text{PCA1} + 15.49 \times \text{PCA2} + 28 \times \text{PCA3}$

که در نمودارهای شکل ۳ مشاهده می شود. تراکم بالای سطوح غیرقابل نفوذ در ناحیه شهری، ناممکن بودن نفوذ حرارت به لایه های زیرین و جذب بیشینه انرژی از سوی این سطوح می توانند دلایل اصلی افزایش حرارت سطح در این سطوح باشند. همچنین، ضرایب معادلات نمودارهای شکل ۳ نشان دهنده رابطه منفی بین شاخص های پوشش گیاهی و حرارت سطح است. ویژگی خاص اراضی پوشیده از گیاهان سبز می تواند دلیلی برای این رابطه منفی باشد. در این گونه نواحی، به دلیل عمل تعرق و فتوسنتز و کاهش میزان بازتابش، مقدار انرژی رسیده به واحد سطح کاهش می یابد؛ بنابراین، ارتباط معکوسی بین حرارت سطح و میزان تراکم پوشش گیاهی وجود دارد.



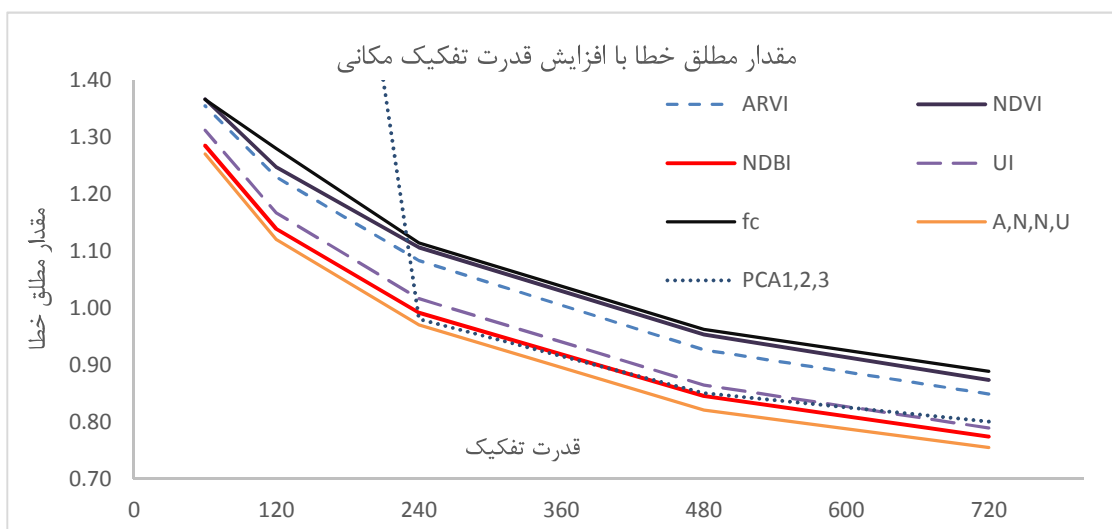
شکل ۳. نمودار همبستگی حرارت سطح با شاخص های NDBI و SAVI در قدرت تفکیک های متفاوت



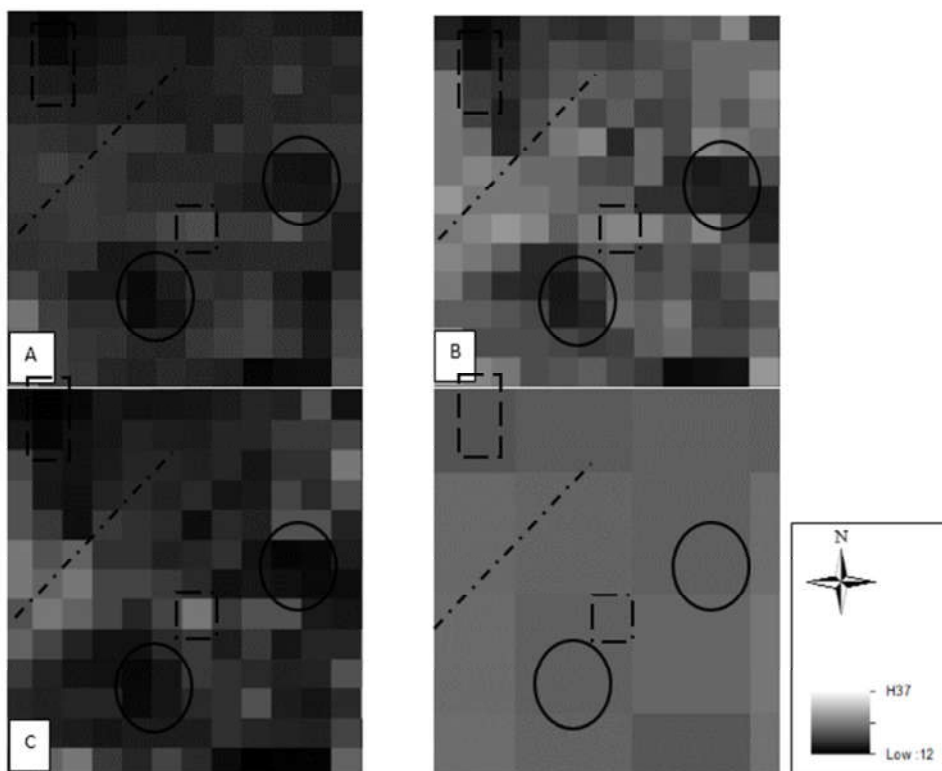
ادامه شکل ۳. نمودار همبستگی حرارت سطح با شاخص‌های NDBI و SAVI در قدرت تفکیک‌های متفاوت

استفاده، در قدرت تفکیک ۶۰ متر و حدود ۱ کیلومتر، کاملاً فرق می‌کند. به همین دلیل، مؤلفه‌های اصلی به دست‌آمده در قدرت تفکیک ۶۰ متر و ۱ کیلومتر و ارتباطشان با حرارت سطح نیز متفاوت از یکدیگر است. مطابق شکل ۴، با افزایش قدرت تفکیک مکانی، میانگین مقدار خطا افزایش می‌یابد ولی شیب افزایش خطا ثابت نیست. همچنین در تمامی شاخص‌ها، هرگاه قدرت تفکیک کمتر از ۲۴۰ متر شود، شیب افزایش خطا به شدت زیاد می‌شود. برای نمونه، مقدار خطا برای شاخص NDBI در قدرت تفکیک ۷۲۰، ۴۸۰، ۲۴۰ و ۶۰ متر، به ترتیب برابر با ۰/۶، ۰/۶۸، ۰/۸۳ و ۱/۱۹ درجه سانتی‌گراد می‌شود. به علاوه، در شکل ۵ تصویر حرارتی در قدرت تفکیک ۱ کیلومتر و ۲۴۰ متر و تصویر حرارتی برآوردشده با استفاده از شاخص‌های fc و NDBI، در قدرت تفکیک ۲۴۰ متر، برای مقایسه نشان داده شده است. این شکل تصاویر بارز شده را به خوبی نشان می‌دهد که در تصویر اولیه دیده نمی‌شوند.

در این تحقیق، با تغییر شاخص‌ها و ثابت نگاه‌داشتن ضرایب مدل به دست‌آمده در قدرت تفکیک پایین، حرارت سطح در قدرت تفکیک‌های متفاوت برآورد شده و نتایج آن در شکل ۴ به نمایش درآمده است. این نتایج نشان می‌دهند با تغییر شاخص‌ها، به‌منزله ورودی مدل، مقدار میانگین خطا تغییر می‌یابد. همچنین، شاخص‌های سطوح غیرقابل نفوذ عملکردی بهتر از شاخص‌های پوشش گیاهی دارند. افزون بر این‌ها، ترکیب شاخص‌های پوشش گیاهی و سطوح غیرقابل نفوذ بهترین نتیجه را می‌دهد. گرچه تصاویر مؤلفه‌های اول، در قدرت تفکیک پایین، همبستگی بسیار بالایی با حرارت سطح دارند؛ در قدرت تفکیک بالا، بدترین عملکرد را در بین ورودی‌های به‌کاررفته برای تخمین حرارت سطح داشته‌اند. برای نمونه، همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، مقدار خطای به دست‌آمده، با استفاده از مؤلفه‌های اصلی در قدرت تفکیک ۶۰ متر، برابر با ۳ درجه سانتی‌گراد است. همچنین، رابطه حرارت سطح با شاخص‌های مورد



شکل ۴. نمودار مقدار مطلق خطا (برحسب درجه کلوین) در قدرت تفکیک‌های مکانی متفاوت (برحسب متر) با به‌کارگیری شاخص‌های گوناگون، با قدرت تفکیک تقریباً ۱ کیلومتر (A, N, N, U ترکیب شاخص ARVI، NDBI، NDVI و UI است)



شکل ۵. (A) حرارت سطح مشاهده‌شده (۲۴۰ متر)، (B) حرارت سطح برآورد شده با استفاده از روش fC (۲۴۰ متر)، (C) حرارت سطح با استفاده از روش NDBI (۲۴۰ متر) و (D) حرارت سطح مشاهده‌شده در قدرت تفکیک حدود ۱ کیلومتر

۴- نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق برآورد حرارت سطح با قدرت تفکیک مکانی بالاست. به این منظور، از شاخص‌های پوشش گیاهی و سطوح غیرقابل نفوذ و نیز، روش رگرسیون خطی استفاده شده است. می‌توان گفت نوآوری این تحقیق در بررسی عملکرد ترکیب‌های متفاوت این شاخص‌هاست. نتایج بیانگر رابطه مثبت بین حرارت سطح و شاخص‌های سطوح غیرقابل نفوذ و رابطه منفی بین حرارت سطح و شاخص‌های پوشش گیاهی است. این نتایج با مطالعات ایسا و وربایرن (۲۰۱۲)، کاستاس و نورمن (۲۰۰۳) و آگام و کاستاس (۲۰۰۷) مطابقت دارد. همچنین، ضریب همبستگی بین حرارت سطح و شاخص‌های سطوح غیرقابل نفوذ بالاتر از ضریب همبستگی بین حرارت سطح و شاخص‌های پوشش گیاهی است. از بین شاخص‌های به‌کاررفته، کمترین ضریب همبستگی مربوط به شاخص fc و بیشترین مقدار مربوط به شاخص NDBI و ترکیب شاخص‌های پوشش گیاهی و سطوح غیرقابل نفوذ است. نیز، شاخص‌های NDBI، UI و ترکیب شاخص‌های ARVI، NDBI، NDVI و UI بهترین عملکرد و مؤلفه‌های اصلی بدترین عملکرد را دارند. بدین ترتیب، می‌توان گفت مدل به‌دست‌آمده در برابر تغییر شاخص‌های طیفی ناپایدار است. بررسی مقدار مطلق خطاها بیانگر این واقعیت است که، با افزایش دقت مکانی، مقدار خطاها نیز افزایش می‌یابد. این افزایش خطا شیب ثابتی ندارد ولی در تمامی شاخص‌ها، با بهبود قدرت تفکیک مکانی به کمتر از ۲۴۰ متر، شیب افزایش خطا به‌شدت بیشتر می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش قدرت تفکیک مکانی تصاویر حرارت سطح سنجنده‌های با قدرت تفکیک ۱۰۰۰ متر در شهر تهران، به‌کمک شاخص‌های به‌کاررفته در این تحقیق، تا ۲۴۰ متر با مقدار خطای کمتر از ۱/۵ درجه سانتی‌گراد و برای شاخص‌های سطوح غیرقابل نفوذ همچون NDBI و UI، به‌ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۱/۰۱ درجه سانتی‌گراد امکان‌پذیر است. درنهایت، می‌توان گفت

تصویر به‌دست‌آمده با ترکیب شاخص‌های طیفی را می‌توان در جایگاه داده قابل اطمینانی به‌کار برد که دقت مکانی آن بالاتر از تصویر اولیه برای مطالعه در نواحی شهری است که به تصاویر حرارتی، به‌منزله داده اولیه، نیاز دارد. با توجه به اینکه افزایش قدرت تفکیک مکانی به ۶۰ متر و کمتر باعث افت شدید دقت می‌شود، پیشنهاد ما طرح و بررسی روشی جدید و بهینه برای دستیابی به این سطح از قدرت تفکیک مکانی در باندهای حرارتی است.

۵- سپاسگزاری

این طرح با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه زابل انجام شده است. شماره طرح: IR-UDZ۹۶-۱۷

۶- منابع

- Agam, N. & Kustas, W.P., 2007, **A Vegetation Index Based Technique for Spatial Sharpening of Thermal Imagery**, Remote Sensing of Environment, 107(4), PP. 545–558.
- Bastiaanssen, W.G.M. & Pelgrum, H., 1998, **A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 2: Validation**, Journal of Hydrology, 212–229.
- Essa, W. & Verbeiren, B., 2012, **Evaluation of the DisTrad Thermal Sharpening Methodology for Urban Areas**, International Journal of Applied Earth Observation and Geofomation, 19(0), 163–172.
- Inamdar, A.K. & French, A., 2008, **Land Surface Temperature Retrieval at High Spatial and Temporal Resolutions over the Southwestern United States**, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 113(D7), P. D07107.
- Kallel, A. & Otle, C., 2013, **Surface Temperature Downscaling From Multiresolution Instruments Based on Markov Models**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 51(3), 1588–1612.

- Kustas, W.P. & Norman, J.M., 2003, **Estimating Subpixel Surface Temperatures and Energy Fluxes from the Vegetation Index Radiometric Temperature Relationship**, Remote Sensing of Environment, 85(4), 429–440.
- Leblon, B., 2013, **Soil and Vegetation Optical Properties**, University of New Brunswick, Fredericton (NB), Canada.
- Moradzadeh, M. & Saradjian, M.R., 2016, **Vegetation Effects Modeling in Soil Moisture Retrieval Using MSVI**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 82(10), PP. 803–810.
- Moradzadeh, M. & Saradjian, M.R., 2017, **Estimation of Improved Resolution Soil Moisture in Vegetated Areas Using Passive AMSR-E Data**, Journal of Earth System Science, In Press.
- Liu, D. & Pu, R., 2008, **Downscaling Thermal Infrared Radiance for Subpixel Land Surface Temperature Retrieval**, Sensors, 8(4), PP. 2695–2706.
- Merlin, O. & Duchemin, B., 2010, **Disaggregation of MODIS Surface Temperature over an Agricultural Area Using a Time Series of Formosat-2 Images**, Remote Sensing of Environment, 114(11), PP. 2500–2512.
- Roerink, G.J. & Su, Z., 2000, **S-SEBI: A Simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance, Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology**, Oceans and Atmosphere, 25(2), PP. 147–157.
- Stathopoulou, M. & Cartalis, C., 2009, **Downscaling AVHRR Land Surface Temperatures for Improved Surface Urban Heat Island Intensity Estimation**, Remote Sensing of Environment, 113(12), PP. 2592–2605.
- Weng, Q. & Lu, D., 2004, **Estimation of Land Surface Temperature–Vegetation Abundance Relationship for Urban Heat Island Studies**, Remote Sensing of Environment, 89(4), PP. 467–483.
- Yuan, F. & Bauer, M.E., 2007, **Comparison of Impervious Surface Area and Normalized Difference Vegetation Index as Indicators of Surface Urban Heat Island Effects in Landsat Imagery**, Remote Sensing of Environment, 106(3), PP. 375–386.
- Zhan, W. & Chen, Y., 2013, **Disaggregation of Remotely Sensed Land Surface Temperature: Literature Survey, Taxonomy, Issues, and Caveats**, Remote Sensing of Environment, 131(0), PP. 119–139.