



Producing High-resolution Land Surface Temperature Maps Using Sentinel-2 Satellite Data in Isfahan

Mohammad Hosein Taghikhani¹ | Somayeh Sima^{2✉} | Iman Raissi-Dehkordi³ |
Neamat Karimi⁴

1. Department of Water Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran. Email: m.taghikhani@modares.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran. Email: s.sima@modares.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran. Email: iman_raissi@modares.ac.ir
4. Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran. Email: Nehmatkarimi@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 30, 2022

Revised: Jan. 7, 2023

Accepted: Jan. 16, 2023

Published online: Feb. 20, 2023

Keywords:

Satellite-derived Land surface temperature, Sharpening, Thermal remote-sensing

ABSTRACT

Monitoring land surface temperature (LST) using remote sensing data and examining its temporal and spatial variation is important in various studies such as environmental research, land use change, water resources management, and drought monitoring, especially at local scales. Remote sensing data can provide a long-term and continuous spatial coverage of LST. However, LST data retrieved from thermal infrared (TIR) band imagery have a coarser spatial resolution than surface reflectance (SR) data collected from shortwave bands on the same instrument. LST products with high spatial and temporal resolutions are not yet available. Therefore, several downscaling algorithms to produce high-resolution LST maps from sensors with appropriate temporal resolution have been developed recently. In this study, thermal sharpening of land surface temperature obtained from Sentinel-3 satellite images with a spatial resolution of 1 km and temporal resolution of less than 1 day was carried out using the PyDMS model and Sentinel-2 images to produce LST maps with a spatial resolution of 20 meters for Isfahan, Iran. PyDMS is a machine learning algorithm based on decision tree regression that relates the reflectance of high-resolution bands to the LST of the corresponding low-resolution image. The results of this model have been compared against the LST measurements at a depth of 5 cm in three meteorological stations including Isfahan Airport, Isfahan, and Kaboutarbad. Moreover, LST products of MODIS and Landsat-8 have been used to assess the consistency of the sharpened LSTs. The results show that the correlation coefficient is higher than 0.74 in all 3 stations and the RMSE error is equal to 6.7, 4.0 and 15.5 °C in Isfahan, Kabutrabad and the airport, respectively. Moreover, the spatial pattern of the sharpened LST is compatible with the spatial pattern of the LST products of Landsat 8, Sentinel 3 and MODIS. The findings of this study indicate the promising application of the PyDMS algorithm for producing LST maps with a spatial resolution of 20 meters and temporal resolution of fewer than 7 days, though bias correction using in situ LST can improve results. Production of LST maps with both high spatial and temporal resolutions is extremely useful for many practical applications such as soil and crop management practices, evapotranspiration estimation, and irrigation water management.

Cite this article: Taghikhani, M. H., Sima, S., Raissi-Dehkordi, I., & Karimi, N. (2023). Producing Land Surface Temperature Maps with high spatial resolution from Sentinel-2 satellite data, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (12), 2775-2791. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.350130.669385>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.350130.669385>



تولید نقشه‌های دمای سطح زمین با قدرت تفکیک مکانی بالا از داده‌های ماهواره Sentinel-2، (مطالعه موردی: اصفهان)

محمدحسین تقی‌خانی^۱ | سمیه سیما^۲ | ایمان رئیسی دهکردی^۳ | نعمت اله کریمی^۴^۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران. ایمیل: mohammadhossein.tkh@gmail.com^۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران. ایمیل: s.sima@modares.ac.ir^۳. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران. ایمیل: iman_raissi@modares.ac.ir^۴. مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران. ایمیل: Nehmatkarimi@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	پایش دمای سطح زمین با استفاده از فن‌آوری سنجش از دور و بررسی تغییرات زمانی و مکانی آن در مطالعات مختلفی نظیر تغییرات کاربری اراضی، کشاورزی و تشخیص خشکسالی به ویژه در مقیاس محلی اهمیت دارد. با این وجود در حال حاضر محصولات دمای سطح که از قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا برخوردار باشند در دسترس نیست. از این رو، استفاده از مدل‌های ریزمقیاس‌سازی به منظور تولید نقشه دمای سطح با قدرت تفکیک مکانی بالا از سنجنده‌های با قدرت تفکیک زمانی مناسب مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه، با استفاده از مدل PyDMS و تصاویر سنتینل ۲، ریزمقیاس‌نمایی دمای سطح زمین حاصل از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۳ انجام و نقشه دمای سطح زمین با قدرت تفکیک مکانی ۲۰ متر در شهر اصفهان تولید و نتایج حاصل از این مدل با داده‌های اندازه‌گیری زمینی دمای سطح در عمق ۵ سانتی‌متری ایستگاه‌های هواشناسی صحت‌سنجی شد. نتایج نشانگر ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۷۴ در هر ۳ ایستگاه و خطای RMSE معادل ۰/۷، ۴/۰ و ۱۵/۵ درجه سلسیوس به ترتیب در سه ایستگاه اصفهان، کبوترآباد و فرودگاه به ترتیب معادل می‌باشد. همچنین الگوی مکانی دمای سطح حاصل از این مدل با الگوی مکانی محصولات دمای سطح لندست ۸، سنتینل ۳ و مادیس تطبیق دارد. یافته‌های این پژوهش حاکی از امکان تولید نقشه‌های دمای سطح زمین با قدرت تفکیک مکانی ۲۰ متر و گام زمانی کمتر از هفته‌ای با استفاده از الگوریتم PyDMS و اعمال تصحیح اریبی با داده‌های زمینی است. تولید نقشه‌های دمای سطح با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا برای بسیاری از کاربردها نظیر مدیریت خاک و محصول، برآورد تبخیر-تعرق و مدیریت آب آبیاری مفید است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۸	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۱	
واژه‌های کلیدی: محصولات دمای سطح ماهواره‌ای، ریزمقیاس‌سازی، سنجش از دور حرارتی	

استاد: تقی‌خانی، محمدحسین؛ سیما، سمیه؛ رئیسی دهکردی، ایمان؛ و کریمی، نعمت‌الله. (۱۴۰۱). تولید نقشه‌های دمای سطح زمین با قدرت تفکیک مکانی بالا از داده‌های ماهواره Sentinel-2، (مطالعه موردی: اصفهان). مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۱۲)، ۲۷۷۵-۲۷۹۱.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.350130.669385>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.350130.669385>

مقدمه

دمای سطح زمین^۱، یکی از اجزای مهم تاثیرگذار در چرخه بیلان انرژی است که ارتباط مستقیمی با شار گرمای نهان و شار گرمای محسوس دارد (Ermida et al., 2020). دمای سطح زمین در هر محدوده‌ای تابع عرض جغرافیایی، فصل، ویژگی‌های جنس و پوشش سطح و برهم کنش انرژی در لایه مرزی خاک و اتمسفر است. این متغیر یکی از مهم‌ترین عوامل در بسیاری از زمینه‌های مطالعاتی مانند تغییر اقلیم، فرآیندهای هیدرولوژیکی، کشاورزی و تغییرات کاربری اراضی است. بنابراین، به دلیل اهمیت این عامل در کنترل اکثر فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در زمین، محاسبه این متغیر از طریق تکنیک سنجش از دور اهمیت دارد (Weng et al., 2004). در حالت کلی منبع اصلی و رایج داده‌های اقلیمی مانند دما، ایستگاه‌های سینوپتیکی هستند. از آنجا که داده‌های اقلیمی ثبت شده توسط ایستگاه‌های سینوپتیکی، در رابطه با مکان قرارگیری آن‌ها میباشد. بنابراین، نمی‌توان از این داده‌ها برای تعمیم به سطح منطقه به صورت دقیق استفاده کرد. سنجش از دور به وسیله سنجنده‌های فروسرخ حرارتی قابلیت استخراج دمای سطح زمین برای بسیاری از کاربردها نظیر پیش‌بینی آتش‌سوزی، مدلسازی شارهای انرژی مربوط به سطح زمین، تبخیر و تعرق، نظارت بر شار حرارتی نواحی شهری و تشخیص و پیش‌بینی خشکسالی را فراهم می‌کند (Anderson et al., 2008; Guzinski & Nieto, 2019a; Harris et al., 2011; Voogt & Oke, 2003). علاوه بر این، دمای سطح زمین بر رطوبت خاک نیز تاثیرگذار است (Song et al., 2014).

سنجنده‌های حرارتی با توان تفکیک مکانی و زمانی مختلف برای برآورد دمای سطح زمین در کاربردهای عملیاتی طراحی شده‌اند. به عنوان مثال سنجنده مادیس^۲ با توان تفکیک مکانی یک کیلومتر و توان تفکیک زمانی یک و هشت روزه، محصول دمای سطح زمین را فراهم می‌کند. همچنین محصول دمای سطح زمین آماده ماهواره سنتینل^۳ با توان تفکیک مکانی یک کیلومتر و توان تفکیک زمانی کمتر از یک روز امکان بررسی این متغیر را به صورت روزانه فراهم می‌کند. با وجود این که این سنجنده‌ها امکان پایش دمای سطح زمین را به صورت روزانه فراهم می‌کنند اما به علت پایین بودن توان تفکیک مکانی، امکان ارزیابی در مقیاس محلی توسط این سنجنده‌ها وجود ندارد. به عنوان مثال در مناطق شهری به علت ناهمگنی پوشش گیاهی و در نتیجه دمای سطح زمین، داده‌های دمای سطح زمین با توان تفکیک مکانی پایین از کیفیت لازم برای پایش برخوردار نیستند (Wang et al., 2020). در مقابل دمای سطح زمین بدست آمده از تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی بالا به طور فزاینده‌ای در کاربردهای مختلف مانند ارزیابی شرایط سطح زمین، تخمین تبخیر/تعرق با توان تفکیک مکانی بالا برای مدیریت منابع آب و ارزیابی تنش‌های گیاهی در مقیاس محلی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Guzinski et al., 2020; Guzinski & Nieto, 2019b; Tran et al., 2017; Zhanga et al., 2013).

مجموعه ماهواره‌های لندست^۴ که دمای سطح زمین را برای یک توان تفکیک مکانی بالا ارائه می‌دهند، به طور خاص برای مطالعات محلی و مقیاس کوچک مناسب هستند. با این وجود توان تفکیک زمانی ۱۶ روزه ماهواره لندست ممکن است برای محدوده زمانی کوتاه در بسیاری از مطالعات مناسب نباشد. دمای سطح زمین یک متغیر بسیار مهم در برآورد تبخیر و تعرق روزانه بر مبنای مدل‌های بیلان انرژی است که توان تفکیک مکانی و زمانی بالا برای مطالعات در مقیاس محلی ضرورت دارد. بنابراین، یکی از راه‌های دسترسی به دمای سطح زمین با توان تفکیک مکانی و زمانی مناسب، استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌سازی برای بهبود قدرت تفکیک مکانی محصولات دمای سطح در مقیاس محلی است. به این منظور، روش‌های متعددی برای بهبود قدرت تفکیک مکانی محصول دمای سطح توسعه داده شده است. به عنوان مثال، یک روش کلاسیک به نام TsHARP^۵، ریزمقیاس‌سازی را با استفاده از یک رابطه معکوس بین شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی^۶ (NDVI) و دمای سطح زمین انجام می‌دهد (Agam et al., 2007). اما در نواحی با شرایط پوشش گیاهی ناهمگن و پیچیده عملکرد مناسبی ارائه نمی‌دهد (Jeganathan et al., 2011). بنابراین، این موضوع اهمیت استفاده از یک الگوریتم مناسب برای استخراج دمای سطح زمین با قدرت تفکیک بالا در کاربری‌های اراضی مختلف و ناهمگن که دارای عملکرد مناسب باشد را نشان می‌دهد. در این راستا برای توسعه کاربرد ریزمقیاس‌سازی در شرایط پیچیده، روشی تحت عنوان داده‌کاوی یا DMS^۷ توسعه داده شده است. نحوه عملکرد این رویکرد اعمال یک رابطه بر مبنای رگرسیون‌های درخت تصمیم بین دما و بازتابش طیفی باندهای سنجنده است. مقایسه

1 Land Surface Temperature, LST

2 Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS

3 SENTINEL

4 Landsat

5 Sharpening thermal imagery, TsHARP

6 Normalized Difference Vegetation index, NDVI

7 Data Mining Sharpener, DMS

انجام شده بین الگوریتم‌های DMS و TsHARP در کاربری‌های اراضی مختلف نشان می‌دهد که DMS در تمامی موارد عملکرد بهتری داشته است (Gao et al., 2012). در تحقیقات بعدی، بر اساس الگوریتم DMS، یک مدل یادگیری ماشین به زبان پایتون برای استخراج دمای سطح زمین با توان تفکیک مکانی بالا از تلفیق تصاویر سنتینل ۲ و سنتینل ۳ برای محاسبه تبخیر و تعرق در مدل TSEB، توسعه داده شد (Guzinski & Nieto., 2019).

تاکنون مطالعات مختلفی در برآورد دمای سطح زمین با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای انجام شده است. در یک مطالعه موردی در سال ۲۰۱۹ پژوهشی جهت اعتبارسنجی محصول دمای سطح مادیس را در کاربری‌های اراضی مختلف در ایالات متحده آمریکا، پرتغال، نامیبیا و چین انجام شد و اعتبارسنجی دمای سطح زمین حاصل از داده‌های ماهواره‌ای، نسبت به دمای سطح زمین محاسبه شده با استفاده از داده‌های زمینی در ایستگاه‌های رادیومتری انجام گرفت. در اکثر موارد جذر میانگین مربع خطا (RMSE^۱) کمتر از دو درجه کلونین گزارش شده است (Duan et al., 2019). در پژوهشی با استفاده از یک الگوریتم عملیاتی، دمای سطح محاسبه شده از تصاویر ماهواره‌های لندست ۵ و لندست ۷ با دمای سطح محاسبه شده از داده‌های ایستگاه‌های رادیومتری در کانادا و ایالات متحده آمریکا مقایسه شد، RMSE برای لندست ۵، ۲/۲ درجه کلونین و برای لندست ۷، ۲/۳ درجه کلونین گزارش شدند (Malakar et al., 2018). در مطالعه‌ای به منظور بهبود قدرت تفکیک مکانی دمای سطح زمین، با استفاده از الگوریتم TsHARP، در مناطقی در کشور برزیل، جمهوری چک، ایالات متحده آمریکا و هند دمای سطح حاصل از تصاویر سنتینل ۳ با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر به قدرت تفکیک مکانی ۲۰ متر تصاویر سنتینل ۲ ریزمقیاس شد و به منظور اعتبارسنجی، نتایج با دمای سطح زمین حاصل از تصاویر لندست مقایسه شد، نتایج RMSE تقریباً یک درجه سلسیوس را گزارش می‌کنند (Huryna et al., 2019).

در یک مطالعه در داخل کشور نیز با استفاده از دو الگوریتم TsHARP و DisTRAD، محققان محصول دمای سطح زمین مادیس با توان تفکیک مکانی یک کیلومتر را با استفاده از باندهای طیفی لندست ۸، به توان تفکیک مکانی ۲۵۰ متر ریزمقیاس کرده و با محصول دمای سطح زمین لندست ۸ مقایسه نمودند، RMSE حاصل از دو الگوریتم به ترتیب برابر با ۲/۳۸ و ۲/۴۴ درجه سلسیوس گزارش شد (Faraji et al., 2021). در یک مطالعه مشابه در شهر تهران نیز با استفاده از الگوریتم TsHARP، دمای سطح زمین سنجنده مادیس با کمک تصاویر لندست ۷ به توان تفکیک مکانی ۲۴۰ متر ریزمقیاس شد، نتایج نشان داد که با افزایش دقت مکانی، خطا نیز افزایش می‌یابد اما شیب تغییرات خطا ثابت نیست (Akbari et al., 2017). همچنین به منظور مقایسه دمای سطح زمین حاصل از تصاویر ماهواره‌ای نسبت به داده‌های سینوپتیک نقطه‌ای، در مطالعه‌ای در داخل کشور مقدار خطای RMSE دمای سطح حاصل از تصاویر لندست ۵ و لندست ۸ نسبت به داده‌های اندازه‌گیری زمینی ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک اطراف دریاچه ارومیه از مقدار ۴/۵۲ درجه سلسیوس تا ۱۴/۷۵ درجه سلسیوس بدست آمد (Pahlevanzadeh et al., 2019). در اکثر مطالعات صورت گرفته در داخل کشور مقایسه دمای سطح داده‌های ماهواره‌ای ریزمقیاس شده با سایر محصولات ماهواره‌ای (و نه داده‌های زمینی معادل) انجام شده است.

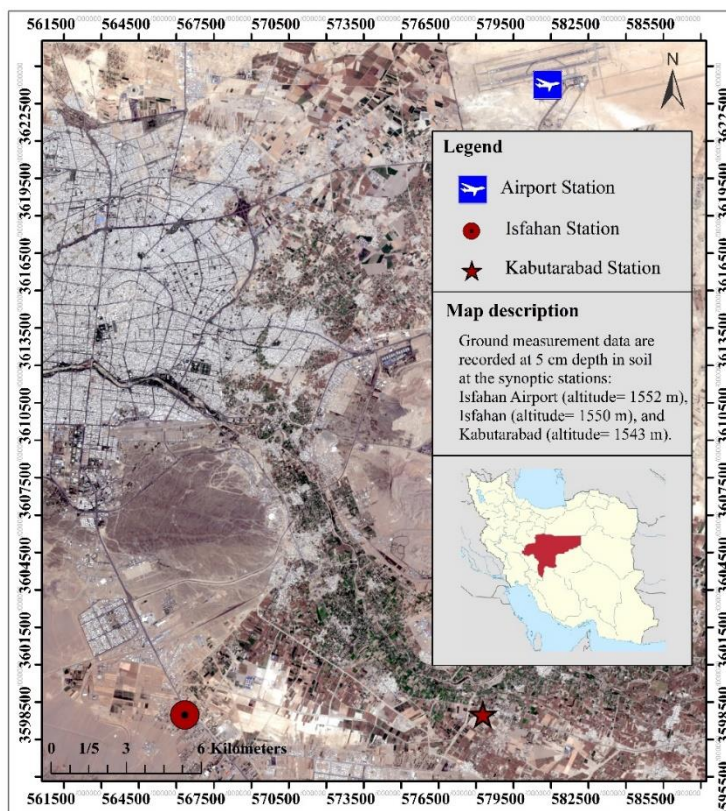
هدف از پژوهش حاضر، بررسی عملکرد مدل ریزمقیاس‌سازی PyDMS^۲ در تولید نقشه‌های دمای سطح زمین با توان تفکیک زمانی و مکانی بالا برای استفاده‌های عملیاتی در مطالعه موردی شهر اصفهان است. در این راستا صحت داده‌های دمای سطح زمین چند محصول ماهواره‌ای بزرگ مقیاس (مادیس و سنتینل ۳) با یکدیگر و با داده‌های دمای سطح زمین بزرگ مقیاس حاصل از سنجنده‌های لندست ۸، سنتینل ۲ و داده‌های همزمان دمای سطح خاک متوسط عمق پنج سانتیمتری (ایستگاه‌های سازمان هواشناسی کشوری) مقایسه و نتایج حاصله تحلیل شد.

محدوده مطالعاتی

محدوده مطالعاتی در این پژوهش، شهر اصفهان در جنوب غربی استان اصفهان می‌باشد (شکل ۱). سطح شهر از سطح عمومی دریاها در حدود ۱۵۷۰ متر ارتفاع داشته و در قسمت شمالی و شرقی به کویر محدود شده و در قسمت غربی و جنوبی نیز به سلسله کوه‌های زاگرس منتهی می‌شود (Ataei & Hasheminasab, 2015). میانگین دمای هوای استان اصفهان متغیر بوده و در مناطق مرتفع در حدود ۴ درجه سلسیوس و در مناطق شرقی در حدود ۲۲ درجه سلسیوس است. همچنین میانگین بارش در استان برای یک دوره ۳۶ ساله در حدود ۱۵۰ میلی‌متر گزارش شده است (Khodaghli, 2008).

1 Root Mean-Square Error, RMSE

2 Python implementation of Data Mining Sharpener



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه در تصویر سنتینل ۲ تصحیح شده (مدار شماره ۱۰۶ درجه) و موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک.

داده‌های مورد استفاده

داده‌های ماهواره‌ای و اندازه‌گیری زمینی مورد استفاده در این پژوهش، به اختصار در جدول ۱ ارائه شده‌است. برای استخراج تصاویر حرارتی با قدرت تفکیک مکانی بالا از داده‌های کوپرنیکوس^۱، از باندهای طیفی تصاویر سنجنده MSI^۲، بر روی ماهواره سنتینل ۲ برای بهبود قدرت تفکیک مکانی دمای سطح زمین حاصل از تصاویر سنتینل ۳ استفاده شده‌است. سنجنده MSI، بازتابش را در ۱۳ باند طیفی (با طول موج مرکزی ۴۴۴ تا ۲۲۰۲ نانومتر) با توان تفکیک مکانی ۱۰ متر، ۲۰ متر و ۶۰ متر (بسته به شماره باند طیفی) و توان تفکیک زمانی کمتر از پنج روز، با در نظر گرفتن هر دو ماهواره Sentinel-2 A&B، دریافت می‌کند (Drusch et al., 2012). در این پژوهش تنها از تصاویر ماهواره Sentinel-2A L1C استفاده شد. در واقع تصاویر Sentinel-2A در بازه‌ی زمانی ۱۰ روز در دسترس هستند، اما با توجه به این که تصویر محدوده‌ی مطالعاتی در دو گذر ماهواره ثبت می‌شود، تصاویر با توان تفکیک زمانی کمتر از ۱۰ روز قابل استفاده هستند. محصول MOD11A1 سنجنده مادیس، برای ارزیابی محصول SLSTR^۳ L2 قبل از ریزمقیاس‌سازی استفاده شده‌است. به علاوه به منظور مقایسه دمای سطح ریزمقیاس حاصل از PyDMS، از محصول دمای سطح آماده‌لندست ۸ که از الگوریتم تک کانال^۴ استخراج شده‌است، استفاده شد (Slayer., 2022).

به علت در دسترس نبودن داده‌های زمینی دمای سطح خاک، از داده‌های متوسط دمای ثبت‌شده در عمق پنج سانتی‌متری خاک در ایستگاه‌های سینوپتیک فرودگاه اصفهان، اصفهان و کبوترآباد (شکل ۱) است که به صورت سه ساعته در دسترس می‌باشد. اختلاف زمانی بین ثبت داده زمینی و گذر ماهواره بین ۳۰ تا ۹۰ دقیقه است. به منظور اعتبارسنجی، دمای سطح زمین استخراج‌شده از مدل PyDMS و همچنین مقایسه دمای سطح زمین محصول مادیس و سنتینل ۳ از داده‌های زمینی ثبت‌شده در این سه ایستگاه سینوپتیک استفاده شد. ارتفاع سه ایستگاه از سطح دریا به ترتیب برابر با ۱۵۵۱، ۱۵۵۰ و ۱۵۴۲ متر برای ایستگاه فرودگاه اصفهان، اصفهان و کبوترآباد است. جدول ۲ تاریخ تصاویر را به تفکیک ماهواره‌های سنتینل ۲ و لندست ۸ نمایش می‌دهد. همچنین تصاویر ماهواره‌ای مادیس و سنتینل ۳

1 Copernicus

2 MultiSpectral Instrument, MSI

3 Sea and Land Surface Temperature Radiometer, SLSTR

4 Single Channel



نیز مطابق با تاریخ تصاویر سنتینل ۲ تهیه گردید.

جدول ۱ - داده‌های ماهواره‌ای و اندازه‌گیری زمینی به کار رفته در پژوهش حاضر.

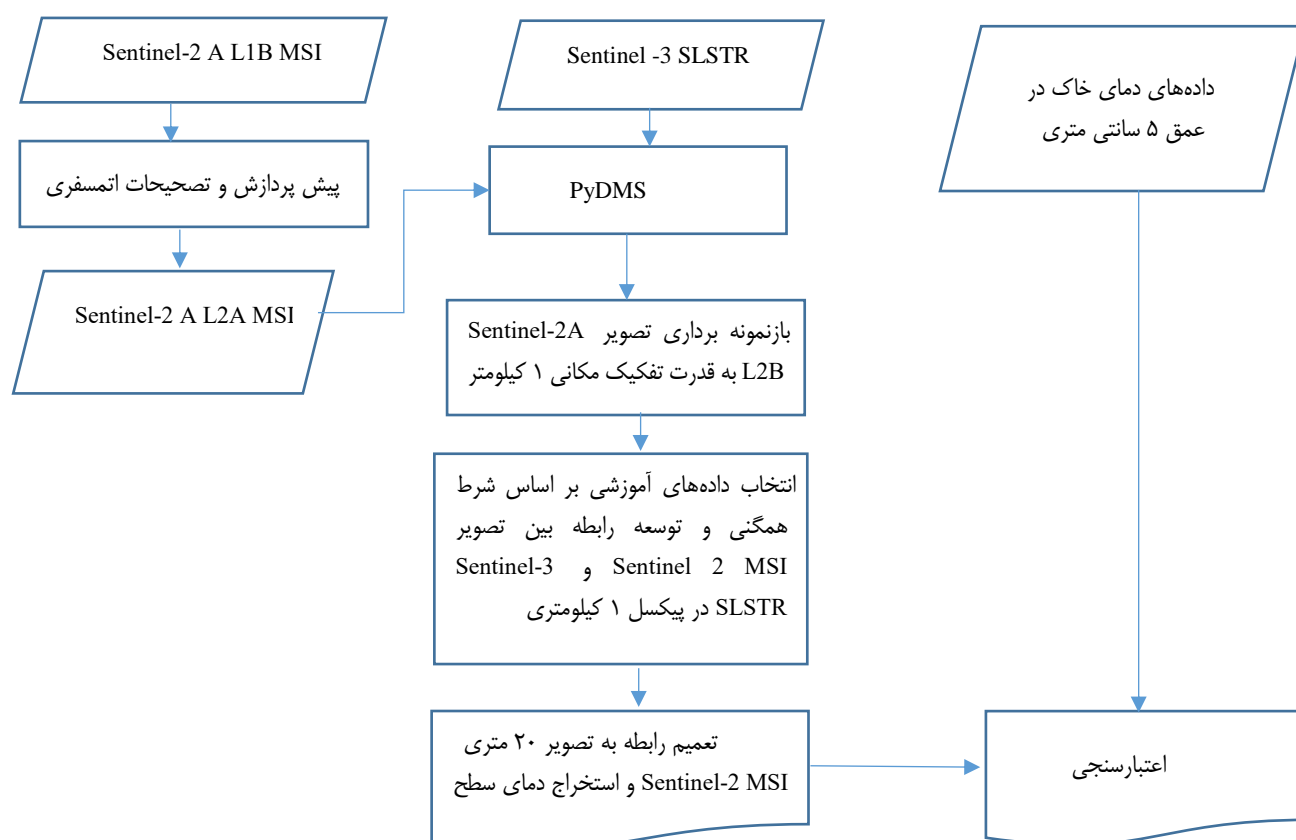
منبع	قدرت تفکیک زمانی	قدرت تفکیک مکانی	باند	داده مورد استفاده	نوع داده
https://Earthexplorer.usgs.gov/	روزانه	۱ کیلومتر	حرارتی	MODIS	تصاویر ماهواره‌ای
https://Scihub.copernicus.eu/	روزانه	۱ کیلومتر	حرارتی	Sentinel-3 SLSTR	
https://Scihub.copernicus.eu/	> ۱۰ روز	۱۰،۲۰،۶۰ متر	طیفی	Sentinel-2 MSI	
https://Earthexplorer.usgs.gov/	۱۶ روز	۳۰ متر	حرارتی	Landsat-8	
سازمان هواشناسی ایران	۶ ساعت	نقطه‌ای (سینوپتیک)		دمای سطح در عمق ۵ سانتی متری در ایستگاه‌های سینوپتیک	دما

جدول ۲ - تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲ مورد استفاده برای محاسبه دمای سطح زمین.

شماره	تاریخ تصاویر Sentinel-2	شماره روز در سال	شماره	تاریخ تصاویر Landsat-8	شماره روز در سال
۱	۲۵/۵/۲۰۱۶	۱۴۶	۱	۱۲/۵/۲۰۱۶	۱۳۳
۲	۷/۶/۲۰۱۶	۱۵۹	۲	۴/۶/۲۰۱۶	۱۵۶
۳	۱۷/۶/۲۰۱۶	۱۶۹	۳	۱۳/۶/۲۰۱۶	۱۶۵
۴	۲۷/۶/۲۰۱۶	۱۷۹	۴	۲۰/۶/۲۰۱۶	۱۷۲
۵	۷/۷/۲۰۱۶	۱۸۹	۵	۲۹/۶/۲۰۱۶	۱۸۱
۶	۱۴/۷/۲۰۱۶	۱۹۶	۶	۱۵/۷/۲۰۱۶	۱۹۷
۷	۲۴/۷/۲۰۱۶	۲۰۶	۷	۲۲/۷/۲۰۱۶	۲۰۴
۸	۲۷/۷/۲۰۱۶	۲۰۹	۸	۳۱/۷/۲۰۱۶	۲۱۳
۹	۳/۸/۲۰۱۶	۲۱۶	۹	۷/۸/۲۰۱۶	۲۲۰
۱۰	۱۶/۸/۲۰۱۶	۲۲۹	۱۰	۱۶/۸/۲۰۱۶	۲۲۹
۱۱	۲۳/۸/۲۰۱۶	۲۳۶	۱۱	۲۳/۸/۲۰۱۶	۲۳۶
۱۲	۲۶/۸/۲۰۱۶	۲۳۹	۱۲	۱/۹/۲۰۱۶	۲۴۵
۱۳	۱۲/۹/۲۰۱۶	۲۵۶			
۱۴	۱۵/۹/۲۰۱۶	۲۵۹			

مراحل ریزمقیاس سازی با استفاده از مدل PyDMS

روش ریزمقیاس سازی استفاده شده در این پژوهش بر مبنای الگوریتم درخت تصمیم است (Gao et al., 2012). یک الگوریتم یادگیری ماشینی بر مبنای روش داده کاوی DMS است (Guzinski & Nieto, 2019). کد این الگوریتم در محیط پایتون به صورت آزاد در دسترس قرار دارد (<https://github.com/radosuav/pyDMS>). مراحل کار به اختصار در روندنمای ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ - مراحل انجام پژوهش با استفاده از مدل PyDMS

ابتدا باتوجه به اینکه خروجی تصاویر Sentinel-2 L1C، بازتابش بالای اتمسفر^۱ می‌باشد، برای رسیدن به بازتاب سطح نیاز به تصحیح اتمسفری داشتند. پس از اعمال تصحیحات اتمسفری در نرم‌افزار SNAP v.9.0.0 و الگوریتم Sen2Cor به صورت پیش فرض اعمال شده و تصاویر Sentinel-2 L2A حاصل می‌شوند. سپس باندهای طیفی تصویر Sentinel-2 L2A با توان تفکیک مکانی ۲۰ متر، به قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر (معادل محصول دمای سطح سنجنده سنتینل ۳) باز نمونه‌برداری می‌شود. در مرحله بعد، انتخاب نمونه‌های آموزشی که بر اساس همگن بودن پیکسل‌ها است، انجام می‌شود. به یک پیکسل بزرگ زمانی همگن گفته می‌شود که پیکسل‌های نظیر کوچک موجود در پیکسل بزرگ مقادیر بازتابش مشابهی داشته باشند، یعنی تغییرات مقادیر پیکسل‌های کوچک واقع در داخل پیکسل بزرگ باید نزدیک به صفر باشد. نمونه‌های همگن مورد نیاز برای آموزش رگرسیون‌های درختی، بر اساس میانگین ضریب تغییرات بازتابش انتخاب می‌شوند که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$c_v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_i}{\mu_i} \right) \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه، اندیس i نشان‌دهنده شماره باند طیفی، n تعداد کل باندهای طیفی (در این مطالعه ۱۳ باند طیفی ماهواره سنتینل ۲)، σ و μ به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر بازتابش در پیکسل‌های کوچک موجود در یک پیکسل درشت می‌باشند. در واقع هر چه ضریب C_v کوچک‌تر، نمونه همگن‌تر است، با این حال وجود احتمال دستیابی به یک نمونه کاملاً خالص ($C_v = 0$) کم است. در نتیجه معیار قابل استفاده را می‌توان $C_v \leq 0.2$ در نظر گرفت (Gao et al., 2012). سپس، رابطه بین دمای سطح پیکسل یک کیلومتری نظیر Sentinel-3 SLSTR و بازتابش‌های بازنمونه‌برداری شده سنتینل ۲ با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتری برای نمونه‌های آموزشی استخراج می‌شود. در واقع استخراج رابطه بر اساس الگوریتم درخت تصمیم می‌باشد. به این صورت که به عنوان مثال اگر مقدار بازتابش در یک باند مشخص شرط خاصی را ارضا کند در آن صورت مقدار دمای سطح زمین مشخص خواهد شد و اگر آن شرط ارضا نشود، الگوریتم به دنبال بررسی شرط‌های دیگر خواهد رفت. در نهایت پس از استخراج رابطه، این رابطه در تصاویر سنتینل ۲ اعمال شده و دمای سطح زمین با قدرت

1 Spectral radiance on the top of atmosphere, TOA

تفکیک مکانی ۲۰ متری حاصل می‌شود. همچنین، در ادامه دمای سطح حاصل از محصولات یک کیلومتری سنجنده‌های سنتینل ۳ (قبل از ریزمقیاس سازی) و مادیس با هدف ارزیابی سازگاری الگوی مکانی با یکدیگر و با داده‌های زمینی نظیر در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مقایسه قرار گرفت.

روش ارزیابی عملکرد محصول

به منظور ارزیابی صحت الگوی مکانی و دقت نقشه دمای سطح با قدرت تفکیک مکانی بالای حاصل از اجرای الگوریتم PyDMS از سه رویکرد زیر استفاده شده:

اعتبارسنجی دمای سطح حاصل از محصول سنتینل ۳ با داده‌های زمینی و با محصول دمای سطح سنجنده مادیس.

اعتبارسنجی دمای سطح زمین استخراج شده از مدل PyDMS با داده‌های زمینی ثبت شده در سه ایستگاه سینوپتیک.

مقایسه الگوی مکانی و دقت دمای سطح زمین حاصل از مدل PyDMS با محصول دمای سطح زمین آماده لندست ۸.

ارزیابی عملکرد مدل، با شاخص‌های عملکردی شامل ضریب همبستگی (r)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریبی (MBE) ۲، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) ۳ که در جدول ۳ روابط آنها ارائه شده است، انجام می‌گیرد. در این روابط، LST_{obs} ، دمای سطح اندازه‌گیری شده در ایستگاه سینوپتیک، LST_{est} ، دمای سطح حاصل از داده‌های ماهواره‌ای و n تعداد روزها در طول دوره‌ی مطالعاتی است.

جدول ۳- معیارهای عملکرد مورد استفاده برای ارزیابی دمای سطح زمین با قدرت تفکیک مکانی بالا حاصل از داده‌های ماهواره‌ای با اندازه‌گیری

های زمینی

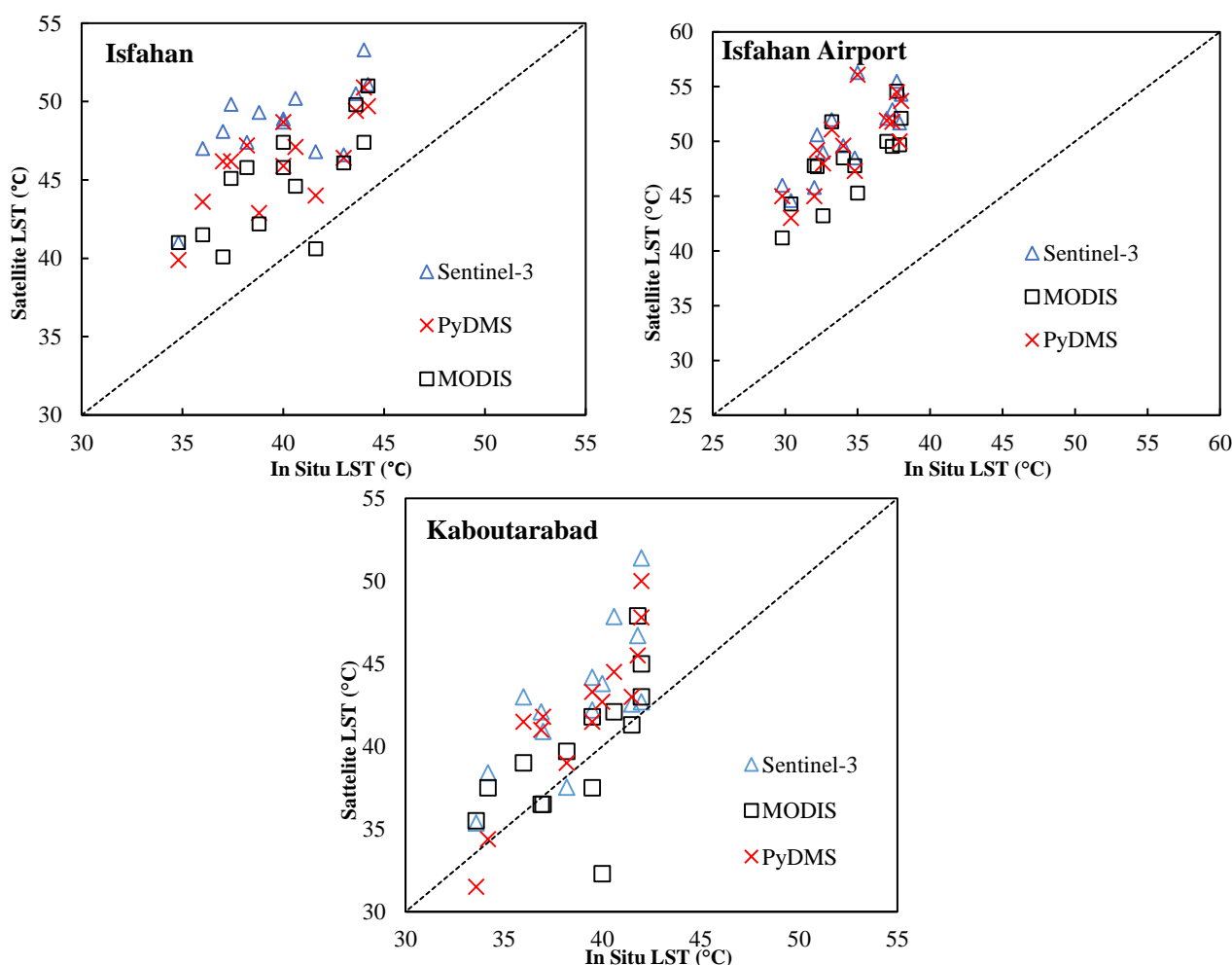
شماره	معادله
۱	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (LST_{obs}(x_i) - LST_{est}(x_i))^2}{n}}$
۲	$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (LST_{obs}(x_i) - LST_{est}(x_i))}{n}$
۳	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n LST_{obs}(x_i) - LST_{est}(x_i) }{n}$
۴	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (LST_{obs}(x_i) - \overline{LST_{obs}})(LST_{est}(x_i) - \overline{LST_{est}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (LST_{obs}(x_i) - \overline{LST_{obs}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (LST_{est}(x_i) - \overline{LST_{est}})^2}}$

نتایج و بحث

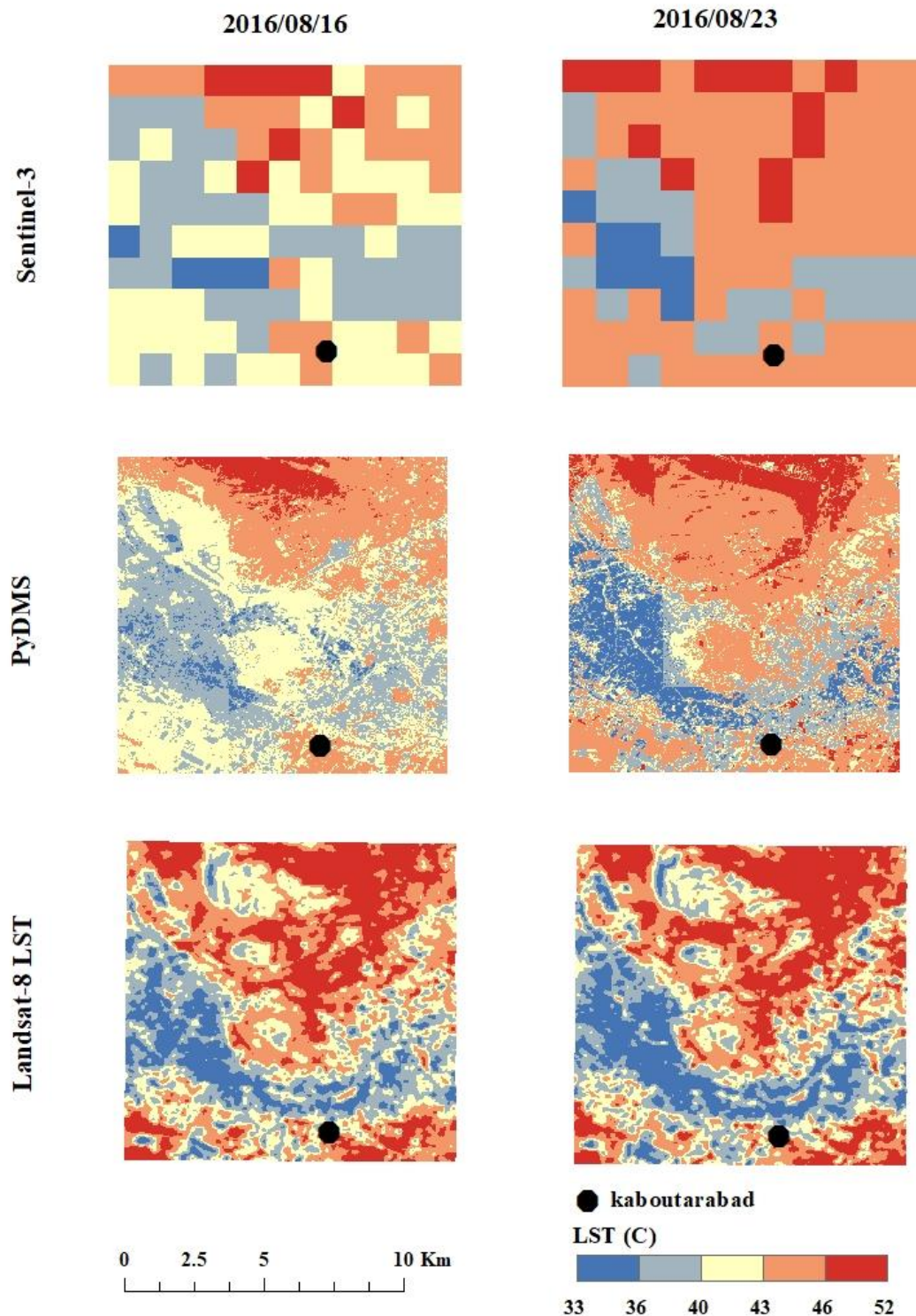
پس از تهیه نقشه‌های دمای سطح زمین با توان تفکیک مکانی ۲۰ متر، نتایج به نقشه‌های دمای سطح Sentinel-3 SLSTR و تصاویر MODIS MOD11A1 نسبت به داده‌های زمینی اعتبارسنجی شد. نتایج حاصل از الگوریتم PyDMS و محصولات آماده دو ماهواره‌ی سنتینل ۳ و مادیس، دمای سطح زمین را نسبت به داده‌های ثبت شده بیشتر برآورد می‌کند. این بیش‌برآورد در ایستگاه فرودگاه بیشترین میزان و در ایستگاه کبوترآباد کمتر است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۳، میزان همبستگی بین نتایج حاصل از PyDMS و داده‌های اندازه‌گیری زمینی، نسبت به همبستگی بین داده‌های مادیس و سنتینل ۳، مقدار بالاتری را نشان می‌دهد. مقایسه دمای سطح حاصل از مدل PyDMS با محصولات دمای سطح با مقیاس یک کیلومتری حاصل از مادیس و سنتینل ۳ در سه ایستگاه سینوپتیک با داده‌های اندازه‌گیری زمینی (شکل ۳) نشان می‌دهد که بیشترین خطا مربوط به ایستگاه فرودگاه اصفهان و کمترین خطا مربوط به ایستگاه کبوترآباد می‌باشد. همچنین با توجه به میزان ریشه RMSE بالاتر دمای سطح حاصل از تصاویر سنتینل ۳ نسبت به داده‌های زمینی در مقایسه با RMSE حاصل از تصاویر مادیس، عملکرد مدل PyDMS در بهبود RMSE قابل مشاهده است (جدول ۴).

جدول ۴- بررسی عملکرد دمای سطح زمین حاصل از تصاویر ماهواره‌ای نسبت به داده‌های زمینی بر اساس شاخص‌های: ضریب همبستگی، میانگین مطلق خطا (°C)، میانگین خطای انحراف (°C) و ریشه میانگین مربعات خطا (°C)

ایستگاه	روش استخراج دمای سطح زمین	r (°C)	MAE (°C)	MBE (°C)	RMSE (°C)
فرودگاه اصفهان	MOD11A1 MODIS LST	۰/۷۵	۱۳/۷	-۱۳/۷	۱۳/۹
	Sentinel-3 SLSTR LST	۰/۷۹	۱۶/۲	-۱۶/۲	۱۶/۳
	Landsat-8 LST	۰/۹۴	۱۶/۴	-۱۶/۴	۱۶/۵
	PyDMS Sharpened LST	۰/۷۷	۱۵/۳	-۱۵/۳	۱۵/۵
اصفهان	MOD11A1 MODIS LST	۰/۷۳	۵/۱	-۴/۹	۵/۵
	Sentinel-3 SLSTR LST	۰/۶۵	۶/۴	-۶/۴	۸/۹
	Landsat-8 LST	۰/۶۸	۸/۴	-۷/۰	۸/۶
	PyDMS Sharpened LST	۰/۷۴	۸/۵	-۸/۵	۶/۷
کبوترآباد	MOD11A1 MODIS LST	۰/۶۴	۲/۵	-۰/۹	۳/۲
	Sentinel-3 SLSTR LST	۰/۷۵	۴/۱	-۲/۹	۴/۸
	Landsat-8 LST	۰/۸۲	۴/۷	-۴/۷	۵/۳
	PyDMS Sharpened LST	۰/۸۹	۳/۵	-۳/۲	۴/۰



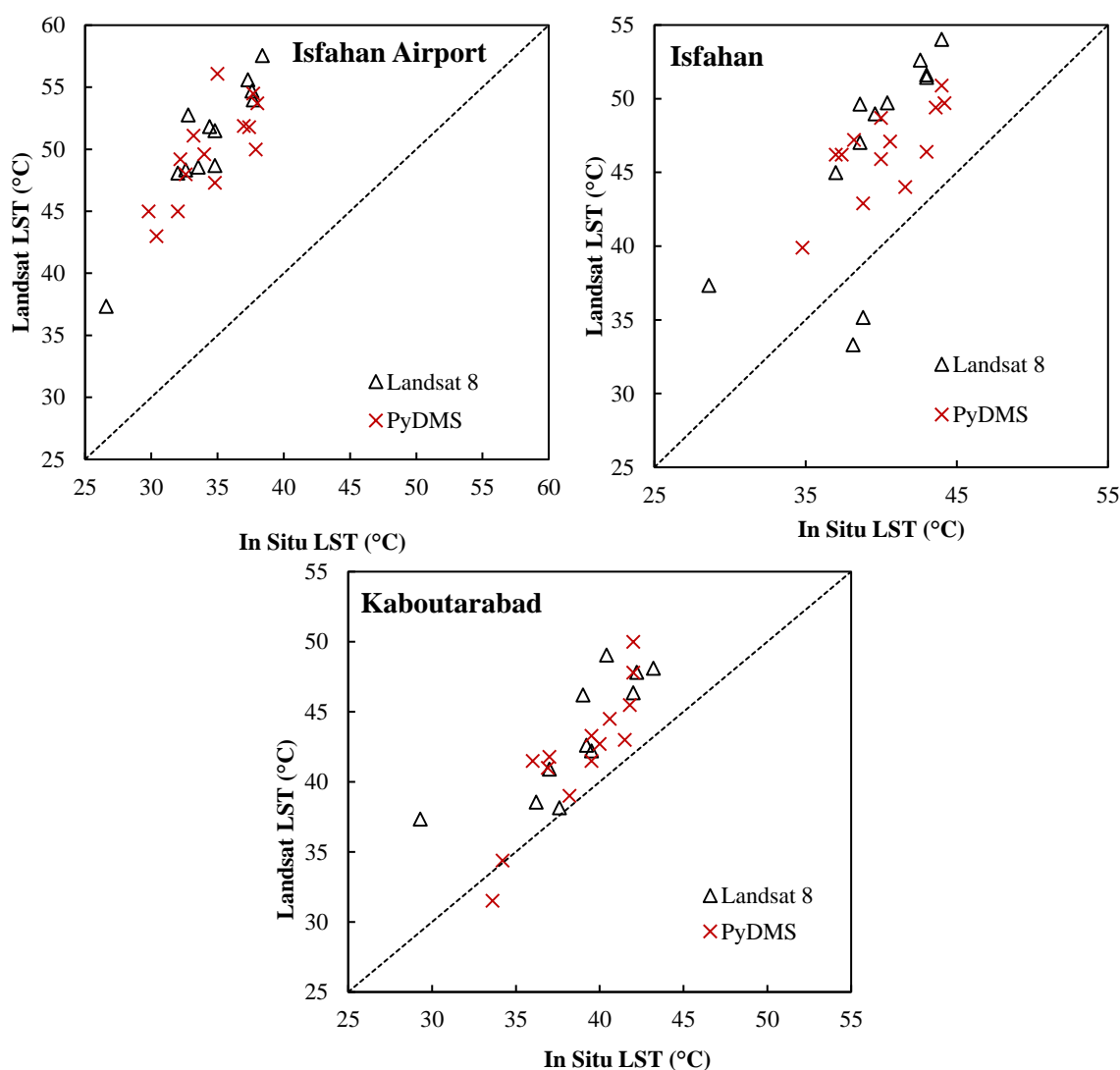
شکل ۳- دمای سطح زمین حاصل از تصاویر مادیس، سنیتل ۳ و الگوریتم PyDMS در مقایسه با داده‌های دمای سطح زمین ثبت‌شده توسط ایستگاه‌های هواشناسی



شکل ۴- عملکرد مدل PyDMS در استخراج نقشه‌ی دمای سطح زمین با توان تفکیک مکانی ۲۰ متر با استفاده از تصاویر سنیتل ۲ و سنیتل ۳ در مقایسه با دمای سطح زمین حاصل از تصاویر لندست ۸ و سنیتل ۳ برای تاریخ‌های ۱۶ و ۲۳ آگوست ۲۰۱۶

در ادامه دمای سطح حاصل از مدل PyDMS با قدرت تفکیک مکانی ۲۰ متر با دمای سطح زمین حاصل از تصاویر لندست ۸ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متری به صورت مکانی در محدوده ایستگاه کبوترآباد برای دو تاریخ مشترک مقایسه شد که الگوی تغییرات مکانی دمای سطح زمین در دو تاریخ نمونه مورد بررسی در شکل ۴، نشان می‌دهد که بین خروجی‌های دو مدل سازگاری مناسبی وجود دارد. عملکرد داده‌های دمای سطح زمین حاصل از تصاویر لندست ۸ نیز نسبت به داده‌های اندازه‌گیری زمینی بررسی شد. با توجه به نتایج

ارائه شده در شکل ۵، میزان همبستگی بین دمای سطح حاصل از تصاویر لندست ۸ و داده‌های اندازه‌گیری زمینی، در هر سه ایستگاه مقدار بالا و نزدیک به یک دارد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، در ایستگاه‌های اصفهان و فرودگاه اصفهان، میزان خطا همانند نتایج PyDMS و محصولات دمای سطح سنتینل ۳ و مادیس، بالا است. نتایج نسبت به ایستگاه کبوتر آباد نیز همانند الگوریتم PyDMS، کمترین خطا را نشان می‌دهد. با مشاهده شکل ۴، در ایستگاه اصفهان، دو داده پایین‌تر از خط ۴۵ درجه قرار گرفته‌اند که این موضوع نشان می‌دهد که داده‌های لندست ۸، در این دو تاریخ دمای کمتری را نسبت به داده‌های اندازه‌گیری زمینی ثبت کرده است، این امر ممکن است مربوط به درصد بالای ابر موجود در تصاویر این دو تاریخ باشد. با توجه به شکل ۵، مشابه با عملکرد مدل PyDMS و داده‌های حاصل از تصاویر سنتینل ۳ و مادیس، برای نتایج لندست ۸ نیز بیشترین خطا مربوط به ایستگاه فرودگاه اصفهان و کم‌ترین خطا مربوط به ایستگاه کبوترآباد می‌باشد.



شکل ۵ - دمای سطح زمین حاصل از تصاویر لندست ۸ و خروجی مدل PyDMS در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری زمینی در سه ایستگاه سینوپتیک.

تحلیل تغییرات زمانی دمای سطح

شکل ۶، تغییرات دمای سطح زمین حاصل از تصاویر مادیس، سنتینل ۳، الگوریتم PyDMS و همچنین دمای سطح اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های سینوپتیک را در طول دوره زمانی مطالعه مورد نظر نشان می‌دهد. تغییرات زمانی دمای سطح زمین در شکل قابل مشاهده است که نتایج حاصل از الگوریتم PyDMS و داده‌های سنتینل ۳ نسبت به داده‌های سنجنده مادیس، شباهت بیشتری با الگوی تغییرات دمای سطح ثبت‌شده در ایستگاه‌های سینوپتیک دارد. همانطور که ملاحظه می‌شود، علیرغم شباهت در روند تغییرات، مقادیر دمای ثبت

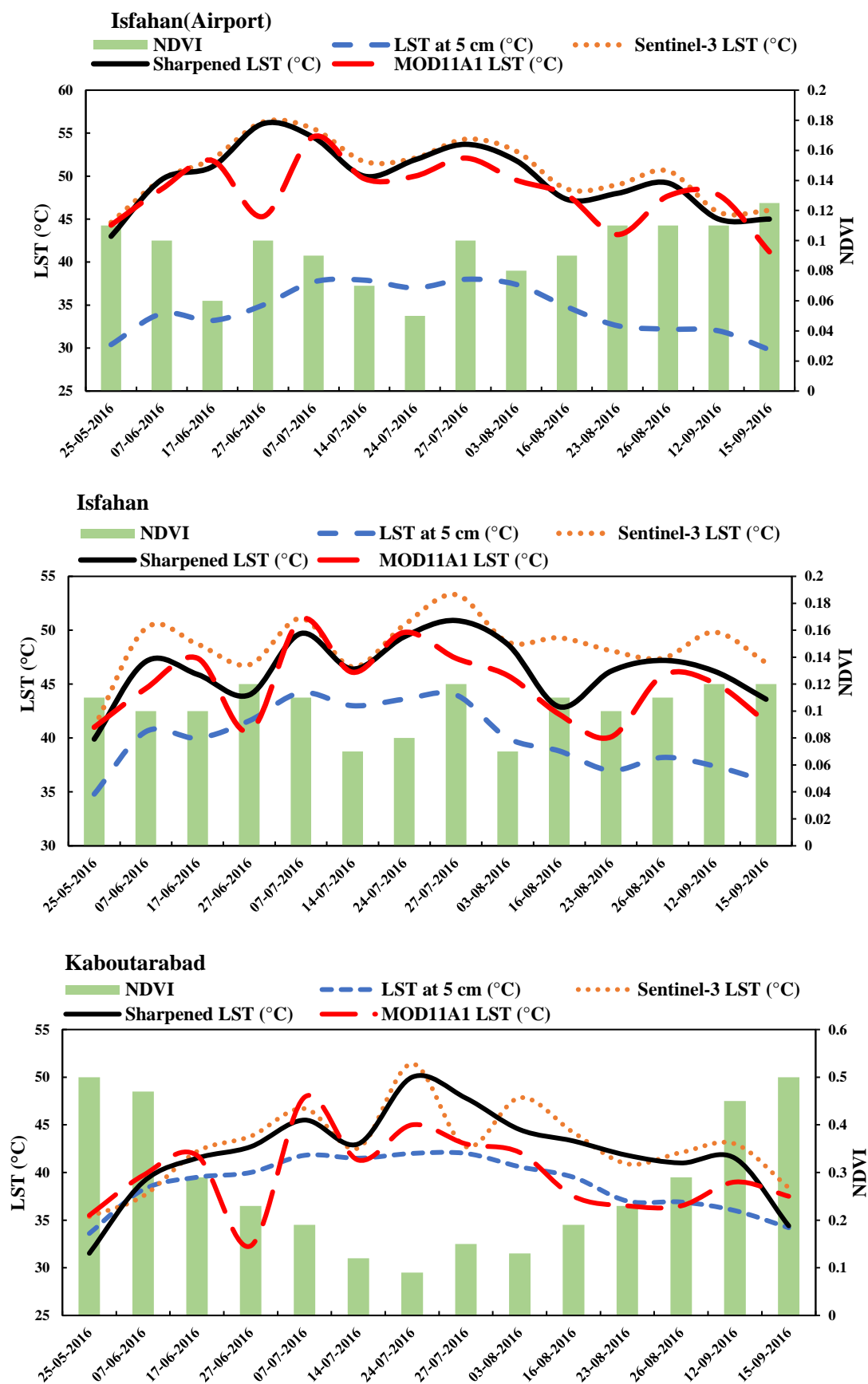
شده در ایستگاه‌ها، اختلاف زیادی نسبت به دمای سطح زمین حاصل از داده‌های ماهواره‌ای دارند. این اختلاف در مقادیر دمای سطح داده ماهواره ای و متوسط دمای ۵ سانتیمتری خاک، در ایستگاه فرودگاه بیشتر از ایستگاه اصفهان و کبوتر آباد می‌باشد. براساس شکل ۶، برآورد دمای سطح زمین با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای همواره بیشتر از داده‌های زمینی ثبت شده است. در توضیح این امر باید عوامل مؤثر بر تغییرات دمای سطح خاک و تغییرات فصلی آن را مدنظر قرار داد. تابش خالص خورشیدی مهمترین عامل اثرگذار بر دمای خاک است و با توجه به فصل و فاصله زمین و خورشید، خالص انرژی خورشیدی دریافتی در سطح خاک (تابش طول موج کوتاه خالص منهای تابش طول موج کوتاه برگشتی از سطح) طی این فصول گرم افزایش می‌یابد. به عنوان مثال مطالعات میدانی انجام شده در چین نشان می‌دهد اختلاف دمای سطح و اعماق خاک اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی از بهار تا اواسط تابستان افزایش و سپس کاهش می‌یابد به طوری که اختلاف دمای سطح و دمای عمق ۵ سانتیمتری در ماه جولای و آگوست به بیش از ۵ درجه سانتیگراد می‌رسد (شکل ۷)، همچنین اختلاف بین دمای سطح خاک حاصل از داده‌های ماهواره‌ای مادیس با دمای خاک در سطح و عمق ۵ سانتیمتری به ترتیب به طور تقریبی بیش از ۱۰ و ۱۲ درجه سانتیگراد گزارش شده است (Huang et al., 2020). به علاوه اثر پوشش گیاهی نیز در ایجاد خطا می‌تواند اثرگذار باشد، به عنوان مثال با توجه به شکل ۶ در ایستگاه فرودگاه اصفهان، بازه‌ی تغییرات دمای ثبت‌شده در حدود ۳۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس است، در حالی که دمای حاصل از تصاویر ماهواره‌ای در حدود ۴۰ تا ۵۵ درجه سلسیوس است، که با توجه به NDVI از ۰/۱۴ در این ایستگاه و با توجه به دوره مطالعاتی که در فصل گرم سال است، چندان دور از انتظار نیست.

باتوجه به اینکه دوره مطالعاتی پژوهش حاضر در طول تابستان (ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر) انجام گرفته است که بیشترین میزان تابش خورشیدی دریافتی سطح وجود دارد، که می‌تواند یکی دیگر از دلایل انحراف بالای دمای سطح زمین ماهواره‌ای نسبت به داده‌های زمینی باشد. علاوه بر این، از علل اختلاف بین داده‌های دمای سطح ماهواره‌ای و دمای سطح در عمق ۵ سانتی متری، می‌توان به عدم قطعیت ناشی از مقایسه یک پیکسل دمای سطح (با اندازه یک کیلومتر مربع، ۹۰۰ و ۴۰۰ متر مربع) با داده‌های زمینی نقطه‌ای در محل ایستگاه‌ها اشاره نمود. در اکثر مطالعات انجام‌شده مربوط به روش‌های ریزمقیاس‌سازی، نتایج حاصل از الگوریتم مورد استفاده با محصولات دمای سطح ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی بالا مقایسه شده‌اند. همچنین در بسیاری از مطالعات، دمای سطح زمین حاصل از الگوریتم ریزمقیاس‌سازی، بعد از انجام ریزمقیاس‌سازی مجدداً به پیکسل‌های بزرگتر بازنمونه‌برداری و با محصول دمای سطح زمین قبل از انجام ریزمقیاس‌سازی مقایسه شد. در حالت کلی، در این مطالعه الگوریتم PyDMS، بعد از ریزمقیاس‌سازی حاصل از تلفیق داده‌های سنتینل ۲ و سنتینل ۳، نسبت به داده‌های نقطه‌ای اعتبارسنجی شد که مقایسه داده‌های نقطه‌ای نسبت به داده‌های ماهواره‌ای به خودی خود دارای عدم قطعیت است. همچنین، علت دیگر می‌تواند ناشی از فاصله زمانی بین ثبت داده‌های زمینی و زمان گذر ماهواره (که در بعضی از روزها تا ۹۰ دقیقه بوده است) باشد.

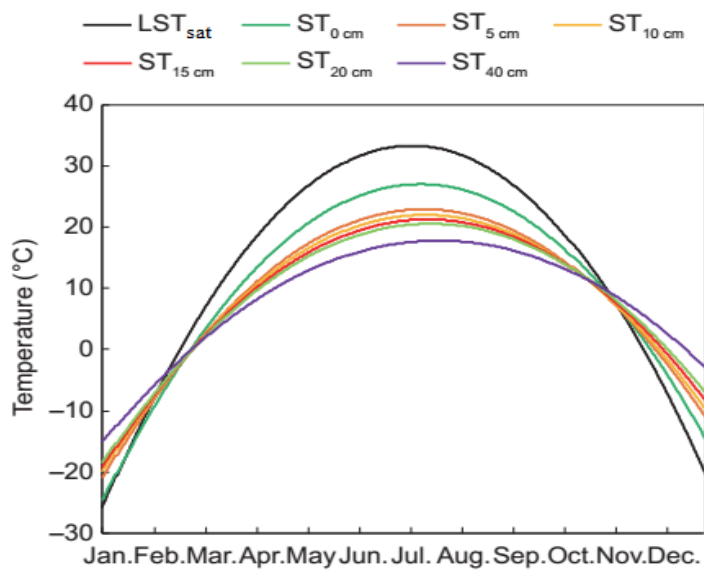
بررسی رابطه‌ی شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی و دمای سطح زمین

به منظور ارزیابی دمای سطح برآورد شده از مدل PyDMS و بررسی ارتباط آن با پوشش گیاهی، ارتباط بین دمای سطح زمین و NDVI در ایستگاه کبوترآباد بررسی شد. علت انتخاب این نقطه بازه‌ی تغییرات مناسب نرمال‌شده پوشش گیاهی در طول دوره می‌باشد. همانطور که در شکل‌های ۶ و ۹ مشاهده می‌شود، در ابتدای دوره در فصل بهار با توجه به وجود پوشش گیاهی نسبتاً متراکم (شاخص NDVI بالا)، میزان دمای سطح زمین کمتر از اواسط دوره است که NDVI کاهش می‌یابد. در انتهای دوره مطالعاتی نیز مجدداً با افزایش میزان تراکم پوشش گیاهی و همزمان کاهش دمای هوا، دمای سطح زمین کاهش داشته است. شکل ۹ نیز همبستگی معکوس بین مقادیر NDVI و دمای سطح زمین را نشان می‌دهد، با توجه به این شکل و از آنجایی که در دو ایستگاه اصفهان و فرودگاه اصفهان، میزان NDVI در طول دوره مطالعاتی تغییرات چندانی ندارد (تا حداکثر ۰/۱۳)، میزان همبستگی بین دمای سطح زمین حاصل از الگوریتم PyDMS و NDVI خیلی کم است. در ایستگاه کبوترآباد به علت وجود پوشش گیاهی متراکم و تغییرات NDVI در طول دوره مطالعاتی، همبستگی خوبی بین دمای سطح زمین و NDVI وجود دارد.

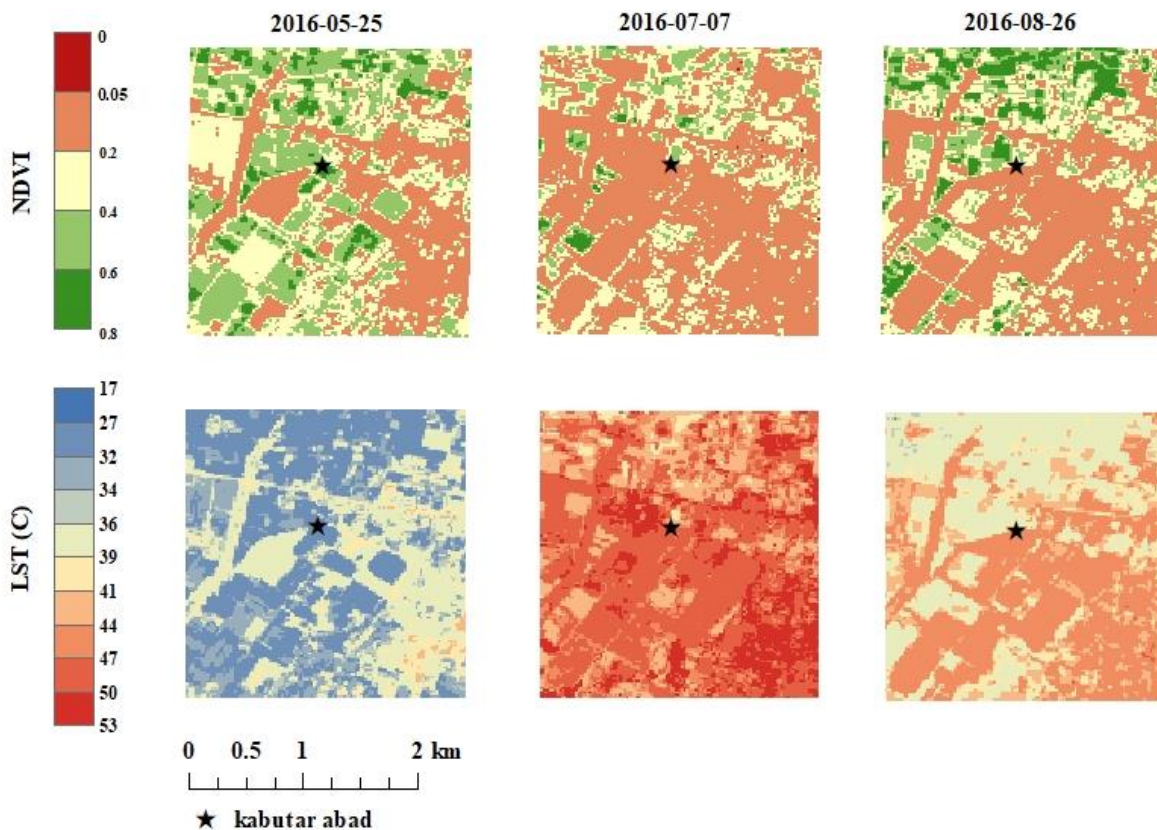
این نتایج، با الگوهای گزارش شده در تحقیقات پیشین سازگار است. مطالعات نشان داده‌اند که در حالت کلی اثر پوشش گیاهی سطح روی دمای سطح خاک وابسته به تراکم گیاه و فصل است به طوری که در نواحی دارای پوشش گیاهی تنک ($NDVI < 0.2$)، به علت وجود پوشش گیاهی آبدوی سطحی نسبت به سطح خاک بایر، کاهش یافته و میزان انرژی تابش خورشیدی خالص دریافتی سطح بیشتر شده و در نتیجه دمای سطح خاک افزایش می‌یابد. اما در سطوح با پوشش گیاهی متراکم این اثر متفاوت است و بصورت اثر خنک‌کنندگی (cooling effect) ظاهر می‌شود. به این



شکل ۶- تغییرات زمانی متغیر دمای سطح زمین حاصل از تصاویر مادیس، سنتینل ۳، الگوریتم PyDMS و داده‌های اندازه‌گیری زمینی در طول دوره مطالعاتی.

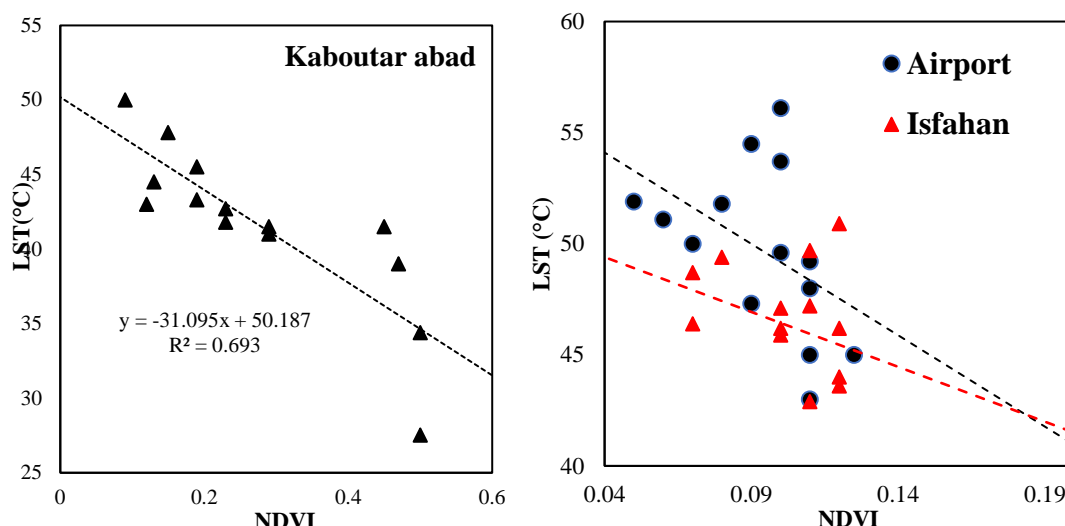


شکل ۷- مقایسه تغییرات فصلی پروفیل دمای سطح خاک اندازه‌گیری شده در اعماق مختلف و دمای سطح حاصل از داده‌های ماهواره‌ای (Huang et al., 2020)



شکل ۸- نقشه‌ی تغییرات شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی و دمای سطح زمین در ایستگاه کبوترآباد در طول دوره مطالعاتی.

صورت که طی فصولی که NDVI افزایش می‌یابد بخاطر جذب بالای بخشی از انرژی تابشی رسیده به سطح توسط توده گیاه، دمای خاک کاهش می‌یابد (Tan et al., 2022). مشابه این اثر را در رابطه NDVI و دمای سطح خاک ماهواره ای و زمینی در حالت اول (پوشش گیاهی تنک) در دو ایستگاه اصفهان و فرودگاه اصفهان و در حالت دوم (پوشش گیاهی متراکم با رشد متناسب با فصل) در ایستگاه کبوتر آباد می‌توان مشاهده نمود (شکل ۶).



شکل ۹- رابطه بین شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی و دمای سطح زمین در دوره مطالعاتی در ایستگاه‌های هواشناسی.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه عملکرد مدل PyDMS برای تولید نقشه دمای سطح زمین در مقیاس مکانی ۲۰ متری با استفاده از تصاویر سنتینل ۳ و ۲ ارزیابی شد و خروجی مدل با داده‌های اندازه‌گیری زمینی متوسط دمای خاک در عمق پنج سانتی‌متری در سه ایستگاه سینوپتیک محدوده اصفهان محصول دمای سطح لندست ۸، اعتبارسنجی شد.

از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به نبود داده‌های اندازه‌گیری شده دمای سطح زمین (در عمق کمتر از ۱ سانتی متر) و استفاده از دمای متوسط عمق متوسط ۵ سانتی‌متری برای مقایسه خروجی مدل اشاره کرد که منجر به مقادیر خطای بیشتر نسبت به مطالعات مشابه در سایر کشورها شده است. از این رو در مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود، دمای سطح زمین بدست آمده از تصاویر ماهواره‌ای با داده‌های دمای سطح خاک در سطح مقایسه شود که احتمالاً منجر به کاهش اختلاف داده‌های اندازه‌گیری زمینی و دمای سطح زمین منتج شده از تصاویر ماهواره‌ای خواهد شد. در مطالعات تکمیلی تحلیل تغییرات دمای سطح خاک در عمق با تلفیق مدل‌سازی و داده‌های ماهواره ای نیز می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

به علاوه با توجه به عملکرد بهتر محصول دمای سطح سنجنده مادیس نسبت به سنتینل ۳ (با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتری)، ریزمقیاس‌سازی تصاویر مادیس بر اساس سنتینل ۲ با استفاده از الگوریتم PyDMS نیز می‌تواند برای تولید نقشه‌های دمای سطح زمین بتوان تفکیک مکانی و زمانی بالا مورد بررسی قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می‌گردد ارزیابی عملکرد الگوریتم PyDMS در سایر مناطق کشور با اقلیم‌های مختلف و پوشش سطح متنوع (مانند زمین‌های بایر، باغات، جنگل‌ها، آب، برف و غیره) نیز صورت گیرد.

نتایج این پژوهش نشان داد که الگوریتم PyDMS عملکرد مناسبی در تولید لایه دمای سطح زمین با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا دارد که در مطالعات مدیریت منابع آب، محیط‌زیست و کشاورزی حائز اهمیت می‌باشد. همچنین، از دیدگاه مدیریت مصارف آب حوضه و برنامه ریزی آبیاری، لایه دمای سطح زمین از ورودی‌های مهم در مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق واقعی مبتنی بر بیلان انرژی سطح و سنجنش از دور (نظیر TSEB، SEBAL، METRIC و SSEBop) می‌باشد و در اختیار داشتن نقشه اعتبارسنجی شده دمای سطح زمین با توان تفکیک مکانی و زمانی بالا، امکان توسعه و استفاده عملیاتی از این مدل‌ها را برای کاربردهای با دقت بالا فراهم می‌کند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- پهلوان‌زاده، نوشین؛ جانعلی پور، میلاد؛ عباس‌زاده طهرانی، نادیا و فرهنگ، فریناز (۱۳۹۸). بهبود صحت استخراج دمای سطح زمین از باندهای حرارتی ماهواره لندست با استفاده از رگرسیون خطی و مشاهدات زمینی. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۰ (۳)، ۵۹-۷۸.
- خدافلی، مرتضی؛ صبوچی، راضیه و اسکندری، ذبیح‌الله (۱۳۹۳). تحلیل روند گذشته و پیش‌بینی آینده خشک‌سالی در استان اصفهان. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۸ (۶۷)، ۳۶۷-۳۷۹.



فرجی، زهره؛ کاویانی، عباس و دانش کار آراسته، پیمان. (۱۴۰۰). ارزیابی روش‌های ریزمقیاس‌سازی DisTRAD و TsHARP به‌منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی تصاویر حرارتی سنجنده مادیس. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۱۱(۲). ۱۳۳-۱۴۷.

اکبری، داوود و مرادی‌زاده، مینا. (۱۳۹۶). بهبود قدرت تفکیک مکانی باندهای حرارتی با استفاده از شاخص پوشش گیاهی و سطوح غیرقابل نفوذ. سنجش از دور و GIS ایران. سال نهم، شماره سوم. ۳۳-۴۴.

REFERENCES

- Agam, N., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Li, F., & Neale, C. M. U. (2007). A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery. *Remote Sensing of Environment*, 107(4), 545–558. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.10.006>
- Akbari, D., & Moradzadeh, Mina. (2017). Enhancement of Spatial Resolution of Thermal Bands Using Vegetation and Impervious Surface Indices. *Iranina Remote Sensing & GIS*. Vol. 9, No. 3. 33-44. (In Persian)
- Anderson, M. C., Norman, J. M., Kustas, W. P., Houborg, R., Starks, P. J., & Agam, N. (2008). A thermal-based remote sensing technique for routine mapping of land-surface carbon, water and energy fluxes from field to regional scales. *Remote Sensing of Environment*, 112(12), 4227–4241. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.07.009>
- Ataei, H., & Hasheminasab, S. (2015). Evaluation and zoning of air pollution in Isfahan using ArcGIS software. *1st National Conference on Environmental Science, Payam Noor University, Isfahan, Iran*.
- Drusch, M., del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Duan, S. B., Li, Z. L., Li, H., Göttsche, F. M., Wu, H., Zhao, W., Leng, P., Zhang, X., & Coll, C. (2019). Validation of Collection 6 MODIS land surface temperature product using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 225, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.020>
- Ermida, S. L., Soares, P., Mantas, V., Göttsche, F. M., & Trigo, I. F. (2020). Google earth engine open-source code for land surface temperature estimation from the landsat series. *Remote Sensing*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/RS12091471>
- Faraj, Z., Kaviani, A., & Daneshkar Arasteh, P. Evaluation of DisTRAD and TsHARP Sharpening methods in order to increase the spatial resolution of MODIS thermal images. (2021). *Journal of water and soil resources protection*. 11(2). 133-147. (In Persian)
- Gao, F., Kustas, W. P., & Anderson, M. C. (2012). A data mining approach for sharpening thermal satellite imagery over land. *Remote Sensing*, 4(11), 3287–3319. <https://doi.org/10.3390/rs4113287>
- Guzinski, R., & Nieto, H. (2019a). Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 and Sentinel-3 satellites for high-resolution evapotranspiration estimations. *Remote Sensing of Environment*, 221, 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.019>
- Guzinski, R., & Nieto, H. (2019b). Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 and Sentinel-3 satellites for high-resolution evapotranspiration estimations. *Remote Sensing of Environment*, 221, 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.019>
- Guzinski, R., Nieto, H., Sandholt, I., & Karamitlios, G. (2020). Modelling high-resolution actual evapotranspiration through Sentinel-2 and Sentinel-3 data fusion. *Remote Sensing*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/RS12091433>
- Harris, S., Veraverbeke, S., & Hook, S. (2011). Evaluating spectral indices for assessing fire severity in chaparral ecosystems (Southern California) using modis/aster (MASTER) airborne simulator data. *Remote Sensing*, 3(11), 2403–2419. <https://doi.org/10.3390/rs3112403>
- Huang, R., Huang, J., Zhang, Ch., & Ma, H., Zhuo, W., Chen, Y., & Zhu, D., Wu, Q., Mansaray, L. (2020). Soil temperature estimation at different depths, using remotely-sensed data. *Journal of Integrative Agriculture*. 19. 277-290. [10.1016/S2095-3119\(19\)62657-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62657-2).
- Huryana, H., Cohen, Y., Karnieli, A., Panov, N., Kustas, W. P., & Agam, N. (2019). Evaluation of TsHARP utility for thermal sharpening of Sentinel-3 satellite images using Sentinel-2 visual imagery. *Remote Sensing*, 11(19). <https://doi.org/10.3390/rs11192304>
- Jeganathan, C., Hamm, N. A. S., Mukherjee, S., Atkinson, P. M., Raju, P. L. N., & Dadhwal, V. K. (2011). Evaluating a thermal image sharpening model over a mixed agricultural landscape in India. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(2), 178–191. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.11.001>

- Khodaghli, M. (2008). The final report of drought zoning in Isfahan Province. The Center of agricultural research and natural resources of Isfahan Province. (In Persian)
- Malakar, N. K., Hulley, G. C., Hook, S. J., Laraby, K., Cook, M., & Schott, J. R. (2018). An Operational Land Surface Temperature Product for Landsat Thermal Data: Methodology and Validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(10), 5717–5735. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2824828>
- Pahlevanzadeh, N., Janalipour, M., abbaszadeh teharni, N., and farhanj, F. (2019). Accuracy Improvement of Land Surface Temperature Extracted from Thermal Bands of Landsat Satellite using Linear Regression and Ground Observations. *Geography and Environmental Planning*, 30(3), 59-78. 10.22108/gep.2019.118336.1179. (In Persian)
- Slayer, K. (2022). Landsat 8-9 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide. *Department of the Interior U.S. Geological Survey*.
- Song C Y, Jia L, Menenti M. 2014. Retrieving high-resolution surface soil moisture by downscaling AMSR-E brightness temperature using MODIS LST and NDVI data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7, 935–942.
- Tran, D. X., Pla, F., Latorre-Carmona, P., Myint, S. W., Caetano, M., & Kieu, H. v. (2017). Characterizing the relationship between land use land cover change and land surface temperature. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 124, 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.01.001>
- Tan X, Luo S, Li H, Hao X, Wang J, Dong Q, Chen Z. Investigating the Effects of Snow Cover and Vegetation on Soil Temperature Using Remote Sensing Indicators in the Three River Source Region, China. *Remote Sensing*. 2022; 14(16):4114. <https://doi.org/10.3390/rs14164114>
- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Wang, J. W., Chow, W. T. L., & Wang, Y. C. (2020). A global regression method for thermal sharpening of urban land surface temperatures from MODIS and Landsat. *International Journal of Remote Sensing*, 41(8), 2986–3009. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1697009>
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- Zhanga, Y., Odeh, I. O. A., & Ramadan, E. (2013). Assessment of land surface temperature in relation to landscape metrics and fractional vegetation cover in an urban/peri-urban region using landsat data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(1), 168–189. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.712227>