



## Land Surface Temperature (LST) Calibration for Accurate Estimation of Air Temperature Using Mathematical Models and Meteorological Station Observations

Reza Soodmand Afshar.<sup>1</sup> and Salman Ahmadi.<sup>\*2</sup>

1. M.Sc Student of Remote Sensing, Dep. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
2. Assistant prof., Dep. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

### Abstract

The land surface temperature is a vital parameter in environmental studies, climate change, soil moisture content, evapotranspiration and urban thermal islands at different scales. The main purpose of this paper is to calculate the Land surface temperature (LST) using the split window model applied to Landsat 8 OLI and TIRS band images and calibrate it by a rational function properly. The split window algorithm uses spectral radiance and emissivity parameters. The spectral radiance parameter is obtained from TIRS bands of Landsat 8 and land surface emissivity is also calculated using the fractional index and NDVI vegetation index for TIRS sensor thermal bands. Also, in this study, with the help of air temperature of meteorological stations, the temperature obtained from the split window model is calibrated by Rational Functions to estimate the near-surface air temperature accurately. In his way, one optimal models of rational functions were selected for calibration of Land surface temperature to estimate near surface air temperature which the RMSE of these models during the two calibration steps decreased from 13.464 °C to 13.169 °C and 0.668 °C. According to the results of this study, it can be concluded that the degree and number of terms in the rational functions have a very great impact on the results of the proposed model and choosing the best terms increase the accuracy of these functions.

**Keywords:** Land Surface Temperature (LST), Calibration, Split-Window (SW) Algoritm, Landast 8, Rational Function.

\* Correspondence Address: Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Pasdaran Boulevard, Sanandaj, Postal Code: 66177-15175. Tel: 09126721769, 087-33664600-8.  
Email: s.ahmadi@uok.ac.ir  
<https://doi.org/10.52547/gisj.12.3.103>



سخن از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال دوازدهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۹  
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.12, No. 3, Autumn 2020

۱۲۲-۱۰۳

مقاله پژوهشی

## کالیبراسیون دمای سطح زمین به منظور برآورد دقیق دمای هوای نزدیک به سطح زمین، با استفاده از مدل‌های ریاضی و مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی

رضا سودمند افشار<sup>۱</sup> و سلمان احمدی<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناس ارشد سنجش از دور، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۲. استادیار فتوگرامتری و سنجش از دور، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۷/۲۹

### چکیده

دمای سطح زمین پارامتری بسیار مهم و کلیدی در بررسی‌های زیست‌محیطی، تغییرات آب‌وهوایی، رطوبت خاک، درصد تبخیر و تعرق و جزایر گرمایی شهری شمرده می‌شود. هدف از پژوهش حاضر محاسبه دمای سطح زمین، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و کالیبراسیون آن، با استفاده از مدل‌های ریاضی غیرخطی است. در این پژوهش، به منظور محاسبه دمای سطح زمین، از الگوریتم پنجره مجزا استفاده شده است. در ادامه، از کالیبراسیون دمای حاصل از این الگوریتم به کمک توابع ریاضی رشنال، دمای نزدیک سطح زمین به دست آمده است. الگوریتم پنجره مجزا، برای برآورد دمای سطح زمین، از رادیانس طیفی و گسیل‌مندی سطح زمین استفاده می‌کند. به منظور تخمین رادیانس طیفی، از باندهای حرارتی سنجنده TIRS ماهواره لندست ۸ استفاده شده است. گسیل‌مندی سطح زمین نیز، به کمک شاخص کسر گیاهی و شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، برای باندهای حرارتی سنجنده TIRS محاسبه شده است. همچنین، در این پژوهش، با کمک سری زمانی دمای هوای ایستگاه‌های هواشناسی، دمای حاصل از مدل پنجره مجزا با استفاده از توابع رشنال کالیبره شد تا دمای هوای نزدیک سطح زمین با دقت بالایی برآورد شود. نتایج مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که کالیبراسیون دمای منتج از مدل پنجره مجزا، با استفاده از توابع رشنال، باعث کاهش میزان خطای RMSE در دو مرحله کالیبراسیون از ۱۳.۴۶۴ درجه سانتی‌گراد، به ترتیب، به ۱۳.۱۶۹ درجه سانتی‌گراد و در نهایت، به ۰.۶۶۸ درجه سانتی‌گراد شده است. با توجه به نتایج و بررسی‌ها، می‌توان گفت که درجه و تعداد ترم‌های موجود در معادلات رشنال در نتایج کالیبراسیون تأثیر بسیاری دارند و انتخاب بهترین مدل می‌تواند دقت این توابع را افزایش دهد.

کلیدواژه‌ها: دمای سطح زمین، کالیبراسیون، الگوریتم پنجره مجزا، لندست ۸، توابع رشنال.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: سنندج، بلوار پاسداران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، کدپستی: ۱۵۱۷۵-۶۶۱۷۷، تلفن: ۰۸۷-۳۳۶۶۴۶۰۰-۸

## ۱- مقدمه

انجام شده در زمینه اعتبارسنجی دمای سطح زمین، با به کارگیری روابط رگرسیونی، معادلات ریاضی و استفاده از دمای ایستگاه‌های هواشناسی، رابطه‌ای برای محاسبه دمای نزدیک سطح زمین، با استفاده از دمای سطح آن، پیشنهاد شده است.

مطالعات برآورد دمای هوای نزدیک سطح زمین در مطالعات کاربردی تغییرات آب‌وهوایی و تأثیرات زیست‌محیطی، مطالعات تنش‌های آبی به منظور بهبود تعادل آب، ارزیابی خطر آتش‌سوزی، مطالعات درباره افزایش شدید درجه حرارت و نقش آن در به وجود آمدن جزایر گرمایشی شهری، و بررسی شیوع برخی بیماری‌های حاصل از گزش پشه‌ها در فصل‌های گرم سال در برخی نقاط جهان بسیار مؤثر است (Benali et al., 2012). محدودیت‌های زمانی و مکانی، همچون وابستگی به داده‌های حرارتی ماهواره‌هایی مانند مادیس و لندست، از محدودیت‌های اساسی در برآورد دمای هوای نزدیک سطح زمین محسوب می‌شود. از سویی، در ماهواره لندست فقط یک برداشت در طول روز ثبت می‌شود. به دلیل زمان تصویربرداری شانزده‌روزه لندست، به‌ناچار باید از تصاویر دیگر ماهواره‌ها، مانند مادیس، در زمان‌های خالی استفاده کرد. خود این امر، به‌تنهایی، موجب ایجاد خطا در مدل‌سازی دمای هوای نزدیک سطح زمین، با استفاده از دمای سطح زمین، می‌شود (Hough et al., 2020). از دیگر سو، مطابق با نتایج پژوهش یو<sup>۱</sup> و همکارانش (۲۰۱۸) به‌منظور برآورد بیشینه و کمینه دمای هوای نزدیک سطح زمین، می‌توان گفت عواملی، همچون نسیم دریا و کوه‌ها، در برآورد بیشینه و اختلاف دمای بین سازه‌ها و پوشش گیاهی در مناطق شهری، در برآورد کمینه دمای هوای نزدیک سطح زمین، مؤثرند.

دمای سطح زمین در مطالعات گوناگونی همچون مدل‌سازی تبخیر و تعرق (Serafini, 1987; Bussieres et al., 1990)، برآورد رطوبت خاک (Price, 1980)، مطالعات اقلیمی، هیدرولوژیکی، زیست‌محیطی، بیوفیزیکال و شیمیایی (Guo et al., 2015; Schmugge and André, 2012)، برآورد خشکسالی (Karnieli et al., 2010) و دیگر موارد کاربرد دارد. از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های تخمین دمای سطح زمین<sup>۱</sup>، روش پنجره مجزا<sup>۲</sup> و تک‌کاناله<sup>۳</sup> و پنجره تکی<sup>۴</sup> است. الگوریتم پنجره مجزا تأثیرات جوئی را، از طریق جذب اتمسفر در دو کانال مجاور در محدوده فرورسرخ، به مرکزیت ۱۱ و ۱۲ میکرومتر حذف می‌کند و دمای سطح زمین را، با استفاده از ترکیب خطی و یا غیرخطی دمای روشنایی، به دست می‌آورد (Rongali et al., Du et al., 2015). در الگوریتم تک‌کاناله، وابستگی بسیار بالایی به مفهوم توابع جوئی<sup>۵</sup>، در کنار وابستگی به مفاهیمی مانند انتقال جو و ارتعاش و نزول پرتوهای جوئی، وجود دارد. باین‌حال، این تکنیک به دانش دقیق در مورد پارامترهای جوئی، همچون انتقال‌پذیری<sup>۶</sup> و تابش‌های پایدار و نزولی جوئی<sup>۷</sup>، بسیار نیاز دارد که در برخی مناطق امکان‌پذیر نیست. برای حل مشکل مورد نظر، پارامترهای در دسترس مانند ستون بخار آب جوئی و دمای هوا استفاده می‌شوند (Jiménez-Muñoz 2008 et al.). در این روش، میزان تابش طیفی (رادینانس طیفی) دریافتی از عوارض زمینی را که با استفاده از پروفیل‌های اتمسفری، همانند رطوبت نسبی و فشار و دما، و از طریق رادیوسوندهای قراردادی<sup>۸</sup> فراهم می‌شود، نیز در یک تک‌کانال و پنجره اتمسفری اندازه‌گیری می‌کنند و در نهایت، میرایی باقی‌مانده در تابش طیفی دریافتی تصحیح می‌شود (Hook et 1985; Price, 1983). (al., 1992; Chedin et al.,

دمای حاصل از الگوریتم‌های گوناگون برآورد دمای سطح زمین با دمای اندازه‌گیری شده در نزدیکی سطح زمین متفاوت است. بر این اساس، در تحقیقات

1. Land Surface Temperature (LST)
2. Split-Window
3. Single-Channel (SC)
4. Single-Window
5. Atmospheric Functions (AFs)
6. Transmissivity
7. Atmospheric Upwelling and Downwelling Radiances
8. Conventional Radiosonde
9. Yoo

داراست. در پژوهش یانگ و همکاران (۲۰۰۴)، با استفاده از روش‌های درون‌یابی و داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، خطای برآورد دمای نزدیک سطح از ۱۰ به ۱.۵۶ درجه سانتی‌گراد، همراه با همبستگی ۰.۹۴، کاهش یافته است. میلر و میلیس<sup>۶</sup> (۱۹۸۹) نیز از روش کالیبراسیون دمای سطح زمین، با استفاده از داده‌های مشاهدات زمینی، در منطقه دریاچه سالت‌گریت ایالت یوتا استفاده کردند. در تحقیقاتی دیگر، به‌منظور کاهش تأثیرات ناشی از جذب طیفی بخار آب در باند فرسرخ، از تصاویر ماهواره‌هایی با قدرت تفکیک طیفی بالا استفاده شده که، در نهایت، این کار موجب افزایش دقت برآورد شاخص پوشش گیاهی<sup>۷</sup> شده است (Rongali et al., 2018a; Barsi et al., 2003).

هدف مطالعه حاضر برآورد دمای هوای نزدیک سطح زمین، با استفاده از دمای سطح زمین حاصل از روش پنجره مجزا، از راه توابع ریاضی رشنال<sup>۸</sup> است. دلیل اصلی استفاده از این توابع، برای کالیبراسیون دمای سطح زمین، سادگی و نیازنداشتن به داده‌های اضافی مانند پارامترهای جوّی است. بر این اساس، در این تحقیق، دقت مدل‌های ریاضی توابع رشنال برای کالیبراسیون دمای سطح زمین حاصل از تصاویر ماهواره لندست ۸ بررسی و تحلیل شده است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- منطقه مطالعاتی

محاسبه پارامترهای مجهول توابع رشنال به دمای اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی نیازمند است. دقت توابع رشنال ارتباط بسیاری به تعداد ایستگاه‌های هواشناسی و پراکندگی جغرافیایی مناسب آنها دارد.

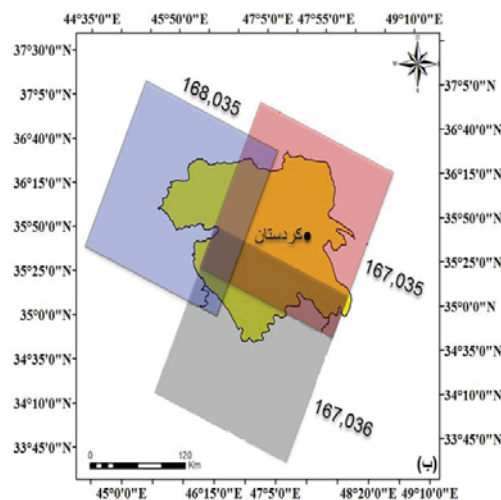
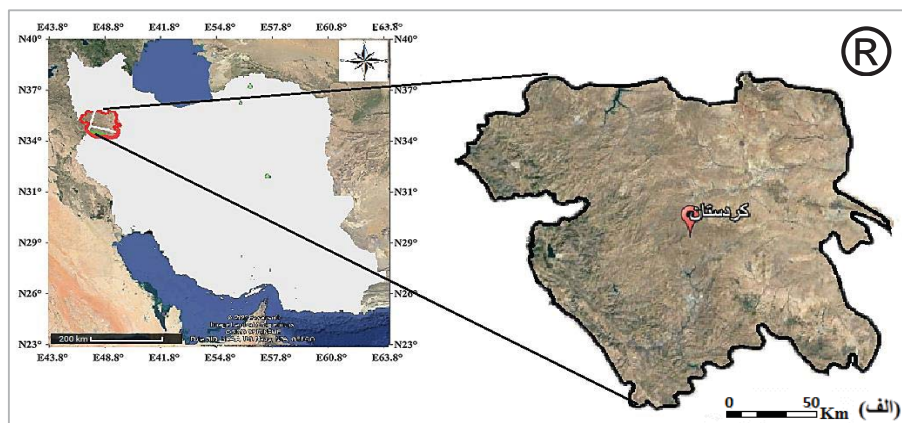
براساس نتایج تحقیق یانگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۷) برای برآورد دمای هوای نزدیک سطح زمین، با استفاده از دمای سطح زمین مادیس در شمال‌شرق چین می‌توان اظهار داشت که پوشش سطح زمین تأثیر به‌سزایی در برآورد دمای هوای نزدیک سطح زمین دارد. البته، در کنار آن، تغییرات فصلی و آثار آن در سطح زمین، که منجر به تغییرات زمانی در عملکرد و میزان دقت مدل می‌شود، نیز اثرگذار است. نتایج پژوهش ویلیامسون<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۴) نیز این اصل را نشان می‌دهد که ادغام داده‌های دمای هوای حاصل از روش‌های درون‌یابی، در کنار استفاده از دیگر داده‌های دمای سطح همچون داده‌های ماکروویو غیرفعال<sup>۳</sup>، ممکن است در کاهش خطای برآورد دمای هوای نزدیک سطح زمین، در کنار کاهش اثر ناشی از پوشش ابر، مؤثر واقع شود. در مطالعه‌ای دیگر که زنگ<sup>۴</sup> و همکاران در منطقه کمربند ذرت، در منطقه میانه غربی ایالات متحد انجام دادند، به عواملی همچون زمان گذر ماهواره، توده‌های هوایی مانند پوشش ابر و آبیاری پوشش گیاهی به‌منزله پارامترهای تأثیرگذار در دقت و خطای برآورد دمای هوای نزدیک سطح زمین اشاره شده است.

در پژوهش رضانی خوجین و همکاران (۱۳۹۴) در دشت شهرکرد با استفاده از داده‌های لندست ۸، به‌منظور کالیبراسیون دمای سطح زمین، وجودنداشتن ایستگاه‌های مرجع هواشناسی و داده‌های مشاهده‌ای دمای کانوبی و سطح خاک به‌منزله محدودیت‌های موجود در کالیبراسیون دمای سطح زمین در نظر گرفته شده است. همچنین، در این مطالعه، کالیبراسیون دمای سطح با استفاده از روش بازسازی داده‌های ایستگاهی انجام شده است و میزان خطای میانگین مربعات<sup>۵</sup> در محدوده ۱.۹-۲.۲ کلوین قرار دارد. نتایج تحقیق پهلوان‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از داده‌های مشاهدات زمینی در نواحی اطراف دریاچه ارومیه نشان داده که مدل‌های رگرسیون خطی توانایی مطلوبی در تصحیح داده‌های دمای سطح، به‌منظور کاهش خطا،

1. Yang
2. Williamson
3. passive microwave
4. Zeng
5. Root Mean Square Error (RMSE)
6. Miller and Millis
7. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
8. rational functions

عرض شمالی و  $۴۵^{\circ} ۳۱'$  تا  $۴۸^{\circ} ۱۶'$  طول شرقی قرار دارد. این استان منطقه‌ای کوهستانی است که، با ارتفاع متوسط ۲۰۰۰ متر از سطح دریا، از مرتفع‌ترین استان‌های کشور شمرده می‌شود. بیشتر بخش‌های استان کردستان دارای اقلیم نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای است و فقط بخش محدودی از غرب آن اقلیم نیمه‌مرطوب و مرطوب دارد (حنفی و حاتمی، ۱۳۹۲). در شکل ۱، موقعیت منطقه مطالعاتی در کشور ایران و نیز مرز تصاویر ماهواره‌ای در گذرهای ۳۵ و ۳۶ و میزان هم‌پوشانی آنها با منطقه مطالعاتی نشان داده شده است.

با توجه به محدود بودن تعداد ایستگاه‌های هواشناسی در سطح استان کردستان، برای بهبود دقت مدل پیشنهادی، از داده‌های دو ایستگاه کمکی دیگر، یکی در استان زنجان و دیگری در استان کرمانشاه، استفاده شده است. این داده‌ها در محدوده تصاویر لندست ۸ بوده‌اند و در تاریخ هفتم اوت ۲۰۱۴، چهاردهم اوت ۲۰۱۴، بیست‌وسوم اوت ۲۰۱۴، دهم اوت ۲۰۱۵ و دوازدهم اوت ۲۰۱۶ به صورت سری زمانی دریافت شده‌اند. استان کردستان، با مساحتی بالغ بر ۲۸۲۰۳ کیلومترمربع، در غرب ایران و بین  $۳۴^{\circ} ۴۴'$  تا  $۳۶^{\circ} ۳۰'$



شکل ۱. محدوده منطقه مطالعاتی: موقعیت منطقه مطالعاتی در ایران (الف)؛ هم‌پوشانی منطقه مطالعاتی با تصاویر ماهواره‌ای (ب)



گسیل مندی سطح زمین انجام شود. در فلوچارت شکل ۳، مراحل متفاوت روش پنجره مجزا آمده است.

### ۲-۳-۱-۱- محاسبه رادیانس طیفی

در این مرحله، داده‌های فروسرخ حرارتی، براساس مرجع تابش طیفی، به تصویر رادیانس طیفی تبدیل می‌شود که این خود نوعی کالیبراسیون داخلی سنجنده به‌شمار می‌رود. عدد ثبت‌شده از طریق سنجنده‌ها به‌صورت داده‌های هشتم‌بیتی است که در محدوده ۰ تا ۲۵۵ قرار می‌گیرد. برای تبدیل داده‌های فروسرخ حرارتی به تصویر رادیانس طیفی، از رابطه (۱) استفاده می‌شود (Barsi et al., 2014).

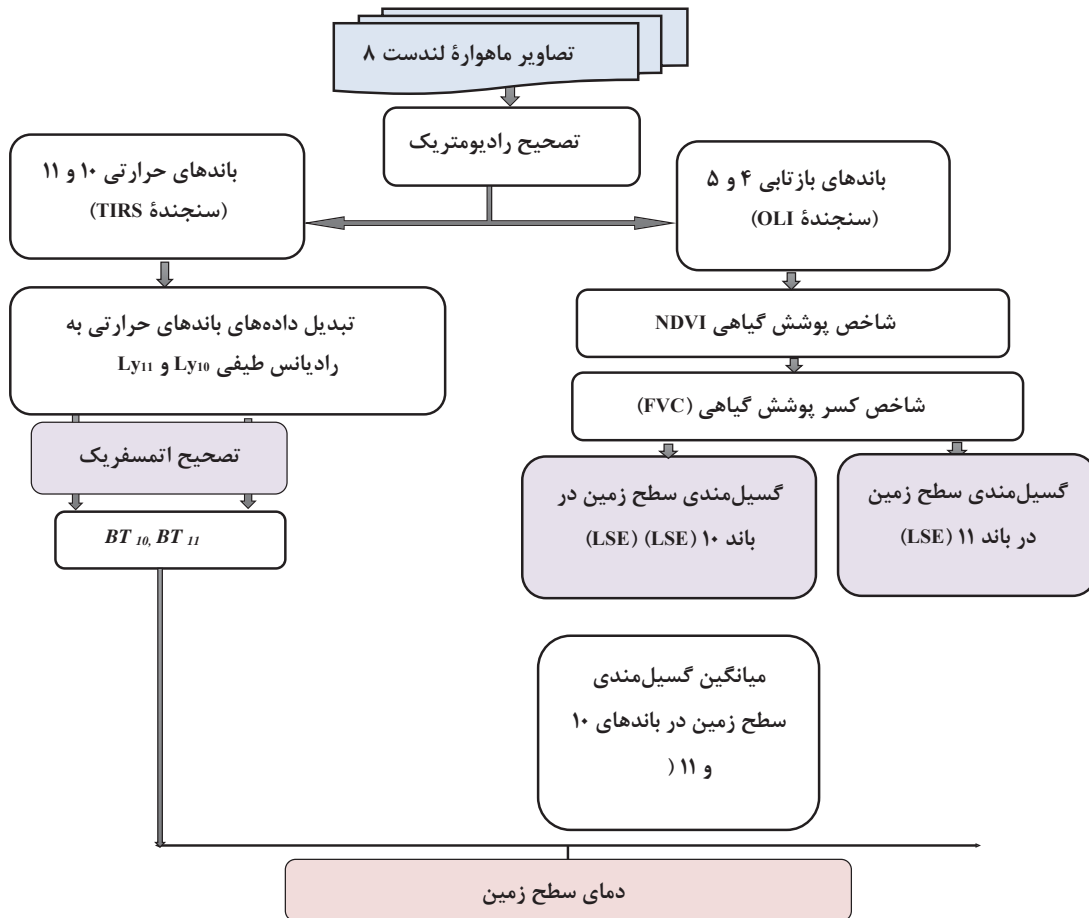
$$L_{\lambda} = (ML * DN) + AL \quad \text{رابطه (۱)}$$

### ۲-۳-۲- برآورد دمای هوای نزدیک سطح زمین به کمک توابع رشنال

مدل پیشنهادی در این تحقیق شامل دو مرحله اصلی محاسبه دمای سطح زمین به‌روش پنجره مجزا و کالیبراسیون دمای حاصل از این مدل برای برآورد دمای هوای نزدیک سطح زمین می‌شود.

### ۲-۳-۱- محاسبه دمای سطح زمین

مرحله نخست مدل پیشنهادی محاسبه دمای سطح زمین با استفاده از روش پنجره مجزا صورت می‌گیرد. برای انجام‌دادن این مرحله، باید مراحل فرعی دیگری مانند محاسبه شاخص گیاهی (NDVI)، رادیانس طیفی،



شکل ۳. فلوچارت روش پنجره مجزا برای برآورد دمای سطح زمین

۲-۳-۱-۴- شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) این شاخص اختلاف نرمال شده بین بازتابش در باندهای قرمز و فروسرخ نزدیک تصاویر ماهواره‌ای است که، در مطالعات گوناگونی، از جمله تعیین میزان پوشش گیاهی منطقه‌ها، به کار می‌رود. محدوده تغییرات این شاخص عددی بین +۱ و -۱ است. شاخص پوشش گیاهی نرمال شده طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود (Rouse et al., 1974).

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه (۳)،  $R_{NIR}$  بازتابندگی در باند فروسرخ نزدیک (در ماهواره لندست ۸، باند ۵) و  $R_{RED}$  بازتابندگی در باند قرمز (در ماهواره لندست ۸، باند ۴) است.

#### ۲-۳-۱-۵- شاخص کسر پوشش گیاهی<sup>۶</sup>

یکی از پارامترهای مؤثر در برآورد دمای سطح زمین، با دقت بهتر، گسیل‌مندی سطح زمین است که در بخش بعدی به آن پرداخته‌ایم. شاخص نسبت پوشش گیاهی برای محاسبه گسیل‌مندی سطح زمین بسیار مناسب است. به منظور محاسبه متغیر شاخص نسبت پوشش گیاهی، از شاخص پوشش گیاهی (NDVI) طبق رابطه (۴) استفاده می‌شود (Carlson and Ripley, 1997; Gutman and Ignatove, 1998).

$$FVC = \left( \frac{NDVI - NDVI_{Soil}}{NDVI_{Vegetation} - NDVI_{Soil}} \right)^2 \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه (۴)، متغیر NDVI شاخص پوشش گیاهی،  $NDVI_{Soil}$  و  $NDVI_{Vegetation}$  به ترتیب، شاخص NDVI خاک و پوشش گیاهی‌اند که برای محاسبه آنها دو راه‌حل وجود دارد. در راه‌حل نخست، مقادیر حداقل و حداکثر شاخص NDVI در منطقه مطالعاتی به‌منزله مقادیر NDVI خاک و NDVI پوشش گیاهی در نظر گرفته می‌شود و راه‌حل دوم هم این

در رابطه بالا، پارامتر  $L_{\lambda}$  متغیر رادیانس طیفی برحسب  $(W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1})$ ، مقادیر  $^1ML$  و  $^2AL$  به‌نوعی ضرایب کالیبراسیون اختصاصی باندهای ۱۰ و ۱۱ ماهواره لندست ۸ موجود در داده‌نمای تصویر<sup>۳</sup> و  $DN$  مقادیر درجات خاکستری باندهای ۱۰ و ۱۱ محسوب می‌شوند.

#### ۲-۳-۱-۲- تصحیحات اتمسفری<sup>۴</sup>

تصحیحات اتمسفری روی باند حرارتی تصاویر لندست باید پس از تبدیل آن به تصویر رادیانس طیفی انجام شود. این تصحیحات روی تصاویر رادیانس طیفی، به دلیل دستیابی به دقت‌های بالا در برآورد دمای سطح زمین، بسیار حیاتی و مهم است. از همین رو، اعمال این تصحیحات روی تصاویر رادیانس طیفی موجب افزایش دقت و کاهش میزان خطا در برآورد دمای سطح زمین می‌شود (Barsi et al., 2003).

#### ۲-۳-۱-۳- دمای روشنایی<sup>۵</sup> سطح زمین

پس از تبدیل باند حرارتی به رادیانس طیفی و انجام دادن کالیبراسیون، به کمک قانون پلانک، رادیانس طیفی به دمای روشنایی تبدیل می‌شود. دمای روشنایی برابر با دمای مورد نیاز برای جسمی سیاه است که بتواند انرژی معادل جسمی خاکستری را، در دمای معینی، ساطع کند (Artis and Carnahan, 1982).

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

در رابطه بالا،  $L_{\lambda}$  میزان تابندگی در باندهای ۱۰ و ۱۱، ضرایب  $K_1$  ثابت کالیبراسیون اول برحسب  $(W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1})$  و  $K_2$  ثابت کالیبراسیون دوم برحسب درجه کلوین محسوب می‌شوند (Chander et al., 2009). در جدول ۲، ضرایب ثابت مورد استفاده در مدل آمده است.

جدول ۲. ضرایب موجود و طول موج مورد استفاده در رابطه (۲)

برای محاسبه دمای روشنایی		
باند	$K_1$	$K_2$
۱۰	۷۷۷.۸۹	۱۳۲۱.۰۸
۱۱	۴۸۰.۸۹	۱۲۰۱.۱۴

1. Radiance Multi Band
2. Radiance Add Band
3. Header File
4. Atmospheric Correction
5. Brightness Temperature (BT)
6. Fractional Vegetation Cover (FVC)



۲-۳-۱-۸- تبدیل دمای روشنایی به دمای واقعی سطح

زمین

در نهایت، با استفاده از رابطه (۶)، دمای سطح زمین برحسب درجه کلوین به دست می‌آید (Sobrin et al., 1996).

$$LST = BT_{10} + C_1(BT_{10} - BT_{11}) + C_2(BT_{10} - BT_{11})^2 + C_0 + (C_3 + C_4W)(1 - \varepsilon) + (C_5 + C_6W)\Delta\varepsilon$$

رابطه (۶)

در رابطه بالا، LST دمای سطح زمین برحسب درجه کلوین، BT دمای روشنایی برحسب کلوین در باندهای ۱۰ و ۱۱، W ستون بخار آب (g/cm<sup>2</sup>) با مقدار ثابت ۰.۰۱۳ تا C<sub>0</sub> و ضرایب ثابت الگوریتم پنجره مجزاست (Jiménez-Muñoz et al., 2014). در جدول ۴، مقادیر این ضرایب ثابت آمده است. پارامترهای ε و Δε نیز، به ترتیب، میانگین گسیل‌مندی سطح در بین باندهای ۱۰ و ۱۱ و اختلاف گسیل‌مندی بین باندهای ۱۰ و ۱۱ است و از روابط زیر به دست می‌آید.

$$\varepsilon = 0.5(LSE_{10} - LSE_{11}) \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\Delta\varepsilon = (LSE_{10} - LSE_{11}) \quad \text{رابطه (۸)}$$

۲-۳-۲- کالیبراسیون دمای سطح زمین به کمک توابع

رشنال

در پژوهش حاضر، پس از محاسبه دمای سطح زمین از طریق الگوریتم پنجره مجزا، دمای برآوردشده با استفاده از مدل‌های ریاضی تصحیح و یا، به اصطلاح،

است که این دو پارامتر از اندازه‌گیری‌های زمینی به دست می‌آید (Song et al., 2017). در این مقاله، به دلیل اینکه امکان اندازه‌گیری زمینی وجود ندارد، راه‌حل اول برای محاسبه دو شاخص مذکور انتخاب شده است.

۲-۳-۱-۷- محاسبه گسیل‌مندی سطح زمین

گسیل‌مندی سطح زمین از جمله متغیرهایی است که در مطالعات و تحقیقات علوم زمین و محیط‌زیست کاربرد بسیاری دارد (Li et al., 2013). در محاسبه گسیل‌مندی، عواملی همچون پارامترهای وابسته به سطح تأثیرگذار است؛ از قبیل بافت، توپوگرافی، رطوبت و نیز قدرت تفکیک مکانی سنجنده (Rongali et al., 2018a). در این زمینه، از شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده می‌توان، با استفاده از داده‌های ماهواره لندست ۸، برای برآورد گسیل‌مندی سطح زمین استفاده کرد. در روش پنجره مجزا، هرچه اطلاعات ما از گسیل‌مندی سطح زمین، تأثیرات توپوگرافی و ویژگی‌های پروفیل‌های جوئی دقیق‌تر باشد، دقت برآورد دمای سطح زمین افزایش می‌یابد (Sobrin et al., 2004).

$$LSE = \varepsilon_s(1 - FVC) + \varepsilon_v * FVC \quad \text{رابطه (۵)}$$

در رابطه (۵)، پارامتر LSE نشان‌دهنده گسیل‌مندی سطح زمین، FVC شاخص کسر پوشش گیاهی، ε<sub>s</sub> گسیل‌مندی خاک بدون پوشش و ε<sub>v</sub> گسیل‌مندی پوشش گیاهی است. مقادیر مربوط به گسیل‌مندی خاک و گسیل‌مندی پوشش گیاهی در جدول ۳ درج شده است.

جدول ۳. مقادیر گسیل‌مندی

گسیل‌مندی	باند ۱۰	باند ۱۱
ε <sub>s</sub>	۰.۹۷۱	۰.۹۷۷
ε <sub>v</sub>	۰.۹۸۷	۰.۹۸۹

جدول ۴. ضرایب الگوریتم پنجره مجزا

ضرایب	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>
مقادیر	-۰.۲۶۸	۱.۳۷۸	۰.۱۸۳	۵۴.۳۰۰	-۲.۲۳۸	-۱۲۹.۲۰۰	۱۶.۴۰۰

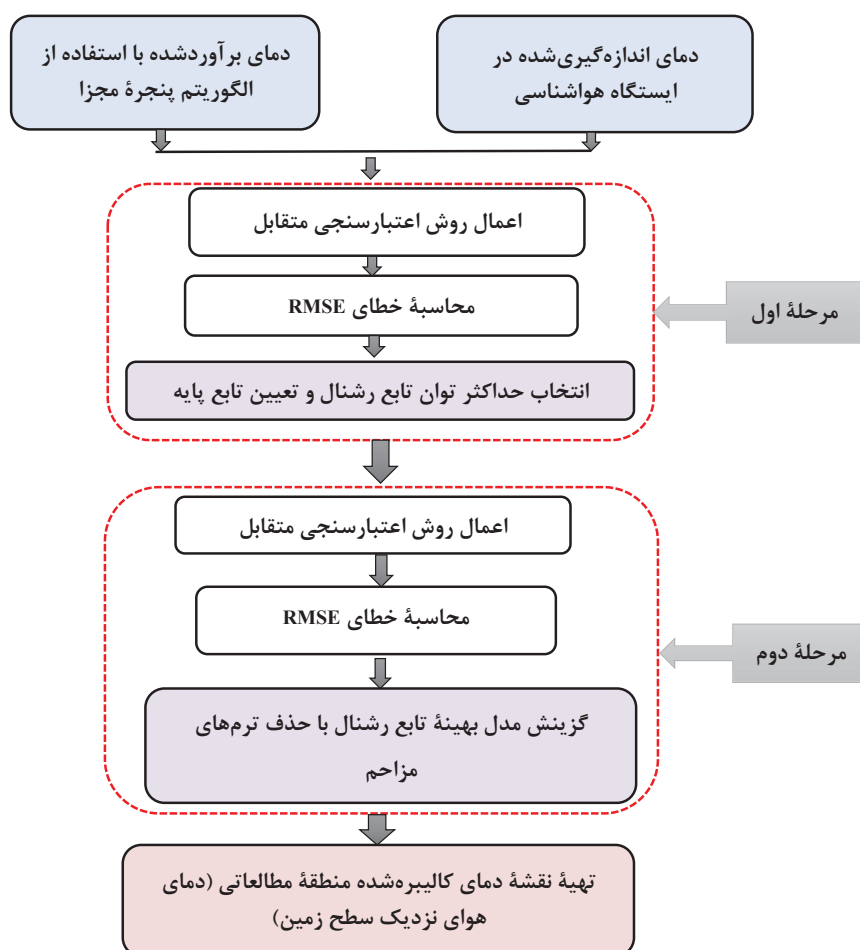
کالیبراسیون دمای سطح زمین به منظور برآورد دقیق دمای هوای نزدیک به سطح زمین ...

جوی و فیزیکی سطح زمین است. علاوه بر اینها، این توابع، در شرایط جغرافیایی و توپوگرافی و آب‌وهوایی متفاوت، انعطاف مناسبی در کالیبراسیون دمای سطح زمین دارد.

فرایند استفاده از توابع رشنال به منظور یادشده و برآورد دمای هوای نزدیک سطح زمین را می‌توان به سه مرحله اصلی تفکیک کرد: تعیین بزرگ‌ترین توان صورت و مخرج تابع رشنال؛ به‌دست‌آوردن تابع رشنال بهینه با حذف ترم‌های اضافی؛ و در آخر، تهیه نقشه دمای کالیبره شده (دمای هوای نزدیک سطح زمین) برای منطقه مطالعاتی. فلوجارت شکل ۴ مراحل اجرای مدل پیشنهادی را نمایش می‌دهد.

کالیبره می‌شود. هدف اصلی از کالیبراسیون دمای سطح زمین کاهش اختلاف میان دمای برآوردشده سطح زمین، با استفاده از تصاویر سنجش از دور، و دمای هوای نزدیک سطح زمین است.

همچنین، در این تحقیق، برای کالیبراسیون داده‌های دمای سطح زمین حاصل از مدل پنجره مجزا که روی تصاویر لندست ۸ اعمال شده، از توابع ریاضی رشنال استفاده شده است. این توابع در دانش‌های بسیار متنوعی مانند ریاضیات کاربردی، فتوگرامتری و بینایی ماشین به کار می‌روند. دلیل اصلی استفاده از این مدل در کالیبراسیون دمای سطح زمین سادگی آن، سرعت پردازش بالا و همچنین، نیازناشتن به داده‌های



شکل ۴. فلوجارت روش کالیبراسیون مورد استفاده در پژوهش حاضر، به منظور برآورد دمای هوای نزدیک سطح زمین

خلاصه  $L = A.X$  بازنویسی کرد که  $L$  ماتریس مشاهدات،  $A$  ماتریس ضرایب و  $X$  ماتریس مجهولات نامیده می‌شود. معادله (۱۱) را به روش کمترین مربعات می‌توان حل کرد (Rampal, 1976) و در نهایت، ماتریس مجهولات به صورت زیر به دست می‌آید:

$$X = (A^T * A)^{-1} * A^T * L \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

به منظور برآورد ماتریس مجهولات، به کمک دمای اندازه‌گیری شده در تعدادی از ایستگاه‌ها و قرار دادن آن در رابطه (۱۲)، می‌توان پارامترهای مجهول مدل را به دست آورد. پس از آن، دمای برآورد شده سطح زمین از طریق مدل پنجره مجزا در رابطه (۹) قرار می‌گیرد و مقدار دمای محاسباتی (کالیبره شده) سایر ایستگاه‌های باقی‌مانده به دست می‌آید. قدم بعدی محاسبه مقدار خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) است که با محاسبه اختلاف دمای کالیبره شده و دمای هوای اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی حاصل می‌شود. در این تحقیق، به منظور افزایش دقت و کارایی مدل، از روش اعتبارسنجی متقابل<sup>۱</sup> استفاده شده است. در این روش، اگر  $k$  ایستگاه هواشناسی وجود داشته باشد، یکی از آنها کنار گذاشته می‌شود و با کمک  $k-1$  ایستگاه باقی‌مانده، پارامترهای مجهول مدل به دست می‌آید. در ادامه، به کمک رابطه (۹)، دمای محاسباتی ایستگاه حذف شده محاسبه می‌شود. سپس، با محاسبه اختلاف دمای محاسباتی و دمای اندازه‌گیری شده، دقت مدل در برآورد دمای هوای نزدیک به سطح زمین، درمورد آن ایستگاه، برآورد می‌شود. این کار برای همه ایستگاه‌ها تکرار می‌شود و براساس آن، مقدار RMSE مدل پیشنهادی طبق رابطه زیر به دست می‌آید (Willmott and Matsuura, 2005):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k-1} (y_i - \hat{y}_i)^2}{k-1}} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

در این رابطه،  $y_i$  و  $\hat{y}_i$  برابر با دمای محاسباتی حاصل از تابع رشنال و دمای اندازه‌گیری شده در ایستگاه برای ایستگاه  $i$ ام هستند.

تابع رشنال به صورت تابعی کسری است که صورت و مخرج کسر یک چندجمله‌ای اند (Xu, 2004). شکل کلی توابع رشنال این گونه است:

$$y = \frac{a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n}{1 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_nx^n} \quad \text{رابطه (۹)}$$

در رابطه (۹)، متغیرهای  $x$  و  $y$ ، به ترتیب، دمای سطح زمین حاصل از مدل پنجره مجزا و دمای نزدیک سطح زمین پس از کالیبراسیون اند. پارامترهای  $a_0$  تا  $a_n$  و  $b_1$  تا  $b_n$  ضرایب ثابت تابع رشنال هستند که مجهول اند و باید محاسبه شوند. به علاوه،  $n$  بزرگ‌ترین توان چندجمله‌ای در صورت و مخرج تابع رشنال است. در حالت کلی، برای محاسبه پارامترهای مجهول تابع رشنال، از مجموعه‌ای نقاط کنترل استفاده می‌شود که مقادیر  $x$  و  $y$  آنها هم‌زمان معلوم است. در این تحقیق، نقاط کنترل مذکور ایستگاه‌های هواشناسی اند که دمای سطح زمین ( $x$ ) این ایستگاه‌ها از تصاویر ماهواره‌ای به دست می‌آید و دمای هوای ثبت شده در آنها نیز دمای نزدیک سطح زمین ( $y$ ) قلمداد می‌شود.

معادلات بالا، با شکل ساده‌تر، چنین است:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n - b_1xy - b_2x^2y - \dots - b_nx^ny \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

معادله (۱۰) برای یک ایستگاه نوشته شده است و اگر هدف در نظر گرفتن هم‌زمان اطلاعات  $k$  ایستگاه هواشناسی باشد، فرم کلی معادله، بعد از جدا کردن مجهولات، به شکل معادله ماتریسی زیر است:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & \dots & x_1^n & -x_1y_1 & -x_1^2y_1 & \dots & -x_1^ny_1 \\ 1 & x_2 & \dots & x_2^n & -x_2y_2 & -x_2^2y_2 & \dots & -x_2^ny_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_k & \dots & x_k^n & -x_ky_k & -x_k^2y_k & \dots & -x_k^ny_k \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

در معادله بالا،  $x_i$  و  $y_i$  برابر با دمای برآورد شده سطح زمین و دمای هوای نزدیک به سطح زمین  $k$ امین ایستگاه هواشناسی اند. معادله (۱۱) را می‌توان به صورت

1. Cross Validation (CV)

دمای سطح هر نقطه دلخواه زمین در رابطه (۱۵)، مقدار دمای نزدیک به سطح زمین آن نقطه را محاسبه کرد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج برآورد دمای سطح زمین

در این بخش، نتایج حاصل از الگوریتم پنجره مجزا مربوط به دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی و رابطه میان این دو پارامتر تأثیرگذار مطرح شده است. پس از اجرای الگوریتم پنجره مجزا، دمای سطح زمین کل منطقه مطالعاتی به دست می‌آید که در شکل ۵ نمایش داده شده است. همچنین، نقشه پوشش گیاهی با درجه خاکستری برای استان کردستان، که از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ حاصل شده، در شکل ۶ آمده است. در نقشه شاخص پوشش گیاهی، مناطقی همراه با پوشش گیاهی متراکم دارای مقادیر شاخص پوشش گیاهی بیشتری و در تصویر، روشن تر دیده می‌شوند. از دیگر سو نیز، بخش‌های تیره و خاکستری نشان‌دهنده مناطقی با درصد کمتر تراکم پوشش گیاهی و یا دارای پوشش خاک‌اند. مطابق با نقشه پوشش گیاهی، مقدار این شاخص در حدود ۰.۱۲ - تا ۰.۶۷ است. رابطه میان دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی نیز در نمودار شکل ۷ ترسیم شده است.

مطابق نتایج پژوهش‌های ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۵)، گوآ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، یوئه<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۷) و آلمو<sup>۳</sup> (۲۰۱۹)، نقشه‌های ارائه شده در شکل‌های ۵ و ۶ و نمودار شکل ۷ همبستگی معکوس میان دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، همراه با همبستگی در حدود بیش از ۰.۷۹، را بیان می‌کنند. به عبارت دیگر، این همبستگی معکوس نشان داد که، با کاهش تراکم پوشش گیاهی، دمای سطح زمین به مراتب افزایش می‌یابد. در نتیجه، مطابق با نقشه‌های یادشده، مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم

یکی از مباحث مهم در زمینه استفاده از توابع رشنال این است که چندجمله‌ای‌ها، در صورت و مخرج کسر، تا چه ترمی ادامه پیدا کنند که همان تعیین حداکثر توان صورت و مخرج کسر (عدد صحیح مثبت  $n$ ) در تابع رشنال است. در این مورد، یک چندجمله‌ای خطی (درجه یک) در صورت و مخرج تابع رشنال در نظر گرفته می‌شود و RMSE مدل به دست می‌آید. سپس، با افزایش توان در صورت و مخرج کسر، توابع رشنال دیگری تولید می‌شود. افزایش توان تا جایی ادامه پیدا می‌کند که RMSE مدل، هربار به نسبت مرحله قبل، کاهش بیابد. به محض افزایش شدن مقدار RMSE، فرایند متوقف و حداکثر توان‌های صورت و مخرج کسر تعیین و تابع پایه رشنال تشکیل می‌شود. همچنین، باید تعیین شود که چه ترم‌هایی در صورت و مخرج کسر باعث افزایش دقت و کدام یک سبب کاهش دقت مدل می‌شوند؛ بنابراین، تعدادی از ترم‌ها، که باعث کاهش دقت می‌شوند، باید از صورت یا مخرج کسر حذف شوند. برای تعیین ترم‌های مزاحم، هربار یک ترم از صورت یا مخرج کسر حذف می‌شود و دقت تابع رشنال تشکیل شده با دقت تابع پایه مقایسه می‌گردد. در صورتی که دقت تابع در مقایسه با تابع پایه کاهش یافته باشد، آن ترم به منزله ترم مزاحم شناخته می‌شود. حداکثر توان صورت و مخرج تابع رشنال و نیز ترم‌های مزاحم ارتباط مستقیمی با تغییرات دمایی میان نواحی گوناگون منطقه مورد مطالعه دارد. در این تحقیق، با بررسی توان‌های متفاوت، مشخص شد که تابع رشنال پایه تابعی درجه دوم، مطابق رابطه زیر است:

$$y = \frac{a_0 + a_1x + a_2x^2}{1 + b_1x + b_2x^2} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

در ادامه، بدین صورت و با حذف ترم‌های مزاحم، بهترین تابع رشنال برای منطقه مطالعاتی تعیین شد:

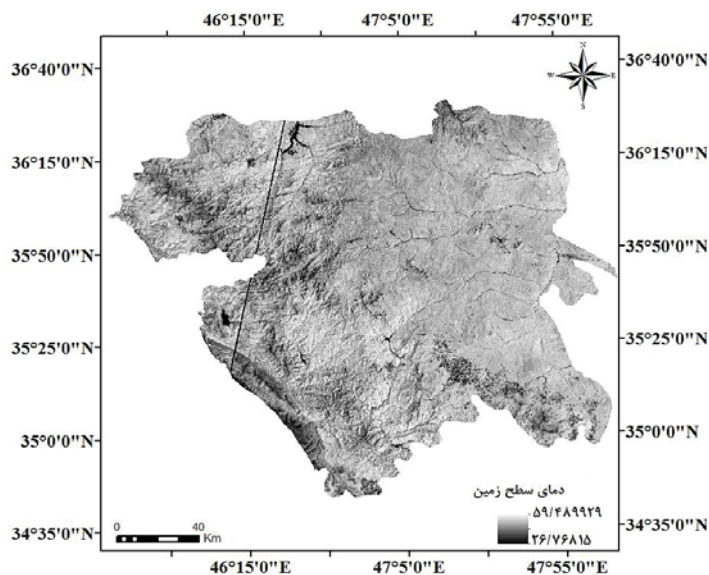
$$y = \frac{a_0 + a_1x}{1 + b_1x + b_2x^2} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

در نهایت، با قراردادن دمای حاصل از مدل پنجره مجزا و دمای اندازه‌گیری شده تمامی ایستگاه‌های هواشناسی در تابع رشنال نهایی، پارامترهای مجهول مدل برای آخرین بار محاسبه می‌شود. حال می‌توان، با قراردادن

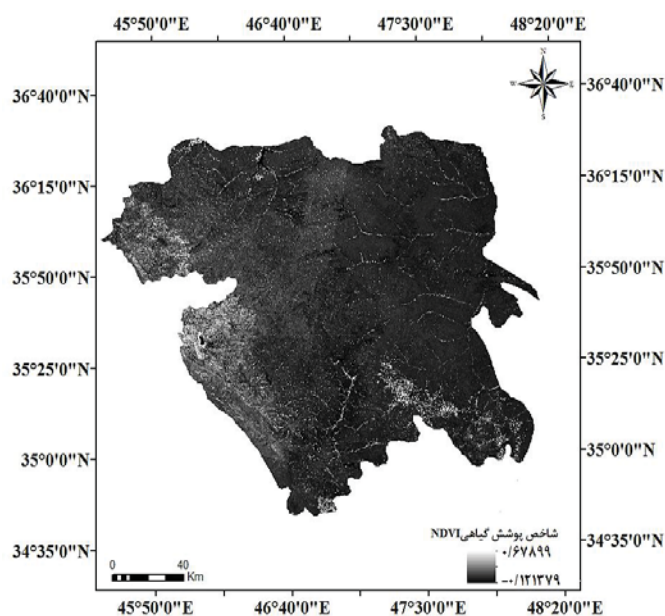
1. Guha  
2. Yue  
3. Alemu

می‌توان اظهار داشت بیشترین دما متعلق به مناطق بیابانی و مناطق پوشیده از خاک خشک و کمترین دما نیز متعلق به مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم است. البته یکی دیگر از دلایل مؤثر در پایین بودن دمای مناطق دارای پوشش گیاهی<sup>۵</sup> بالابودن میزان رطوبت در این مناطق، به دلیل آبیاری پوشش گیاهی است.

در مقایسه با دیگر مناطق موجود، به دلیل تبخیر و تعرق سطحی (وجود رطوبت)، دمای به مراتب کمتری دارند. این در حالی است که، در مناطق با پوشش گیاهی کمتر، به دلیل نبود رطوبت، میزان دمای سطح زمین بالاتر است. در نهایت، با توجه به تحلیل‌ها و نتایج مطرح‌شده،

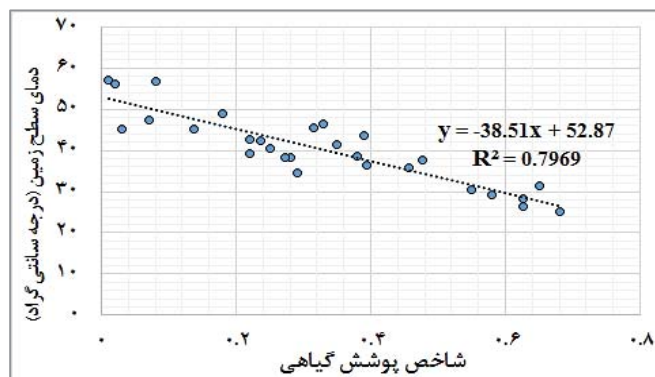


شکل ۵. نقشه دمای هوای سطح زمین با استفاده از الگوریتم پنجره مجزا



شکل ۶. نقشه شاخص پوشش گیاهی (NDVI)

کالیبراسیون دمای سطح زمین به منظور برآورد دقیق دمای هوای نزدیک به سطح زمین ...



شکل ۷. معادلهٔ مربوط به دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی

یک دادهٔ دمایی به منزلهٔ نقطهٔ چک و ۲۵ دادهٔ دمایی برای محاسبهٔ ضرایب به کار می‌رود. به عبارت دیگر، هر دادهٔ دمایی، طی ۲۶ مرحله، یکبار به منزلهٔ نقطهٔ چک و نقاط دیگر برای محاسبهٔ ضرایب تابع رشنال بهینه (رابطه (۱۵)) به کار می‌روند. پس از تعیین تابع رشنال بهینه، باید ضرایب مجهول تابع محاسبه شوند تا بتوان نقشهٔ دمای کالیبره شده را تهیه کرد. جدول ۵ مقادیر به دست آمده برای ضرایب ثابت تابع رشنال بهینه (رابطه (۱۵)) را نمایش می‌دهد.

نتایج حاصل از اعمال روش کالیبراسیون روی داده‌ها، با استفاده از مدل رابطه‌های (۱۴) و (۱۵)، در جدول ۶ آمده است.

۲-۳- نتایج حاصل از کالیبراسیون دمای سطح زمین در این پژوهش، به منظور اجرای روش کالیبراسیون، از اطلاعات ده ایستگاه هواشناسی در پنج زمان متفاوت استفاده شده که، در مجموع، ۲۶ دادهٔ دمایی است. شایان ذکر است که، به دلیل فقدان اطلاعات در برخی ایستگاه‌ها در تاریخی مشخص، اعم از اطلاعات هواشناسی ایستگاه مورد نظر و نیز اطلاعات دمای سطح زمین به دلیل وجود ابر در تصاویر، داده‌های تعدادی از ایستگاه‌ها ناقص است و به جای ۵۰ داده، ۲۶ داده مورد استفاده قرار گرفت. در تصاویر، به منظور برآورد دقت مدل پیشنهادی برای کالیبراسیون دمای سطح زمین به روش اعتبارسنجی متقابل، در هر مرحله،

جدول ۵. ضرایب مدل‌های رابطه (۱۵)

ضرایب مدل	$a_0$	$a_1$	$b_1$	$b_2$
مقادیر	۳۴.۶۰۹	-۰.۷۷۵۶۵	-۰.۰۲۱۰۱۳	-۰.۰۰۰۰۳۰۲۸۳

جدول ۶. نتایج کالیبراسیون مدل روابط (۱۴) و (۱۵)

ایستگاه	تاریخ	دمای ایستگاه <sup>۷</sup>	دمای الگوریتم <sup>۶</sup>	میزان خطا <sup>۵</sup>	دمای ایستگاه <sup>۴</sup>	میزان خطا <sup>۳</sup>	دمای ایستگاه <sup>۲</sup>	میزان خطا <sup>۱</sup>
بیجار	۲۰۱۴/۰۸/۰۷	۲۹.۶	۵۰.۶۰		۲۶.۰۱۸		۲۹.۰۲۳	
	۲۰۱۴/۰۸/۲۳	۳۰.۲	۴۵.۳۶		۳۳.۸۹۳		۳۰.۰۷۸	
	۲۰۱۵/۰۸/۱۰	۲۶.۶	۴۳.۷۹	۱۳.۴۶۴	۳۳.۲۹	۱۳.۱۶۹	۲۶.۶۷۸	۰.۶۶۸
قروه	۲۰۱۴/۰۸/۰۷	۳۰.۱	۴۶.۳		۳۴.۲۸۷		۲۹.۹۱۱	
	۲۰۱۴/۰۸/۲۳	۲۹.۸	۳۹.۹۸		۴۱.۳۹۲		۳۰.۱۱	
	۲۰۱۵/۰۸/۱۰	۲۸.۶	۴۰.۶۵		۸.۸۹۶۷		۲۸.۹۸۶	

ادامه جدول ۶.

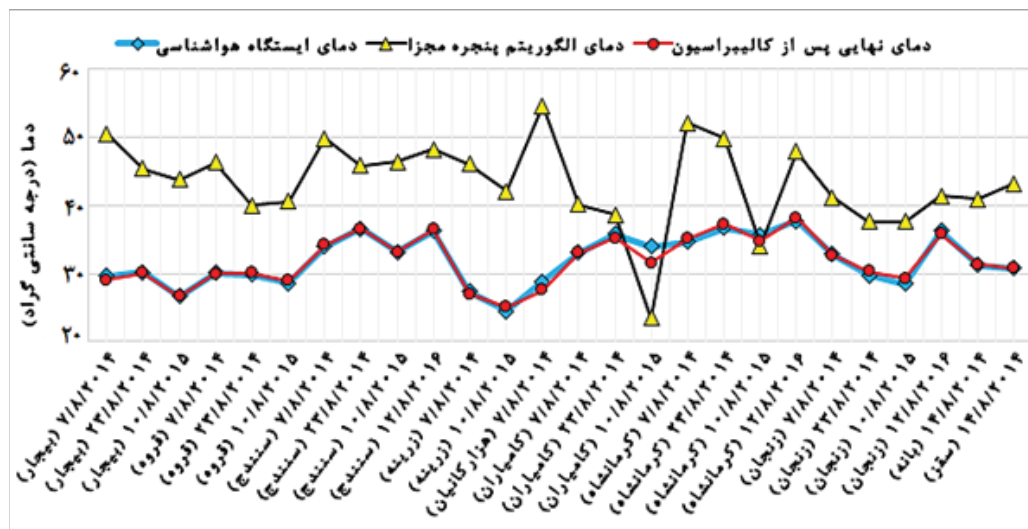
ایستگاه	تاریخ تصویربرداری	دمای ایستگاه <sup>۷</sup>	دمای الگوریتم <sup>۶</sup>	میزان خطاه	دمای ایستگاه <sup>۴</sup>	میزان خطا <sup>۳</sup>	دمای ایستگاه <sup>۲</sup>	میزان خطا <sup>۱</sup>
سندج	۲۰۱۴/۰۸/۰۷	۳۴	۴۹.۹۱۲		-۸.۸۰۰۹		۳۴.۱۴۵	
	۲۰۱۴/۰۸/۲۳	۳۶.۶	۴۵.۸۴		۳۳.۷۰۴		۳۶.۶۴۴	
	۲۰۱۵/۰۸/۱۰	۳۳.۲	۴۶.۳۹		۳۴.۲۳۷		۳۳.۱۴۷	
زرینه	۲۰۱۶/۰۸/۱۲	۳۶.۲	۴۸.۲۶		۳۵.۸۰۷		۳۶.۴۹۵	
	۲۰۱۴/۰۸/۰۷	۲۷.۳	۴۶.۰۴۲		۳۴.۱۴۹		۲۷.۰۰۸	
هزارکانیان	۲۰۱۵/۰۸/۱۰	۲۴.۵	۴۲.۰۷		۳۲.۰۹۹		۲۵.۰۹	
	۲۰۱۴/۰۸/۰۷	۲۸.۸	۵۴.۶۳۸		۳۳.۹۳۶		۲۷.۵۱۹	
بانه	۲۰۱۴/۰۸/۱۴	۳۱.۲	۴۰.۹۸		۲۶.۶۵۳		۳۱.۲۸۵	
سقز	۲۰۱۴/۰۸/۱۴	۳۰.۸	۴۳.۲۱		۳۲.۹۳۶		۳۰.۸	
کامیاران	۲۰۱۴/۰۸/۰۷	۳۳.۱	۴۰.۱۶		۵۱.۰۲۷		۳۲.۹۹۴	
	۲۰۱۴/۰۸/۲۳	۳۵.۸	۳۸.۶۸		۳۶.۰۶۹		۳۵.۱۹۶	
	۲۰۱۵/۰۸/۱۰	۳۴	۲۳.۳۹		۳۲.۶۱		۳۱.۶۱	
کرمانشاه	۲۰۱۴/۰۸/۰۷	۳۴.۶	۵۲.۱۴		۳۰.۶۰۲		۳۵.۰۷۹	
	۲۰۱۴/۰۸/۲۳	۳۶.۷	۴۹.۸۱		-۱.۰۱۳۵		۳۷.۳۰۲	
	۲۰۱۵/۰۸/۱۰	۳۵.۷	۳۴.۰۶		۳۳.۹۷۳		۳۴.۷۹۴	
	۲۰۱۶/۰۸/۱۲	۳۷.۷۹	۴۷.۹۴		۳۴.۹۷۸		۳۸.۲۲۴	
زنجان	۲۰۱۴/۰۸/۰۷	۳۲.۷۹	۴۱.۲۱		۲۸.۹۳		۳۲.۷۱۶	
	۲۰۱۴/۰۸/۲۳	۲۹.۷	۳۷.۶۲		۳۵.۲۷۵		۳۰.۲۴۵	
	۲۰۱۵/۰۸/۱۰	۲۸.۵	۳۷.۶۳		۳۵.۰۳۳		۲۹.۲۸۴	
	۲۰۱۶/۰۸/۱۲	۳۶.۲	۴۱.۴۳		۳۵.۰۰۴		۳۵.۷۸۴	

داده‌های برآوردشده با الگوریتم پنجره مجزا برای محاسبه دمای هوای نزدیک سطح زمین بیشتر است. به همین منظور، در شکل ۸، نتایج کالیبراسیون دمای سطح با استفاده از مدل رابطه (۱۵)، به صورت مدل نهایی، و تغییرات دمایی در ایستگاه‌های موجود، طی زمان‌های مطالعاتی، ارائه شده است.

۱. خطای RMSE، پس از اعمال مرحله اول و دوم کالیبراسیون
۲. دمای برآوردشده، پس از اعمال مرحله اول و دوم کالیبراسیون (مدل رابطه (۱۵))
۳. خطای RMSE پس از اعمال مرحله اول کالیبراسیون
۴. دمای برآوردشده پس از مرحله اول کالیبراسیون (مدل رابطه (۱۴))
۵. خطای RMSE پیش از اعمال کالیبراسیون
۶. دمای برآوردی الگوریتم پنجره مجزا
۷. مقدار دمای اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی

مطابق با نتایج ارائه‌شده در جدول ۶، می‌توان اظهار داشت مدل رابطه (۱۵)، از نظر میزان خطای RMSE، دقتی بیش از دیگر مدل‌ها دارد. درعین حال این مدل، در مقایسه با دیگر مدل‌ها، بیشترین میزان بهبود را بر داده‌های برآوردشده با الگوریتم پنجره مجزا، با هدف برآورد مطلوب از دمای هوای نزدیک سطح زمین، داراست. مطابق نتایج مطرح‌شده در جدول ۶، میزان خطای RMSE، پس از اعمال مرحله اول و دوم کالیبراسیون، از ۱۳.۴۶۴ درجه سانتی‌گراد، به ترتیب، به ۱۳.۱۶۹ و در نهایت، به ۰.۶۶۸ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. به عبارت دیگر، با توجه به نتایج یادشده، مدل مورد نظر بیشترین بهبود را به نسبت سایر مدل‌ها دارد؛ از این لحاظ که توانایی آن در تصحیح

کالیبراسیون دمای سطح زمین به منظور برآورد دقیق دمای هوای نزدیک به سطح زمین ...



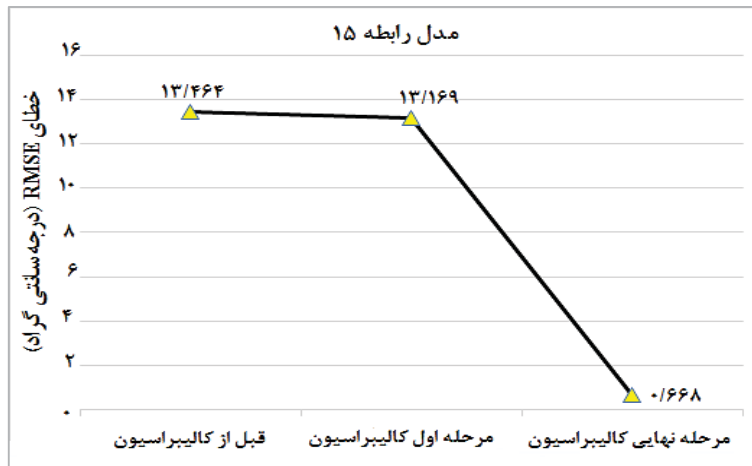
شکل ۸. مقایسه دمای ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی، دمای حاصل از روش پنجره مجزا و دمای نزدیک به سطح زمین، با استفاده از مدل رابطه (۱۵)

سانتی گراد به انجام رسانده است. به دیگر سخن، مرحله دوم کالیبراسیون، با عنوان حذف ترم‌های مزاحم و غیرضروری، در افزایش دقت کالیبراسیون برای برآورد دمای هوای نزدیک سطح زمین بسیار مؤثر است. درحالت کلی نیز، طبق خطای ۰.۶۶۸ درجه‌ای مدل‌سازی مدل مورد نظر با استفاده از برآوردهای صورت گرفته و داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی، می‌توان گفت که مدل یادشده برای کالیبراسیون داده‌های دمای سطح زمین مطلوب و مورد قبول ارزیابی می‌شود. نمودارهای داده‌شده نیز این اصل را بیان می‌کنند که مدل ارائه‌شده در رابطه (۱۵)، با توجه به میزان خطای RMSE پس از اجرای کالیبراسیون، بدون استفاده از داده‌های کمکی قادر است دمای سطح زمین را، با دقت مدل‌سازی مطلوب به‌منظور برآورد دمای هوای نزدیک سطح زمین، تصحیح کند. شایان ذکر است که، در پژوهش حاضر، مبنای گزینش مدل مناسب، با هدفی که برای آن بیان شد، بهبود کاهش میزان خطای RMSE پس از اجرای دو مرحله کالیبراسیون است.

مطابق با نمودارهای شکل ۸، می‌توان گفت که مدل ارائه‌شده در رابطه (۱۵)، پس از حذف ترم‌های مزاحم (پس از اعمال مرحله دوم کالیبراسیون)، دقت مناسبی داشته است. به عبارت دیگر، پس از اجرای مرحله دوم کالیبراسیون، خطای RMSE کاهش چشمگیری می‌یابد. با مقایسه میزان خطای RMSE مدل پیشنهادی با خطای تحقیقات امینی و همکاران (۱۳۹۳)، کورباری<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، پهلوان‌زاده و همکاران (۱۳۹۸)، رضانی خوجین و همکاران (۱۳۹۴)، یانگ و همکاران (۲۰۰۴)، میلر و میلیس (۱۹۸۹) و رونگالی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۸b) می‌توان اظهار داشت که نتایج حاصل از کالیبراسیون مورد استفاده در پژوهش حاضر دقت مورد قبول و مطلوبی دارد و به‌منظور کالیبراسیون داده‌های دمای سطح زمین برای برآورد دمای هوای نزدیک سطح زمین، مناسب ارزیابی می‌شود. از سویی، مدل یادشده، پس از اجرای مرحله دوم کالیبراسیون (حذف ترم‌های غیرضروری)، در بیشتر ایستگاه‌ها، به‌جز خطایی حدود ۲.۵ درجه سانتی‌گراد که در دهم اوت ۲۰۱۵ در ایستگاه کامیاران داشت، مدل‌سازی را با خطایی کمتر از ۰.۵ درجه

1. Corbari  
2. Rongali





شکل ۹. نتایج مقایسه میزان خطای RMSE در مراحل کالیبراسیون و پیش از کالیبراسیون

دسترسی فیزیکی به آنها امکان پذیر نیست، مؤثر در نظر گرفت.

در این مطالعه، با به کارگیری اطلاعات هشت ایستگاه سینوپتیک هواشناسی در استان کردستان و دو ایستگاه کمکی در استان‌های کرمانشاه و زنجان در تاریخ‌های هفتم اوت ۲۰۱۴، چهاردهم اوت ۲۰۱۴، بیست‌وسوم اوت ۲۰۱۴، دهم اوت ۲۰۱۵ و دوازدهم اوت ۲۰۱۶، دمای استخراجی سطح زمین از الگوریتم پنجره مجزا، با استفاده از دمای اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی و توابع رشنال، تصحیح و کالیبراسیون شده است.

توابع ریاضی رشنال را می‌توان ابزاری مناسب برای چنین کاری در نظر گرفت. این توابع، به دلیل سادگی و سرعت بالا و نیازنداشتن به داده‌های اضافی، مزایایی بیشتر از روش‌های فیزیکی در زمینه کالیبراسیون دمای سطح زمین دارند. از طرفی، ترم‌های موجود در این معادلات در میزان دقت و خطای مدل‌سازی بسیار تأثیرگذارند. در واقع، برخی از ترم‌های معادلات موجب افزایش تصاعدی خطای مدل‌سازی و در نهایت، کاهش دقت کالیبراسیون می‌شوند. اما با نظارت بر رفتار مدل‌سازی، با استفاده از این معادلات، می‌توان خروجی‌های دارای دقت و صحت بیشتر در کالیبراسیون

در شکل ۹، نتایج مقایسه میزان خطای RMSE در مراحل اول و دوم کالیبراسیون و مرحله پیش از کالیبراسیون ارائه شده است. در این شکل، میزان خطای RMSE در مرحله اول کالیبراسیون کاهش چشمگیری ندارد اما در مرحله دوم، با عنوان مرحله نهایی کالیبراسیون، کاهش معتدابه ۱۲.۵ درجه سانتی‌گرادی دارد. به عبارت دیگر، حذف ترم‌های غیرضروری در مرحله نهایی پس از کالیبراسیون، در افزایش دقت کالیبراسیون برای برآورد دمای هوای نزدیک سطح زمین، بسیار مؤثر است. در نهایت، براساس نتایج حاصل و تحلیل‌های صورت‌گرفته، می‌توان گفت که یکی از دلایل اصلی و روشن وجود خطای بالا در برآوردهای انجام‌شده در برخی ایستگاه‌ها، در مرحله اول کالیبراسیون، وجود ترم‌های مزاحم در معادله مدل رشنال اولیه است. به همین دلیل، پس از اعمال مرحله دوم کالیبراسیون، میزان خطا کاهش چشمگیری یافته است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در حال حاضر، می‌توان روش‌های برآورد دمای سطح زمین را، در به‌دست‌آوردن دمای نقاطی که امکان ایجاد یا استقرار ایستگاه هواشناسی در آن مناطق و یا

سطح زمین از باندهای حرارتی ماهواره  
لندست با استفاده از رگرسیون خطی و  
مشاهدات زمینی، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی،  
سال ۳۰، شماره ۳، صص. ۷۸-۵۹.  
حنفی، ع.، حاتمی، ا.، ۱۳۹۲، تهیه نقشه اقلیمی استان  
کردستان با استفاده از سیستم اطلاعات  
جغرافیایی، فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات  
جغرافیایی سپهر، دوره ۲۲، شماره ۸۷، صص. ۲۴-۲۸.  
رضانی خوجین، ع.، خیرخواه زرکش، م.م.، دانشکار  
آراسته، پ.، مریدی، ع.، علیمحمدی نافچی، ر.،  
۱۳۹۴، محاسبه و واسنجی دمای سطح زمین با  
استفاده از داده‌های حرارتی ماهواره Landsat  
۸، سنجش از دور و GIS ایران، سال ۷، شماره ۳،  
صص. ۶۴-۴۹.

Alemu, M.M., 2019, **Analysis of Spatio-Temporal Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index Changes in the Andassa Watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia**, Journal of Resources and Ecology, 10(1), PP. 77-85.

Artis, D.A. & Carnahan, W.H., 1982, **Survey of Emissivity Variability in Thermography of Urban Areas**, Remote Sensing of Environment, 12(4), PP. 313-329.

Barsi, J.A., Barker, J.L. & Schott, J.R., 2003, **An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-Sensing Instrument**, In IGARSS 2003, 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477) (Vol. 5, pp. 3014-3016). IEEE.

را انتظار داشت. بدین ترتیب، با توجه به نتایج ارائه شده در بخش کالیبراسیون دمای سطح زمین، می‌توان گفت که روش کالیبراسیون با معادلات ریاضی رشنال در بهبود صحت برآورد دمای سطح نزدیک سطح زمین، با استفاده از باندهای حرارتی و مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی زمینی، شیوه‌ای مؤثر است.

از سویی، مطابق با نتایج خروجی‌های مربوط به برآورد دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی، می‌توان اظهار داشت که مناطق پوشش گیاهی متراکم میانگین دمایی به مراتب کمتری از دیگر مناطق دارند زیرا فرایند تبخیر و تعرق سطحی در آنها صورت می‌گیرد. بدین ترتیب، مناطق با پوشش گیاهی کم‌تراکم و خاک لخت نیز میانگین دمایی به مراتب بیشتری دارند. بنابراین، با توجه به نتایج و بررسی‌ها، تأثیر تراکم پوشش گیاهی مناطق، در کاهش یا افزایش محسوس دما، انکارناپذیر است. از دیگر سو، طبق نتایج، یکی دیگر از دلایل تأثیرگذار در پایین بودن دمای مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم‌تر این است که میزان رطوبت در این اراضی، به دلیل آبیاری، بسیار بیشتر است.

#### ۵- منابع

ابراهیمی، ح.، گندمکار، ا.، المدرسی، س.ع.، رامشت، م.ح.، ۱۳۹۵، برآورد دمای سطح زمین و تأثیر پوشش گیاهی بر دمای سطح با استفاده از تصاویر مودیس (مطالعه موردی: حوزه تویسرکان)، جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)، دوره ۶ (پیاپی ۲۴)، شماره ۴، صص. ۳۲-۲۳.  
امینی بازبانی، س.، زارع ایبانه، ح.، اکبری، م.، ۱۳۹۳، برآورد دما و شاخص پوشش گیاهی با استفاده از داده‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: استان همدان)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۶، شماره ۳، صص. ۳۴۸-۳۳۳.  
پهلوان‌زاده، ن.، جانعلی‌پور، م.، عباس‌زاده طهرانی، ن.، فرهنگ، ف.، ۱۳۹۸، بهبود صحت استخراج دمای

- Barsi, J.A., Schott, J.R., Hook, S.J., Raqueno, N.G., Markham, B.L. & Radocinski, R.G., 2014, **Landsat-8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) Vicarious Radiometric Calibration**, Remote Sensing, 6(11), PP. 11607-11626.
- Benali, A., Carvalho, A.C., Nunes, J.P., Carvalhais, N. & Santos, A., 2012, **Estimating Air Surface Temperature in Portugal Using MODIS LST Data**, Remote Sensing of Environment, 124, PP. 108-121.
- Bussieres, N., Louie, P.Y.T. & Hogg, W., 1990, **Progress Report on the Implementation of an Algorithm to Estimate Regional Evapotranspiration Using Satellite Data**, In Proceeding of the Workshop on Applications of Remote Sensing in Hydrology.
- Carlson, T.N. & Ripley, D.A., 1997, **On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index**, Remote Sensing of Environment, 62(3), PP. 241-252.
- Chai, T. & Draxler, R.R., 2014, **Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE)?—Arguments against Avoiding RMSE in the Literature**, Geoscientific Model Development, 7(3), PP. 1247-1250.
- Chander, G., Markham, B.L. & Helder, D.L., 2009, **Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors**, Remote Sensing of Environment, 113(5), PP. 893-903.
- Chedin, A., Scott, N.A., Wahiche, C. & Moulinier, P., 1985, **The Improved Initialization Inversion Method: A High Resolution Physical Method for Temperature Retrievals from Satellites of the TIROS-N Series**, Journal of Climate and Applied Meteorology, 24(2), PP. 128-143.
- Corbari, C., Mancini, M., Li, J. & Su, Z., 2015, **Can Satellite Land Surface Temperature Data Be Used Similarly to River Discharge Measurements for Distributed Hydrological Model Calibration?**, Hydrological Sciences Journal, 60(2), PP. 202-217.
- Du, C., Ren, H., Qin, Q., Meng, J. & Zhao, S., 2015, **A Practical Split-Window Algorithm for Estimating Land Surface Temperature from Landsat 8 Data**, Remote Sensing, 7(1), PP. 647-665.
- Gao, C., Li, Z.L., Qiu, S., Tang, B., Wu, H. & Jiang, X., 2013, **An Improved Algorithm for Retrieving Land Surface Emissivity and Temperature from MSG-2/SEVIRI Data**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52(6), PP. 3175-3191.
- Guha, S., Govil, H., Dey, A. & Gill, N., 2018, **Analytical Study of Land Surface Temperature with NDVI and NDBI Using Landsat 8 OLI and TIRS Data in Florence and Naples City, Italy**, European Journal of Remote Sensing, 51(1), PP. 667-678.
- Guo, G., Wu, Z., Xiao, R., Chen, Y., Liu, X. & Zhang, X., 2015, **Impacts of Urban Biophysical Composition on Land Surface Temperature in Urban Heat Island Clusters**, Landscape and Urban Planning, 135, PP. 1-10.
- Gutman, G. & Ignatov, A., 1998, **The Derivation of the Green Vegetation Fraction from NOAA/AVHRR Data for Use in Numerical Weather Prediction Models**, International Journal of remote sensing, 19(8), PP.1533-1543.
- Hook, S.J., Gabell, A.R., Green, A.A. and

- Kealy, P.S., 1992. **A Comparison of Techniques for Extracting Emissivity Information from Thermal Infrared Data for Geologic Studies**, Remote Sensing of Environment, 42(2), PP. 123-135.
- Hough, I., Just, A.C., Zhou, B., Dorman, M., Lepeule, J. & Kloog, I., 2020, **A Multi-Resolution Air Temperature Model for France from MODIS and Landsat Thermal Data**, Environmental Research, 183, P. 109244.
- Ingram, P.M. & Muse, A.H., 2001, **Sensitivity of Iterative Spectrally Smooth Temperature/ Emissivity Separation to Algorithmic Assumptions and Measurement Noise**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(10), PP. 2158-2167.
- Jiménez-Muñoz, J.C., Cristóbal, J., Sobrino, J.A., Sòria, G., Ninyerola, M. & Pons, X., 2008, **Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat Thermal-Infrared Data**, Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(1), PP. 339-349.
- Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A., Skoković, D., Mattar, C. & Cristóbal, J., 2014, **Land Surface Temperature Retrieval Methods from Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data**, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 11(10), PP. 1840-1843.
- Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R.T., Anderson, M., Imhoff, M.L., Gutman, G.G., Panov, N. & Goldberg, A., 2010, **Use of NDVI and Land Surface Temperature for Drought Assessment: Merits and Limitations**, Journal of Climate, 23(3), PP. 618-633.
- Kealy, P.S. & Hook, S.J., 1993, **Separating Temperature and Emissivity in Thermal Infrared Multispectral Scanner Data: Implications for Recovering Land Surface Temperatures**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 31(6), PP. 1155-1164.
- Landsat Project Science Office (2002) Landsat 7 Science Data User's Handbook**, URL: <http://www.gsfc.nasa.gov>, GoddardSpace Flight Center, NASA, Washington, DC, last date accessed: 10 September 2003.
- Li, Z.L., Tang, B.H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I.F. & Sobrino, J.A., 2013, **Satellite-Derived Land Surface Temperature: Current Status and Perspectives**, Remote Sensing of Environment, 131, PP. 14-37.
- Li, Z.L., Wu, H., Wang, N., Qiu, S., Sobrino, J.A., Wan, Z., Tang, B.H. & Yan, G., 2013, **Land Surface Emissivity Retrieval from Satellite Data**, International Journal of Remote Sensing, 34(9-10), PP. 3084-3127.
- Markham, B.L. & Barker, J.L., 1985, **Spectral Characterization of the Landsat Thematic Mapper Sensors**, International Journal of Remote Sensing, 6(5), PP. 697-716.
- Miller, W. & Millis, E., 1989, **Estimating Evaporation from Utah's Great Salt Lake Using Thermal Infrared Satellite Imagery**, Water Resources Association, 25(3), PP. 541-550.
- Price, J.C., 1980, **The Potential of Remotely Sensed Thermal Infrared Data to Infer Surface Soil Moisture and Evaporation**, Water Resources Research, 16(4), PP. 787-795.
- Price, J.C., 1983, **Estimating Surface Temperatures from Satellite Thermal Infrared Data—A Simple Formulation for the Atmospheric Effect**, Remote Sensing of Environment, 13(4), PP. 353-361.

- Rampal, K.K., 1976, **Least Squares Collocation in Photogrammetry**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 42(5), PP. 659-669.
- Rongali, G., Keshari, A.K., Gosain, A.K. & Khosa, R., 2018a, **A Mono-Window Algorithm for Land Surface Temperature Estimation from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor Data: A Case Study of the Beas River Basin, India**, Pertanika J Sci Technol, 26, PP. 829-840.
- Rongali, G., Keshari, A.K., Gosain, A.K. & Khosa, R., 2018b, **Split-Window Algorithm for Retrieval of Land Surface Temperature Using Landsat 8 Thermal Infrared Data**, Journal of Geovisualization and Spatial Analysis, 2(2), P. 14.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W., 1974. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. NASA special publication, 351(1974), p.309.
- Schmugge, T.J. & André, J.C. (eds.), 2012, **Land Surface Evaporation: Measurement and Parameterization**, Springer Science & Business Media.
- Serafini, Y.V., 1987, **Estimation of the Evapotranspiration Using Surface and Satellite Data**, International Journal of Remote Sensing, 8(10), PP. 1547-1562.
- Skoković, D., Sobrino, J.A., Jimenez-Munoz, J.C., Soria, G., Jušien, Y., Mattar, C. & Cristóbal, J., 2014, **Calibration and Validation of Land Surface Temperature for Landsat8-TIRS Sensor**, LPVE (Land Product Validation and Evolution).
- Sobrino, J.A., Li, Z.L., Stoll, M.P. & Becker, F., 1996, **Multi-Channel and Multi-Angle Algorithms for Estimating Sea and Land Surface Temperature with ATSR Data**, International Journal of Remote Sensing, 17(11), PP. 2089-2114.
- Sobrino, J.A., Sòria, G. & Prata, A.J., 2004, **Surface Temperature Retrieval from Along Track Scanning Radiometer 2 Data: Algorithms and Validation**, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 109(D11).
- Song, W., Mu, X., Ruan, G., Gao, Z., Li, L. & Yan, G., 2017, **Estimating Fractional Vegetation Cover and the Vegetation Index of Bare Soil and Highly Dense Vegetation with a Physically Based Method**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 58, PP. 168-176.
- Williamson, S.N., Hik, D.S., Gamon, J.A., Kavanaugh, J.L. & Flowers, G.E., 2014, **Estimating Temperature Fields from MODIS Land Surface Temperature and Air Temperature Observations in a Sub-Arctic Alpine Environment**, Remote Sensing, 6(2), PP. 946-963.
- Willmott, C.J. & Matsuura, K., 2005, **Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the Root Mean Square Error (RMSE) in Assessing Average Model Performance**, Climate Research, 30(1), PP. 79-82.
- Xu, J.Z., 2004, **The Rational Function Model (RFM) in Photogrammetric Mapping: Method and Accuracy**, Department of Earth and Space Science & Engineering, York University.
- Yang, Y.Z., Cai, W.H. & Yang, J., 2017, **Evaluation of MODIS land Surface Temperature Data to Estimate Near-Surface Air Temperature in Northeast China**, Remote Sensing, 9(5), P. 410.
- Yang, J.S., Wang, Y.Q. & August, P.V., 2004, **Estimation of Land Surface**

- Temperature Using Spatial Interpolation and Satellite-Derived Surface Emissivity**, Journal of Environmental Informatics, 4(1), PP. 37-44.
- Yoo, C., Im, J., Park, S. & Quackenbush, L.J., 2018, **Estimation of Daily Maximum and Minimum Air Temperatures in Urban Landscapes Using MODIS Time Series Satellite Data**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 137, PP. 149-162.
- Yue, W., Xu, J., Tan, W. & Xu, L., 2007, **The Relationship between Land Surface Temperature and NDVI with Remote Sensing: Application to Shanghai Landsat 7 ETM+ Data**, International Journal of Remote Sensing, 28(15), PP. 3205-3226.
- Zeng, L., Wardlow, B.D., Tadesse, T., Shan, J., Hayes, M.J., Li, D. & Xiang, D., 2015, **Estimation of Daily Air Temperature Based on MODIS Land Surface Temperature Products over the Corn Belt in the US**, Remote Sensing, 7(1), PP. 951-970.