

Comparison of the Accuracies of Different Methods for Estimating Atmospheric Water Vapor in the Retrieval of Land Surface Temperature Using Landsat 8 Images

F. Arabi Aliabad¹, M. Zare^{2*}, H. R. Ghafarian Malamiri³

1. Ph.D. Candidate, Combating Desertification, School of Natural Resources & Desert Studies, Department of Arid Land and Desert Management, Yazd University, Yazd, Iran.
2. Associate Professor, School of Natural Resources & Desert Studies, Department of Arid Land and Desert Management, Yazd University, Yazd, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran.

* Corresponding Author: mzernani@yazd.ac.ir

Received date: 22/11/2020

Accepted date: 17/01/2021

 [10.22034/JDMAL.2021.244523](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2021.244523)

Abstract

Temperature is one of the most important physical parameters that control the transfer and exchange of energy between different layers of the earth and the atmosphere. LST estimation methods based on satellite images require surface and atmospheric parameters such as surface emissivity, average air temperature, atmospheric transfer coefficient, and water vapor as input. Uncertainty in these parameters causes errors in the retrieval of land surface temperature. This study aimed to compare the accuracy of different methods for estimating atmospheric water vapor in estimating land surface temperature using Landsat 8 images. In this study, atmospheric water vapor was estimated using FLAASH atmospheric correction methods, MODIS sensor images, and SWCVR method. Then, the impact of atmospheric water vapor on land surface temperature accuracy was investigated using the split window and single-channel methods. Validation of Land surface temperature images was performed using cross-validation and ground measurement methods. Therefore, 20 Landsat 8 images related to 2018 and 2019 were used to estimate atmospheric water vapor by the FLAASH atmospheric correction and SWCVR methods, and land surface temperature estimation. MODIS radiance images were used to estimate atmospheric water vapor and the land surface temperature product of this sensor was used for cross-validation. The surface temperature was measured using a thermometer in places with homogeneous cover, for ground-based validation. Results showed that among water vapor estimation methods, the SWCVR method is more suitable for estimating land surface temperature and the split-window method based on the SWCVR method shows the lowest RMSE and MADE at 3.47 and 3.18. Results of RMSE image classification of split-window algorithm based on the SWCVR showed that 1.67% of the area has an error of more than 4 °C and 98% of the study area has less than 4 °C error.

Keywords: Split-window; Land Surface Temperature; Thermal remote sensing; MODIS; Yazd





مقایسه دقت روش‌های مختلف تخمین بخار آب جو در برآورد دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸

فهیمة عربی علی‌آباد^۱، محمد زارع^{۲*}، حمیدرضا غفاریان مالمیری^۳

۱. دانشجوی دکتری بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
 ۲. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
 ۳. استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
- * نویسنده مسئول: mzernani@yazd.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۸

doi: [10.22034/JDMAL.2021.244523](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2021.244523)

چکیده

دما به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های فیزیکی، انتقال و تبادل انرژی را بین لایه‌های مختلف زمین و جو کنترل می‌کند. روش‌های برآورد دمای سطح زمین، مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای، به متغیرهای سطحی و جوی مانند گسیلمندی سطح، میانگین دمای هوا، ضریب انتقال اتمسفری و بخار آب به‌عنوان ورودی نیاز دارد. عدم قطعیت در این متغیرها باعث ایجاد خطا در بازیابی دمای سطح زمین می‌شود. هدف از پژوهش حاضر مقایسه دقت روش‌های مختلف تخمین بخار آب جو در برآورد دمای سطح زمین با بهره‌گیری از تصاویر لندست ۸ است. به این منظور بخار آب جو، با استفاده از روش‌های تصحیح اتمسفری FLAASH، تصاویر سنجنده مودیس و روش SWCVR برآورد شد. سپس تأثیر بخار آب جو بر دقت دمای سطح زمین حاصل از روش‌های پنجره مجزا و تک‌باندی بررسی شد. اعتبارسنجی تصاویر دمای سطح زمین با استفاده از روش اعتبارسنجی تقاطعی و روش مبتنی بر اندازه‌گیری زمینی انجام شد. سپس، ۲۰ تصویر از ماهواره لندست ۸ مربوط به سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹، برای تخمین بخار آب جو به روش تصحیح اتمسفری FLAASH و SWCVR و برآورد دمای سطح زمین استفاده شد. از داده‌های رقومی رادیانس مودیس برای تخمین بخار آب جو و از محصول دمای سطح زمین این سنجنده برای ارزیابی متقابل استفاده شد. دما با استفاده از دماسنج در نقاطی با پوشش همگن برای اعتبارسنجی مبتنی بر برداشت زمینی، اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که در میان روش‌های برآورد بخار آب جو، روش SWCVR برای برآورد دمای سطح زمین مناسب‌تر است. روش پنجره مجزای مبتنی بر روش SWCVR کمترین مقادیر RMSE و MADE را به مقدار ۳/۴۷ و ۳/۱۸ نشان می‌دهد. یافته‌های طبقه‌بندی تصاویر RMSE خوارزمیک (الگوریتم) پنجره مجزای مبتنی بر SWCVR، نشان داد که ۱/۶۷ درصد از مساحت منطقه، خطای بیشتر از ۴ °C و ۹۸ درصد از منطقه مطالعاتی دارای خطای کمتر از ۴ °C است.

واژگان کلیدی: پنجره مجزا؛ دمای سطح زمین؛ سنسجش از دور حرارتی؛ مودیس؛ یزد



■ مقدمه

اگرچه دشواری‌های زیادی در برآورد و اعتبارسنجی بخار آب جو با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای وجود دارد اما در سال‌های اخیر، تلاش‌ها و مطالعاتی در این زمینه انجام گرفته است (۵۲، ۷، ۳). در پژوهشی روش اصلاح شده نسبت واریانس کوریانس پنجره مجزا (MSWCVR^۸) را برای برآورد بخار آب جو با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی لندست^۹ ارائه شد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که این روش قابلیت برآورد بخار آب جو با دقت مناسب را دارد و از همبستگی بالایی با محصول بخار آب مودیس برخوردار است (۴۰). در مطالعه‌ای روشی کاربردی برای برآورد دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر لندست ۸ و تخمین بخار آب جو به روش SWCVR پیشنهاد شد و RMSE حاصل از اعتبارسنجی مبتنی بر اندازه‌گیری زمینی 0.184 K برآورد شد (۶۷). نتایج حاصل از برآورد بخار آب با استفاده از سنجنده مودیس^{۱۰} و بررسی آن در کاربری‌های مختلف اراضی نشان داد که میانگین بخار آب در جنگل، مراتع غنی، کشاورزی، اراضی بایر، مناطق مسکونی و آب به ترتیب 3.114 ، 2.20 ، 3.79 ، 1.26 ، 2.73 و 5.24 gr/cm^3 است (۵۳). خطا در تعیین بخار آب اتمسفر بیشترین تأثیر را بر کاهش دقت برآورد دمای سطح زمین دارد (۶۰). در مطالعه‌ای با استفاده از شاخص‌های دمای هوا و بخار آب جو، روش بهبودیافته‌ای برای برآورد دمای سطح زمین ارائه شد که نشان داد استفاده از تصویر بخار آب جو موجب افزایش دقت برآورد دمای سطح زمین می‌شود (۱۲). همچنین نتایج مطالعاتی نشان داد که برآورد بخار آب جو موجب افزایش دقت دمای سطح زمین در تصاویر سنجنده استرا^{۱۱} می‌شود (۶۶). در پژوهشی دقت تمام خوارزمیک‌های پنجره مجزا با یکدیگر مقایسه و مشخص شد که در خوارزمیکی که به جای در نظر گرفتن عدد ثابت برای مقدار بخار آب جو از روش SWCVR استفاده شده است، دقت بالاتری نسبت به دیگر خوارزمیک‌ها داشته است (۴).

بخار آب جو^۱ یکی از مؤلفه‌های اصلی در چرخه آبی جهان است و نقش زیادی در تبادل انرژی بین جو و زمین دارد (۲۸). از مهم‌ترین شاخص‌ها در مدل‌سازی تعادل انرژی سطح زمین، مطالعات تغییر اقلیم و مدیریت حوزه آبخیز است (۳۰، ۳۳). بخار آب جو عاملی مؤثر در برآورد برخی از شاخص‌های سنجش از دوری، مانند دمای سطح زمین^۲ (LST)، مدل‌سازی بیوسفر با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و تصحیح‌های اتمسفری است (۳۲، ۵۵، ۴۵، ۹). روش‌های برآورد دمای سطح زمین مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای، به شاخص‌های زمینی و جوی مانند گسیلمندی سطح زمین، میانگین دمای هوا، ضریب انتقال اتمسفری و بخار آب به‌عنوان ورودی نیاز دارند. عدم قطعیت در این شاخص‌ها باعث ایجاد خطا در برآورد دمای سطح زمین می‌شود (۶۰). تعداد محدودی رادیوسوند برای اندازه‌گیری دقیق میزان بخار آب جو و اعتبارسنجی محصولات بخار آب در ایستگاه‌های هواشناسی وجود دارد اما دستیابی به این اطلاعات برای تمام کشورها امکان‌پذیر نیست (۲). علاوه بر این، به دلیل تغییرات مکانی و زمانی شاخص‌های جوی مانند بخار آب و دمای هوا، استفاده از اطلاعات رادیوسوند^۳ زمینی به دور از منطقه مورد مطالعه و یا دور از زمان عبور از ماهواره، ممکن است منجر به ایجاد خطا در برآورد دمای سطح زمین شود (۲۶). تکنولوژی سنجش از دور امکان برآورد بخار آب در مقیاس جهانی و منطقه‌ای را فراهم کرده است (۳۴). به طور کلی روش‌های برآورد بخار آب با استفاده از داده‌های سنجش از دور به چهار دسته شامل: روش مادون قرمز نزدیک^۴ (۱۸، ۱۹)، روش میکروویو^۵ (۳۳)، تکنیک‌های مادون قرمز حرارتی^۶ (۳۷) و روش‌های هایپراسپکترال^۷ (۶۱، ۶)، سیگنال رادیویی GPS (۶۲، ۲۴، ۱) تقسیم می‌شود.

- 1 Atmospheric Water Vapor
- 2 Land Surface Temperature
- 3 Radiosonde
- 4 Near-Infrared
- 5 Microwave
- 6 Thermal Infrared
- 7 Hyperspectral

8 Modified Split-Window Covariance-Variance Ratio
9 Landsat
10MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)
11 Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

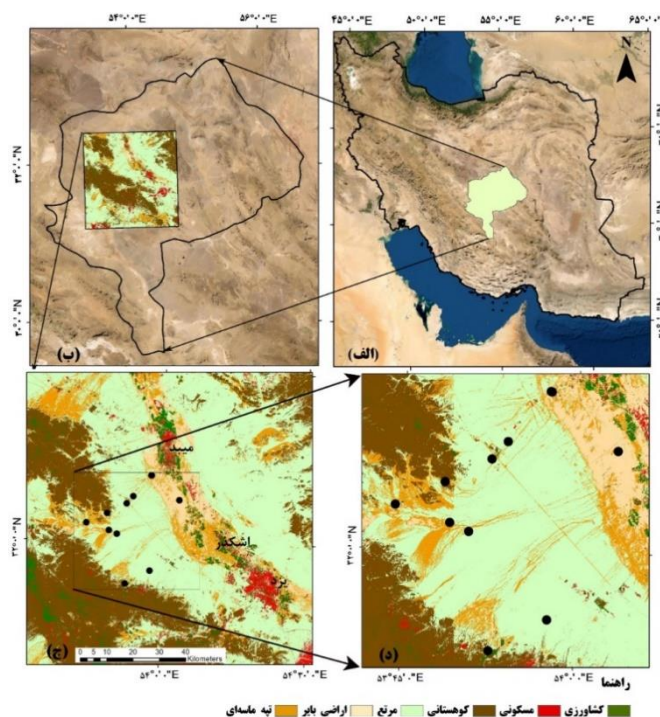
"۰۰' ۲۰" ۳۲° عرض شمالی قرار گرفته است. این دشت دربرگیرنده شهرهای مهریز، تفت، اشکذر، میبد، اردکان، یزد است. این منطقه از مهم‌ترین دشتهای استان یزد، از نظر منابع طبیعی، منابع انسانی و اقتصادی، به شمار می‌رود. میانگین بارش بلندمدت منطقه مورد مطالعه حدود ۶۰ mm است. این منطقه به دلیل واقع بودن در مرکز پرفشار جنب حاره‌ای دارای نوسان دمایی زیاد است. کمینه دمایی ثبت شده در ایستگاه یزد 18°C - و بیشینه آن $45/6^{\circ}\text{C}$ درجه است (۶۵). با توجه به شرایط اقلیمی خشک و فراخشک حاکم بر منطقه و همچنین تنوع واحدهای سنگ‌شناسی از پرکامبرین تا کواترن، انواع رخساره‌های ژئومرفولوژی را می‌توان در حوزه آبخیز دشت - اردکان مشاهده کرد. کوه‌های لخت و پرشیب، درکنار دشتهای صاف و هموار و نزدیکی به چاله‌های کویری در فاصله‌ای کمتر از ۶۰ کیلومتر، انواع رخساره‌های متنوع را به وجود آورده است. به دلیل وجود تنوع بسیار زیاد رخساره‌های ژئومرفولوژی، و همچنین عوامل توپوگرافی و شیب، مقدار انرژی تابشی دریافتی در سطوح مختلف ژئومرفولوژی متفاوت است (۳۶) (شکل ۱).

هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر مؤلفه بخار آب جو بر دقت دمای سطح زمین در دشت یزد-اردکان است. دمای سطح زمین یکی از داده‌های ورودی برای مدل‌سازی فرآیندهای سطح زمین، مانند تبخیر و تعرق و تعیین تنش گیاهان بوده و عنصر مهم بسیاری از مطالعات زیست‌محیطی است. دشت یزد-اردکان در منطقه خشک ایران مرکزی قرار دارد و مدیریت مصرف آب از مهم‌ترین مسائل این منطقه است. نتایج این پژوهش می‌تواند در زمینه‌های مختلف مدیریت محصولات زراعی، از جمله تشخیص تنش، نظارت بر رشد محصول، پیش‌بینی عملکرد و همچنین در برنامه‌ریزی آبیاری مناسب باشد. دمای سطح زمین مهم‌ترین مؤلفه ورودی در مطالعات یادشده است و تأثیر زیادی در دقت نهایی آنها دارد؛ بنابراین بررسی روش‌های مؤثر بر دقت برآورد دمای سطح زمین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

■ مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد بررسی

دشت یزد-اردکان با مساحتی بالغ بر ۱۱۷۴۰۰۰ ha در جنوب غرب استان یزد و در مختصات جغرافیایی $23^{\circ} 48'$ تا 52° تا $50' 11''$ طول شرقی و $18^{\circ} 31'$ تا



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه (الف) کشور ایران، (ب) استان یزد، (ج) نقشه کاربری اراضی دشت یزد-اردکان و (د) موقعیت نقاط نمونه‌برداری

داده‌های مورد استفاده

داده‌های ماهواره‌ای

در پژوهش حاضر برای برآورد بخار آب جو، با استفاده از روش تصحیح اتمسفری FLAASH¹ و روش مبتنی بر نسبت اختلاف دمای روشنایی باندها، همچنین برآورد دمای سطح زمین از تصاویر ماهواره لندست ۸ استفاده شد. تصاویر این ماهواره برای سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ تهیه شد که پس از حذف تصاویر ابری و دارای گپ، ۲۰ تصویر بررسی شد. ماهواره لندست ۸، حامل سنجنده‌های TIRS² و OLI³ است. سنجنده TIRS به کمک دو باند در پنجره‌های جوی $10.6 \mu\text{m}$ تا $11.2 \mu\text{m}$ برای باند ۱۰ و $11.5 \mu\text{m}$ تا $12.5 \mu\text{m}$ برای باند ۱۱ قادر به ثبت تابش‌های مادون قرمز حرارتی با قدرت تفکیک مکانی 100 m است (۶۰). به منظور برآورد بخار آب جو با استفاده از سنجنده مودیس، از باندهای ۲، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ تصویر سنجنده مودیس با نام MOD021 با قدرت تفکیک مکانی 1 km استفاده شد. سنجنده مودیس یکی از سنجنده‌های مستقر بر ماهواره تراست. دارای ۳۶ باند در محدوده $0.4 \mu\text{m}$ تا $14.4 \mu\text{m}$ طیف الکترومغناطیسی

است که ۲۰ باند آن در محدوده مرئی و ۱۶ باند آن در ناحیه حرارتی قرار دارد (۱۶). این سنجنده هر یک یا دو روز کل زمین را پوشش می‌دهد، بنابراین دارای قدرت تفکیک زمانی بالایی است. به منظور ارزیابی متقابل دمای سطح زمین از محصول دمای سطح زمین سنجنده مودیس تحت عنوان MOD11A1 استفاده شد. این محصول دارای قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر و قدرت تفکیک زمانی روزانه و حاوی اطلاعات دمای سطح زمین در زمان روز و شب و گسیلمندی است. از دو باند مادون قرمز حرارتی کانال ۳۱ در محدوده طول موج $10.78 \mu\text{m}$ تا $11.28 \mu\text{m}$ و کانال ۳۲ در محدوده طول موج $11.77 \mu\text{m}$ تا $12.27 \mu\text{m}$ ، با استفاده از خوارزمیک پنجره مجزا^۴ برآورد شد (جدول ۱) (۵۷). محصول LST سنجنده مودیس در دمای 10°C تا 50°C و بخار آب 0.4 cm تا 4 cm در مقیاس 1 km اعتبارسنجی شده و دارای دقت بهتر از یک درجه کلون برای هر دو سنجنده مودیس است (۲۹، ۶۳). در پژوهش حاضر برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای از نرم‌افزارهای ENVI، MATLAB و ArcGIS استفاده شد.

جدول ۱. مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در پژوهش حاضر

باند	طول موج (μm)	قدرت تفکیک مکانی (m)
باند ۱- باند هواویزه/ساحلی	$0.433 - 0.453$	
باند ۲- آبی	$0.450 - 0.515$	
باند ۳- سبز	$0.525 - 0.600$	
باند ۴- قرمز	$0.630 - 0.680$	۳۰
باند ۵- مادون قرمز نزدیک	$0.845 - 0.855$	
باند ۶- مادون قرمز طول موج کوتاه	$1.560 - 1.660$	
باند ۷- مادون قرمز طول موج کوتاه	$2.100 - 2.130$	
باند ۸- پانکروماتیک	$0.500 - 0.680$	۱۵
باند ۹- سیروس	$1.360 - 1.390$	۳۰
باند ۱۰- مادون قرمز حرارتی	$10.30 - 11.30$	۱۰۰
باند ۱۱- مادون قرمز حرارتی	$11.50 - 12.50$	
باند ۱۲- مرزهای زمین/ ابر/ آتروسل	$0.876 - 0.841$	۲۵۰
باند ۱۷- بخار آب جو	$0.920 - 0.890$	
باند ۱۸- بخار آب جو	$0.941 - 0.931$	
باند ۱۹- بخار آب جو	$0.965 - 0.915$	۱۰۰۰
تصویر دمای سطح زمین		MOD11

4 Split-window algorithm (SWA)

1 Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes

2 Operational Land Imager

3 Thermal Infrared Sensor

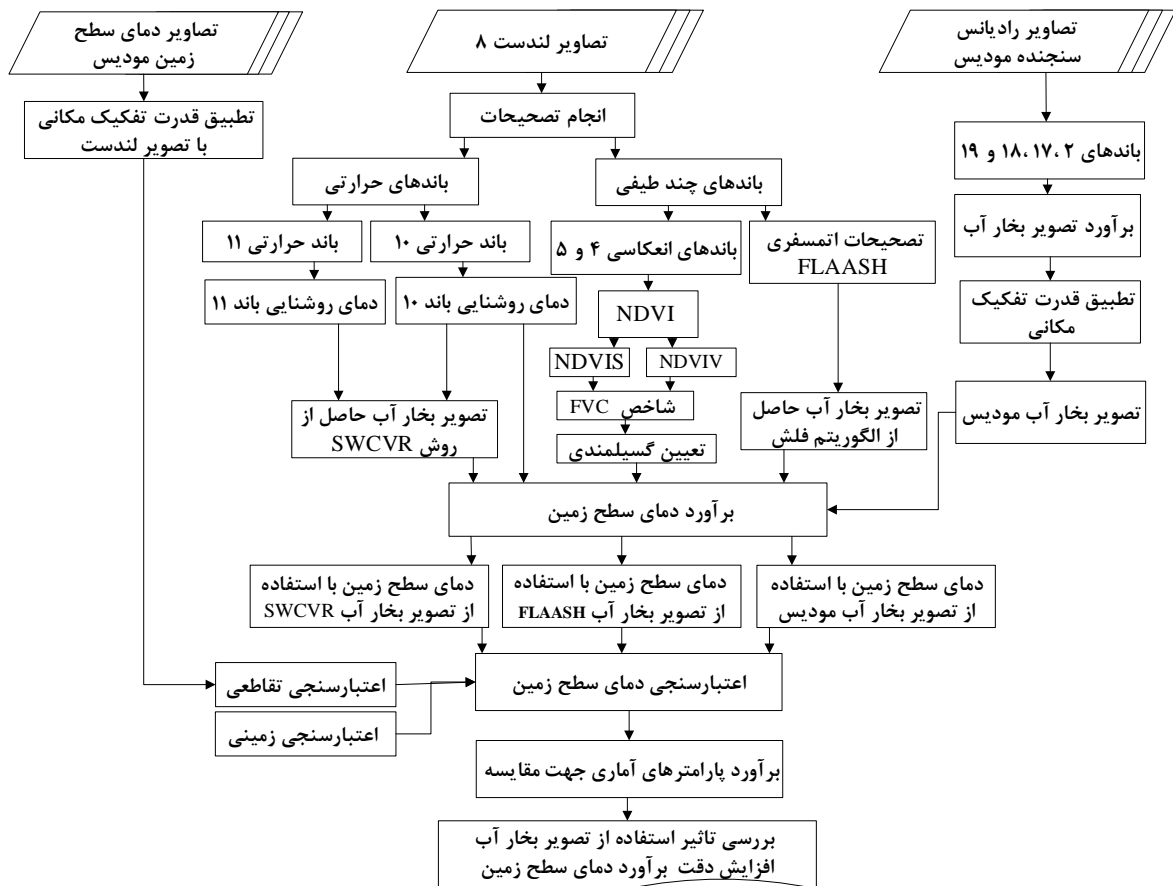
داده‌های زمینی

در پژوهش حاضر برای اعتبارسنجی زمینی خوارزمیک‌های برآورد دمای سطح زمین و بررسی تأثیر بخار آب حاصل از روش‌های مختلف بر دقت برآورد دما از ترمومتر برای اندازه‌گیری دما استفاده شد. ابتدا نقاطی با پوشش همگن برای نمونه‌برداری زمینی انتخاب شد و در تاریخ ۲۰۲۰/۰۵/۱۶ همزمان با عبور ماهواره لندست ۸ از منطقه مورد بررسی، دمای سطح زمین اندازه‌گیری شد

(شکل ۱). با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه اقلیم خشک دارد، رخساره‌های بیابانی با پوشش همگن و یک-دست، مانند اراضی سنگ‌فرش بیابان، اراضی بایر و تپه‌ماسه‌ای‌ها برای برداشت دما انتخاب شدند (شکل ۲). مراحل انجام پژوهش حاضر به‌طور خلاصه در روندنما نشان داده شده است (شکل ۳).



شکل ۲. تصاویری از اندازه‌گیری زمینی دمای سطح زمین با استفاده از دماسنج رقومی با دقت $\pm 1/5^{\circ}\text{C}$



شکل ۳. نمای کلی از مراحل پژوهش حاضر

برآورد دمای سطح زمین

رقومی به رادیانس تبدیل شد با استفاده از رادیانس حاصل از باندهای حرارتی، دمای تابشی از طریق رابطه ۲ محاسبه شد (۱۳):

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

که در آن:

BT ، دمای تابشی ثبت شده بر سطح سنجنده با واحد $^{\circ}K$ ، K_1 و K_2 اعداد ثابتی هستند که از طریق تقسیم ثابت‌های بازتابندگی بر طول موج موثر (λ) به دست می‌آیند و برای لندست‌های مختلف متفاوت هستند. مقادیر ضریب K_1 در باندهای ۱۰ و ۱۱ ماهواره لندست ۸ بترتیب، $774/89$ و $480/89$ ($W/(m^2 \text{ ster } \mu m)$) و مقادیر ضریب K_2 در باند ۱۰، معادل $1321/08$ و در باند ۱۱، $1201/14$ $^{\circ}K$ می‌باشند (۵۴).

از روش مهم محاسبه گسیلمندی استفاده شد که مبتنی بر شاخص تقاضی نرمال شده پوشش گیاهی^۵ (رابطه ۳) است (۴۸). گسیلمندی در این روش با آستانه‌گذاری بر $NDVI$ و برآورد شاخص کسر پوشش گیاهی^۶ FVC به دست آمد.

$$NDVI = \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED} \right) \quad (3)$$

که در آن:

NIR و RED به ترتیب بازتاب زمینی باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز هستند. مقادیر شاخص $NDVI$ بین ۱- و ۱+ متغیر است (۴۲). با استفاده از آستانه‌گذاری شاخص $NDVI$ ، مقادیر $NDVI_s$ و $NDVI_v$ که مربوط به پوشش گیاهی متراکم و خاک خشک است، برآورد شد. به طوری که مناطقی با شاخص $NDVI$ کمتر از ۰/۲، خاک بدون پوشش گیاهی ($NDVI_s$) و مناطقی با $NDVI$ بیشتر از ۰/۲، پوشش گیاهی ($NDVI_v$) در نظر گرفته شده و شاخص FVC با استفاده از رابطه ۴ برآورد شد (۱۴):

$$FVC = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right) \quad (4)$$

دمای سطح زمین (LST) به عنوان درجه حرارت پوسته زمین تعریف شد؛ به عبارتی گرمایی است که در سطح زمین احساس می‌شود (۵۰). روش‌های مختلفی برای برآورد دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای وجود دارد. که به طور کلی شامل خوارزمیک‌های پنجره مجزا، تک‌باندی^۱، پنجره تکی، روش چندکاناله^۲، روش مبتنی بر زوایای دید چندگانه^۳ و ... است (۲۶). خوارزمیک‌های پنجره مجزا و تک‌باندی به برآورد بخار آب جو به عنوان پارامتر ورودی نیاز دارند؛ بدین منظور در پژوهش حاضر از این دو خوارزمیک استفاده شد تا تأثیر بخار آب حاصل از روش‌های مختلف بر دقت دمای سطح زمین مورد بررسی قرار گیرد.

خوارزمیک پنجره مجزا

خوارزمیک پنجره مجزا براساس اختلاف جذب بین دو باند حرارتی مجاور در محدوده $10 \mu m$ تا $12/5 \mu m$ میکرومتر بر مبنای خطی‌سازی معادله انتقال تشعشعی بر حسب دما یا طول موج عمل می‌کند. این خوارزمیک دمای سطح زمین را از طریق تلفیق خطی دمای تابشی در دو باند حرارتی تخمین می‌زند (۴۹). در پژوهش حاضر از خوارزمیک پنجره مجزا برای برآورد دمای سطح زمین استفاده شد. برای دستیابی به دمای تابشی^۴، ابتدا مقدار رقومی هر پیکسل با استفاده از مقادیر کالیبراسیون داده شده به رادیانس تبدیل شد. برای تبدیل مقدار رقومی هر پیکسل به تابش طیفی در سنجنده از رابطه ۱ استفاده شد (۱۰):

$$L_\lambda = M_L \times Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

که در آن:

L_λ رادیانس طیفی در سنجنده با واحد $W/(m^2 \text{ ster } \mu m)$ ، M_L : ضریب تبدیل ضربی، Q_{cal} : ارزش پیکسل و A_L : ضریب تبدیل تجمیع کننده است. پس از آنکه مقادیر

- 1 Single-Channel Algorithm
- 2 Multi-channel
- 3 Multi-angle
- 4 Brightness temperature

5 Normalized difference vegetation index
6 Fractional vegetation cover

خوارزمیک تک‌باندی

خوارزمیک‌های تک‌باندی بر روی هر یک از باندهای TIRS قابل اجراست. اما از آنجاکه باند اول TIRS (باند ۱۰ لندست ۸) در ناحیه جذب کمتر اتمسفری، به دلیل بیشتر بودن مقادیر عبور اتمسفری قرار دارد، این باند نسبت به باند دوم TIRS (باند ۱۱ لندست ۸) برای برآورد دمای سطح زمین برتری دارد. از خوارزمیک تک‌باندی که در معادله زیر بیان شده است برای محاسبه دمای سطح زمین استفاده شد (رابطه ۹) (۲۱).

$$LST_{SC} = \gamma \left(\frac{1}{LSE} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right) + \delta \quad (9)$$

که در آن:

LST_{SC} ، دمای سطح زمین حاصل از خوارزمیک تک-باندی، LSE گسیلمندی سطح زمین، L_{sen} میزان انرژی ثبت شده در سنجنده برای باند حرارتی، LSE میزان ضریب گسیلمندی مربوط به طول موج باند حرارتی مورد استفاده، γ و δ شاخص‌های وابسته به تابع پلانک هستند که به صورت رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ محاسبه شدند (۶۰).

$$\gamma \approx \frac{T_{sen}^2}{b_{\gamma} L_{sen}} \quad (10)$$

$$\delta \approx T_{sen} - \frac{T_{sen}^2}{b_{\gamma}} \quad (11)$$

که در آن:

T_{sen} دمای درخشندگی ثبت شده در سنجنده، L_{sen} میزان انرژی ثبت شده در سنجنده برای باند حرارتی ۱۰، b_{λ} ضریب ثابتی است که برای باند ۱۰ لندست ۸ برابر با 1324 K در نظر گرفته می‌شود. ψ_1 ، ψ_2 و ψ_3 توابع اتمسفری هستند که طبق رابطه‌های ۱۲ تا ۱۴ محاسبه می‌شوند (۶۴).

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau} \quad (12)$$

$$\psi_2 = -L_d - \frac{L_u}{\tau} \quad (13)$$

$$\psi_3 = L_d \quad (14)$$

با به دست آوردن کسر پوشش گیاهی، برای محاسبه گسیلمندی از رابطه ۵ استفاده شد:

$$LSE = \varepsilon_s \times (1 - FVC) + \varepsilon_v \times FVC \quad (5)$$

که در آن:

ε_s و ε_v به ترتیب مقادیر ثابت ضریب انتشار خاک و پوشش گیاهی است (۷). مقادیر ضریب انتشار خاک و پوشش گیاهی در باند ۱۰ و ۱۱ لندست ۸ به ترتیب، 0.971 ، 0.977 ، 0.987 و 0.989 است (۲۲). پس از محاسبه LSE^1 برای هر یک از باندهای حرارتی، میانگین و اختلاف گسیلمندی این دو باند نیز طبق روابط ۶ و ۷ محاسبه شد:

$$m = \frac{LSE_{10} - LSE_{11}}{2} \quad (6)$$

$$\Delta m = LSE_{10} - LSE_{11} \quad (7)$$

که در آن:

m میانگین گسیلمندی، Δm اختلاف گسیلمندی، LSE_{10} و LSE_{11} به ترتیب گسیلمندی سطح زمین مربوط به باند ۱۰ و ۱۱ است. در آخر دمای سطح زمین با استفاده از رابطه ۸ برآورد شد (۲۲).

$$LST_{SW} = BT_{10} + C_1 (BT_{10} - BT_{11}) + C_2 (BT_{10} - BT_{11})^2 + C_0 + (C_3 + C_4 w) (1 - m) + (C_5 + C_6 w) \Delta m \quad (8)$$

که در آن:

LST_{SW} دمای سطح زمین حاصل از خوارزمیک پنجره مجزا، $BT_{10,11}$ دمای تابشی ثبت شده بر سطح سنجنده با واحد $^{\circ}\text{K}$ ، m میانگین گسیلمندی، Δm اختلاف گسیلمندی و ضرایب ثابت C از طریق شبیه‌سازی با اعداد مختلف در شرایط اتمسفر و سطح به دست آمده است (جدول ۲). w میزان بخار آب جو است که در پژوهش حاضر با استفاده از سه روش مختلف، شامل تصحیح اتمسفری FLAASH، روش SWCVR و با استفاده از تصاویر مودیس برآورد شد.

جدول ۲. مقادیر عددی ضرایب خوارزمیک پنجره مجزا

ضرایب	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
مقدار	-۰/۲۶۸	۱/۳۷۸	۰/۱۸۳	۵۴/۳۰۰	-۲/۲۳۸	-۱۲۹/۲۰۰	۱۶/۴۰۰

حساس به بخار آب شامل باندهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹ به باند ۲ به صورت زیر برآورد شد (رابطه ۱۶):

$$G_{17} = \frac{L_{17}}{L_2}$$

$$G_{18} = \frac{L_{18}}{L_2} \quad (۱۶)$$

$$G_{19} = \frac{L_{19}}{L_2}$$

که در آن:

L_i رادیانس باندهای ۲، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ سنجنده مودیس است. سپس با استفاده از ضرایب شبیه‌سازی شده به وسیله MODTRAN¹ 3.5 و شش ستون جوی استاندارد و همچنین در ده نوع کاربری شامل سطح: برف تازه، جنگل، مزرعه، بیابان، اقیانوس، ابر، علفزار قدیمی، علفزار پوسیده، برگ افرا و علف سوخته، ضرایب ثابت برآورد بخار آب در هر یک از این باندها برآورد شد (رابطه ۱۷) (۴۶).

$$W_{17} = 26.314 - 54.434G_{17} + 28.449G_{17}^2$$

$$W_{18} = 5.012 - 23.017G_{18} + 27.884G_{18}^2 \quad (۱۷)$$

$$W_{19} = 9.446 - 26.887G_{19} + 19.914G_{19}^2$$

که در آن:

W_{17} ، W_{18} و W_{19} بترتیب مقادیر بخار آب باندهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مودیس هست. بخار آب جو دارای ضرایب جذب بسیار متفاوت در باندهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹ سنجنده مودیس است. در یک شرایط جوی معین، مقادیر بخار آب حاصل از سه باند متفاوت است و لازم است میانگین مقدار بخار آب مطابق با معادله زیر برآورد گردید (رابطه ۱۸) (۲۳).

در این روابط τ قابلیت انتقال اتمسفری، L_d تابش رو به پایین اتمسفری و L_u تابش رو به بالای اتمسفری است. برای مناطقی که داده‌های مربوط به انتقال تابش در دسترس نباشد از رابطه ۱۵ برای محاسبه توابع اتمسفری استفاده می‌شود.

$$\psi_1 = 0.14714w^2 - 0.15583w + 1.1234$$

$$\psi_2 = -1.1836w^2 - 0.37607w - 0.53894 \quad (۱۵)$$

$$\psi_3 = 0.04554w^2 + 1.8719w - 0.39071$$

w میزان بخار آب موجود در جو است که در پژوهش حاضر با استفاده از سه روش مختلف، شامل تصحیح اتمسفری FLAASH، روش SWCVR و با استفاده از تصاویر مودیس برآورد شد.

روش‌های برآورد بخار آب جو

منظور از میزان بخار آب جو، متراکم کردن تمام بخار آب ستون جو و اندازه‌گیری ارتفاع آن در هر واحد از سطح است که با واحد $(g \cdot cm^{-2})$ یا $(kg \cdot m^{-2})$ بیان می‌شود (۴۱، ۵۱). بخار آب جو را با استفاده از باند مادون قرمز نزدیک در محدوده $0.88 \mu m$ تا $0.97 \mu m$ که جذب عمده بخار آب جو را دارند و مقایسه آنها با باندهای غیرحساس بخار آب از $0.4 \mu m$ تا $0.865 \mu m$ می‌توان برآورد کرد (۱۷). در پژوهش حاضر تأثیر مؤلفه بخار آب جو بر خوارزمیک پنجره مجزا و تک‌باندی بررسی شد.

استفاده از تصاویر سنجنده مودیس

برای نخستین بار خوارزمیک برآورد بخار آب با استفاده از تصاویر مودیس در سال ۲۰۰۳ مطرح شد. باندهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مودیس در منطقه حساس به بخار آب و باند ۲ در طول موج‌هایی غیرحساس قرار دارند، از باند ۲ برای ازبین بردن بازتاب پوشش سطح زمین استفاده شد (۴۶). نسبت بین باندهای منطقه

نقلیه فضایی، پایگاه نیرویی هوایی و علوم طیفی توسعه یافته است. این خوارزمیک از محاسبات مبتنی بر اصول اولیه فیزیکی از کد انتقال تابشی MODTRAN گردید (۱۵، ۵). هدف اصلی FLAASH از بین بردن اثرات جوی ناشی از پراکندگی مولکولی ذرات و جذب به منظور بازیابی مقادیر "بازتاب_در سطح" است. علاوه بر این، قابلیت برآورد بخار آب جو نیز در این افزونه وجود دارد.

اعتبارسنجی

ارزیابی دقت و اعتبارسنجی دمای حاصل از داده‌های ماهواره‌ای در ابعاد پیکسل، اغلب چالش برانگیز بوده است (۵۹). LST حساسیت بسیاری به تغییرات زمانی و مکانی دارد (۴۳). برای اعتبارسنجی دمای سطح زمین حاصل از تصاویر ماهواره‌ای سه روش: اعتبارسنجی با استفاده از داده‌های زمینی^۱، روش مبتنی بر رادیانس^۲ و ارزیابی متقابل^۳ وجود دارد (۲۶). در روش اعتبارسنجی زمینی به طور مستقیم LST مبتنی بر ماهواره را با دمای سطح زمین اندازه‌گیری شده، در زمان عبور ماهواره به صورت زمینی مقایسه می‌شود (۶۴، ۳۰). روش مبتنی بر رادیانس: روشی شبیه‌سازی و مقایسه بین دمای بازیابی حاصل از داده‌های ماهواره‌ای با نتایج حاصل از مدل انتقال تابشی است که نیاز به دانش دقیق از ضریب گسیل سطح، شرایط سطح و پروفیل‌های اتمسفری در زمان عبور سنجنده دارد (۵۶، ۱۱). روش ارزیابی متقابل محصول LST با اعتبار بالا را به عنوان مرجع در نظر می‌گیرد و LST برآورد شده با آن مقایسه می‌شود (۳۷، ۴۴). برای ارزیابی متقابل دمای سطح زمین با استفاده از خوارزمیک‌های پنجره مجزا و تک‌باندی و بررسی تأثیر بخار آب حاصل از روش‌های مختلف بر دقت آنها از تصاویر دمای سطح زمین سنجنده مودیس استفاده شد؛ چون محصول دمای سطح زمین سنجنده مودیس در بیش از ۵۰ مورد با داده‌های محلی اعتبارسنجی شد که دقت بهتر از یک درجه کلین را نشان داد (۳۷). مزیت استفاده از روش ارزیابی متقابل، عدم نیاز به اندازه‌گیری

$$W = f_{17}W_{17} + f_{18}W_{18} + f_{19}W_{19} \quad (18)$$

که در آن:

$$f_{19} \text{ و } 0/444 \quad f_{18} \text{ و } 0/141 \quad f_{17} \text{ ضرایب توابع وزنی}$$

۰/۴۱۵ با واحد gr/cm^3 در نظر گرفته شد.

روش SWCVR

به منظور برآورد بخار آب جو با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای که مبتنی بر نسبت اختلاف دمای روشنایی باندهاست، می‌توان از روش‌های پنجره مجزای مادون قرمز حرارتی استفاده کرد (۲۰، ۲۵). در به کارگیری این تکنیک به دو باند مادون قرمز حرارتی، یکی نزدیک باند جذب بخار آب و دیگری در پنجره جوی، نیاز است (۶۷). روش نسبت واریانس کواریانس پنجره مجزا بر مبنای خوارزمیک پنجره مجزا بنا شده است و سپس در سال ۲۰۰۳ با اضافه کردن محدودیت‌هایی اصلاح شد (۴۷، ۲۷). این روش امکان برآورد بخار آب با استفاده از تصاویر لندست ۸ را ایجاد کرده است (روابط ۱۹ تا ۲۲) (۶۰).

$$\omega = a \left(\frac{\tau_j}{\tau_i} \right) + b \quad (19)$$

$$\frac{\tau_j}{\tau_i} = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_j} R_{j,i} \quad (20)$$

$$R_{j,i} = \frac{\sum_{k=1}^N (BT_{10} - \overline{BT_{10}})(BT_{11} - \overline{BT_{11}})}{\sum_{k=1}^N (BT_{10} - \overline{BT_{10}})^2} \quad (21)$$

$$r^2 = \frac{\left(\sum_{k=1}^N (BT_{10} - \overline{BT_{10}})(BT_{11} - \overline{BT_{11}}) \right)^2}{\sum_{k=1}^N (BT_{10} - \overline{BT_{10}})^2 \sum_{k=1}^N (BT_{11} - \overline{BT_{11}})^2} = R_{i,j} R_{j,i} \quad (22)$$

در روابط بالا: w میزان بخار آب جو، BT_{10} و BT_{11} دمای درخشندگی باند ۱۰ و ۱۱، w مقدار بخار آب، τ ضریب انتقال اتمسفری و a و b ضرایب ثابتی هستند که به ترتیب ۱۳/۴۱- و ۱۴/۱۵ در نظر گرفته شده است.

FLAASH بازیابی بخار آب از طریق تصحیح اتمسفری

تصحیح اتمسفری FLAASH بسته‌ای نرم‌افزاری است که توسط آزمایشگاه تحقیقات نیروی هوایی، اداره وسایل

1 T-based

2 Radiance-based

3 Cross-validation

مطالعه در گروه RMSE کمتر از 1°C ، $0.32/3$ در گروه بین یک تا دو، و به ترتیب $0.32/5$ ، $0.12/2$ و $0.3/3$ از منطقه مورد مطالعه در گروه RMSE ۲ تا ۳، ۳ تا ۴ و بیشتر از 4°C قرار گرفته است. همچنین نتایج استفاده از تصویر بخار آب حاصل از تصحیح اتمسفری FLAASH در خوارزمیک پنجره مجزا نیز نتایج مشابهی با نتایج استفاده از بخار آب حاصل از تصاویر مودیس نشان داد؛ به طوری که به ترتیب $0.19/4$ ، $0.32/4$ ، $0.32/8$ ، $0.12/1$ و $0.3/4$ از مساحت منطقه مورد مطالعه در گروه RMSE کمتر از ۱، ۲ تا ۳، ۳ تا ۴ و بیشتر از ۴ قرار گرفت. استفاده از تصویر بخار آب جو حاصل از روش SWCVR در خوارزمیک پنجره مجزا موجب کاهش خطای RMSE در دسته‌های بیشتر از 2°C شده است و در آن $0.31/6$ ، $0.3/6$ ، $0.11/8$ و $0.2/9$ از مساحت منطقه مورد مطالعه در گروه RMSE کمتر از ۲، ۲ تا ۳، ۳ تا ۴ و بیشتر از 4°C قرار دارد. بنابراین استفاده از بخار آب حاصل از روش SWCVR نسبت به سایر روش‌ها برای برآورد دمای سطح زمین با استفاده از خوارزمیک پنجره مجزا مناسب‌تر است. نتایج بررسی تأثیر استفاده از روش‌های مختلف برآورد بخار آب بر دقت دمای سطح زمین حاصل از خوارزمیک تک‌باندی نشان داد که در تصاویر بخار آب حاصل از تصاویر سنجنده مودیس و تصحیحات اتمسفری FLAASH نتایج مشابهی در برآورد دمای سطح زمین داشتند؛ به طوری که در روش استفاده از تصویر مودیس و تصحیحات اتمسفری FLAASH به ترتیب $0.13/1$ ، $0.23/6$ ، $0.35/9$ ، $0.21/3$ ، $0.6/2$ و $0.12/19$ ، $0.33/13$ ، 0.36 ، $0.11/15$ ، $0.6/14$ از منطقه مورد مطالعه در گروه RMSE کمتر از یک، ۱ تا ۲، ۲ تا ۳، ۳ تا ۴ و بیشتر از 4°C قرار دارند. تنها تفاوتی که در نتایج حاصل از ارزیابی متقابل این دو روش وجود دارد این است که در روش استفاده از تصاویر مودیس برای برآورد بخار آب، بیشتر مساحت منطقه در گروه RMSE کمتر از 1°C قرار گرفته است و علت آن را می‌توان مربوط به قدرت تفکیک مکانی مشابه محصول دمای سطح زمین روش سنجنده مودیس و تصویر بخار آب آن سنجنده دانست. نتایج حاصل از استفاده روش SWCVR در برآورد بخار آب جو و استفاده از آن در برآورد دمای سطح زمین نشان

زمینی دماست. همچنین این روش، افزون بر اینکه روش ثابتاتی در ارزیابی دقت دمای سطح است، با توجه به عدم وجود پایگاه داده صحت‌سنجی دما در کشورمان برای هر زمان و مکان قابل اجراست. در پژوهش حاضر دمای سطح زمین با استفاده از دو روش ارزیابی متقابل و زمینی مورد بررسی قرار گرفت.

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |LST_A - LST_F|}{n} \quad (23)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (LST_A - LST_F)^2}{n}} \quad (24)$$

$$SD_{LST} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [(LST_A - LST_F) - MD_{LST}]^2} \quad (25)$$

که در آن‌ها:

MAD: میانگین قدر مطلق اختلاف‌ها، RMSE: ریشه میانگین مربع خطا، SD: انحراف معیار اختلاف‌ها، LST_A : دمای سطح زمین حاصل از سنجنده مودیس یا نقاط اعتبارسنجی زمینی و LST_F : دمای سطح حاصل از سنجنده لندست ۸ در واحد $^{\circ}\text{C}$ ، N تعداد نقاط یا پیکسل‌های اعتبارسنجی انتخاب‌شده، است.

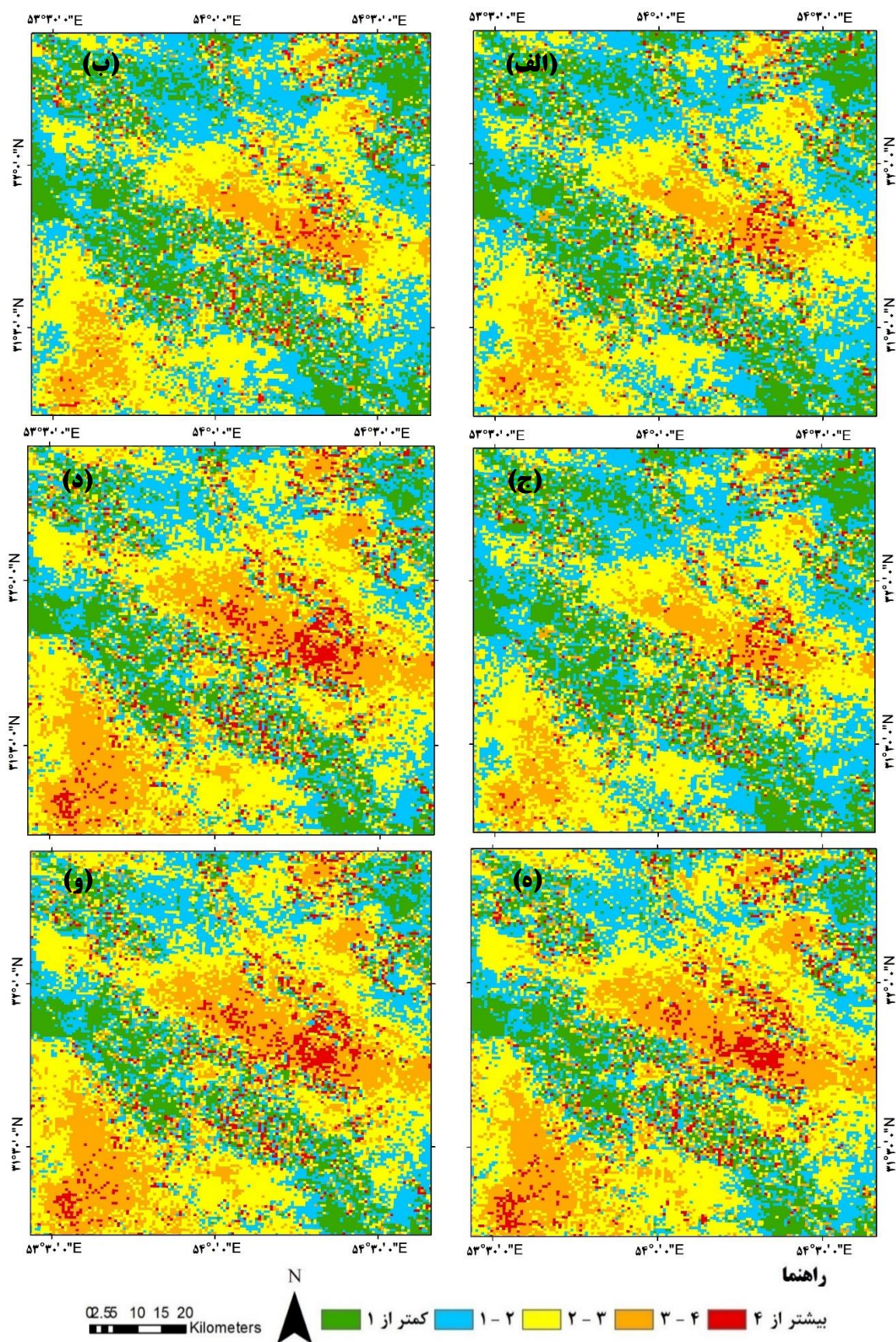
نتایج و بحث

به‌منظور ارزیابی متقابل و بررسی تأثیر استفاده از روش‌های مختلف تخمین بخار آب جو بر برآورد دمای سطح زمین، از ۲۰ تصویر دمای سطح زمین سنجنده مودیس استفاده شد. پس از حذف گپ و ابر موجود در تصاویر مودیس به اعتبارسنجی خوارزمیک‌های برآورد دمای سطح زمین حاصل از تصاویر لندست پرداخته شد و تصویر شاخص آماری RMSE مربوط به خوارزمیک پنجره مجزا و تک‌باندی در روش‌های مختلف تخمین بخار آب برآورد شد. برای مقایسه بهتر در ۴ گروه: کمتر از ۱، ۱ تا ۲، ۲ تا ۳، ۳ تا ۴ و بیشتر از 4°C طبقه‌بندی شد (شکل ۴). نتایج حاصل از ارزیابی متقابل نشان داد که در خوارزمیک پنجره مجزا که از دو باند حرارتی استفاده شده است، در صورتی که از بخار آب حاصل از تصاویر سنجنده مودیس استفاده شود $0.19/8$ از منطقه مورد

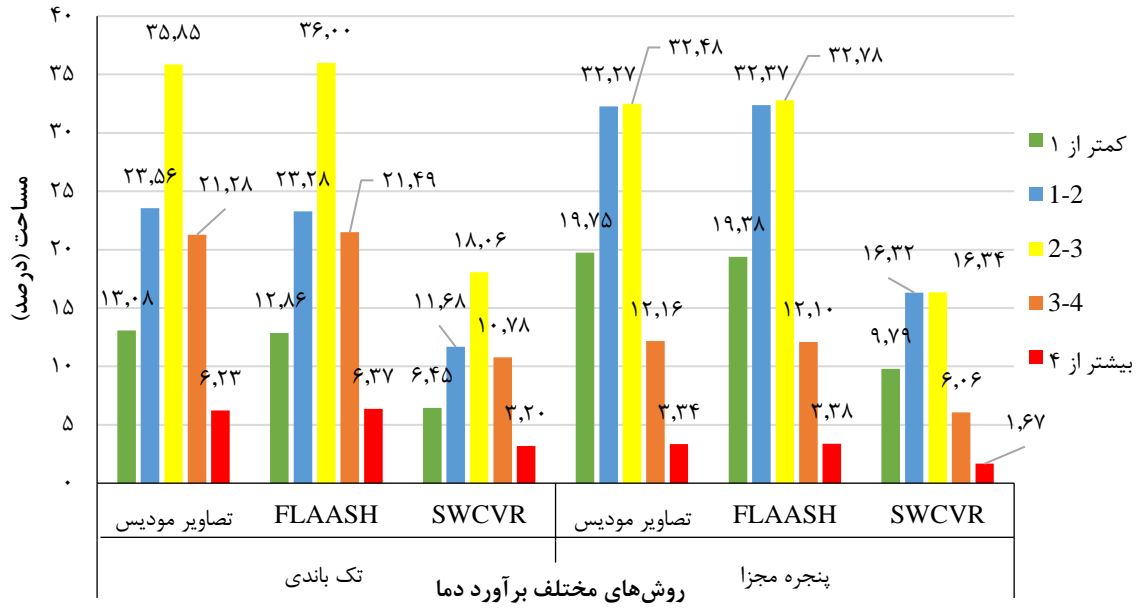
داد که این روش نسبت به سایر روش‌ها از دقت بالاتری برخوردار است. به طوری که $0.15/6$ ، $0.26/2$ ، $0.33/5$ ، $0.19/70$ و $0.5/10$ از منطقه مورد مطالعه به ترتیب در گروه‌های RMSE کمتر از ۱، ۱ تا ۲، ۲ تا ۳، ۳ تا ۴ و بیشتر از 4°C قرار گرفته است. بنابراین در برآورد دمای سطح زمین با استفاده از خوارزمیک تک‌باندی، روش SWCVR برای برآورد بخار آب جو موجب افزایش دقت می‌شود. نتایج حاصل از مقایسه تصویر RMSE حاصل از خوارزمیک پنجره مجزا و تک‌باندی که در هر دو از SWCVR برای برآورد بخار آب جو استفاده شده است نشان داد که روش پنجره مجزا از دقت بالاتری برخوردار است (شکل ۵). در پژوهش حاضر برای اعتبارسنجی زمینی روش‌های برآورد دمای سطح زمین و همچنین بررسی تأثیر استفاده از روش‌های مختلف برآورد بخار آب جو بر دقت برآورد دمای سطح زمین، از اندازه‌گیری زمینی دما استفاده شد. به این منظور، ابتدا نقاط نمونه‌برداری زمینی در مناطقی با پوشش همگن انتخاب شد، سپس در زمان تصویربرداری ماهواره لندست اقدام به برداشت دما در این نقاط گردید. اعتبارسنجی زمینی دمای سطح همواره چالش برانگیز بوده است، زیرا LST حساسیت زیادی به تغییرات زمانی و مکانی دارد. به طوری که ممکن است بیش از 10°K در مسافت چند سانتیمتر و یا بیش از 1°K در مدت زمان یک دقیقه تغییر کند. یکی از اصلی‌ترین مشکلات در واسنجی داده‌های سنجنش از دور با استفاده از داده‌های زمینی عدم هماهنگی بین مقیاس اندازه‌گیری زمینی (کوچک‌تر از یک مترمربع) و یک پیکسل تصاویر ماهواره‌ای است. زمانی این نوع اعتبارسنجی داده‌ها معتبر است که پوشش سطح در مقیاس زمینی همگن باشد. چرا که داده‌های ماهواره‌ای دمای یک پیکسل را به طور متوسط نشان می‌دهند. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم خشک و بیابانی است، اراضی رسی بدون هیچ پوشش گیاهی، اراضی سنگفرش بیابان با پوشش یکنواخت سنگریزه و تپه‌های ماسه‌ای و ... با ایجاد

پیکسل‌های خالص مکان‌های مناسبی برای اعتبارسنجی زمینی‌اند. با توجه به وسعت منطقه مورد مطالعه، عدم دسترسی سریع به نقاط با پیکسل‌های خالص، تنوع کاربری اراضی و محدودیت زمانی به علت تغییر سریع دما در واحد زمان، امکان اندازه‌گیری دما در تعداد زیادی نقطه وجود نداشت. دمای سطح زمین در مناطقی که پوشش همگن داشتند انتخاب و سعی شد در کاربری‌های مختلف اراضی، مانند اراضی بایر، تپه‌های ماسه‌ای، مراتع، اراضی سنگفرش بیابان و اراضی صخره‌ای نمونه‌ها جمع‌آوری شود. بنابراین اندازه‌گیری دما در منطقه با پوشش همگن که پیکسل خالصی را ایجاد کنند و دقیقاً همزمان با گذر ماهواره باشد از اهمیت خاصی برخوردار است. نتایج حاصل از اعتبارسنجی مبتنی بر داده‌های زمینی نشان داد که حداقل خطای مطلق به میزان 0.19°C مربوط به خوارزمیک پنجره مجزایی است که در آن برای برآورد بخار آب جو از روش SWCVR استفاده شده است. به طور کلی روش‌های پنجره مجزا خطای مطلق کمتری نسبت به روش‌های تک‌باندی داشته است. نتایج بررسی بیشترین خطای مطلق نیز نشان داد که خوارزمیک پنجره مجزا حداکثر خطای مطلق $0.5/71^{\circ}\text{C}$ را نشان داد، در صورتی که در خوارزمیک پنجره مجزا، حاصل از روش SWCVR، حداکثر خطای مطلق $0.4/81^{\circ}\text{C}$ بوده است. مقادیر RMSE و MADE در روش‌های مبتنی بر خوارزمیک‌های تک‌باندی به هم نزدیک و کمترین آن مربوط به روش SWCVR است که به ترتیب $0.3/53^{\circ}\text{C}$ و $0.3/28^{\circ}\text{C}$ برآورد شده است. روش پنجره مجزای مبتنی بر روش SWCVR کمترین مقادیر RMSE و MADE را به میزان $0.3/47^{\circ}\text{C}$ و $0.3/18^{\circ}\text{C}$ نشان می‌دهد.

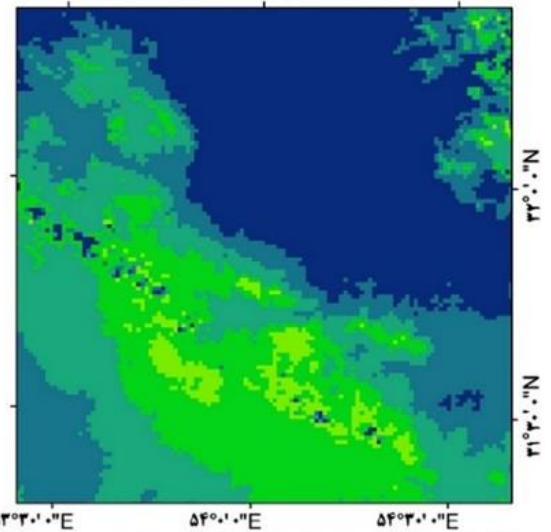
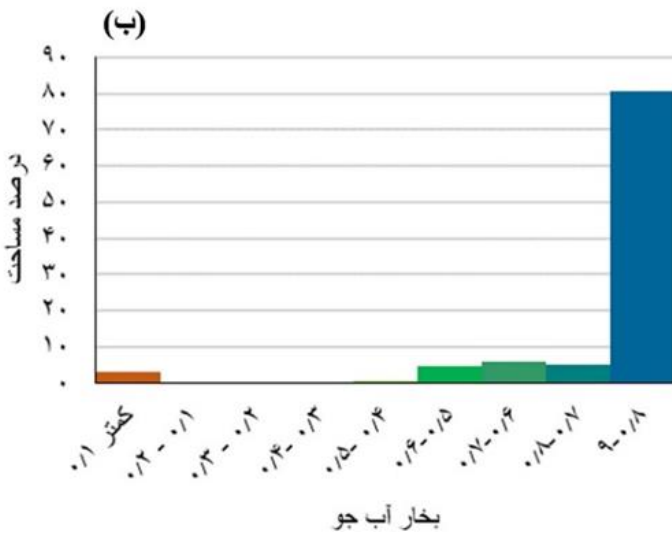
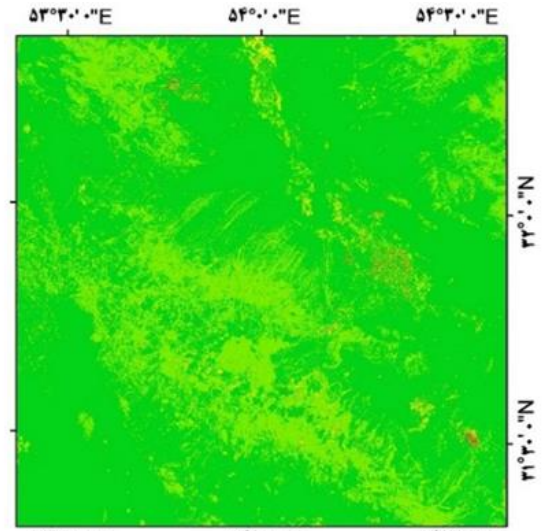
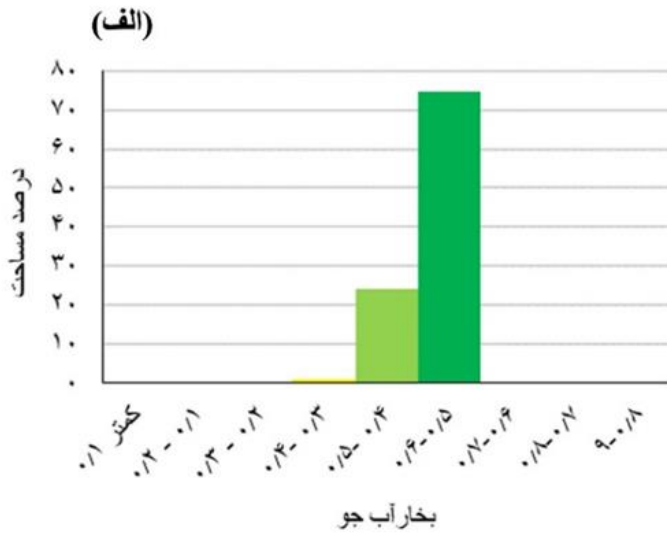
به طور کلی در میان روش‌های برآورد بخار آب جو، روش SWCVR به منظور برآورد دمای سطح زمین مناسب‌تر است و استفاده از آن در خوارزمیک پنجره مجزا در مقایسه با خوارزمیک تک‌باندی موجب افزایش دقت می‌شود (جدول ۳).



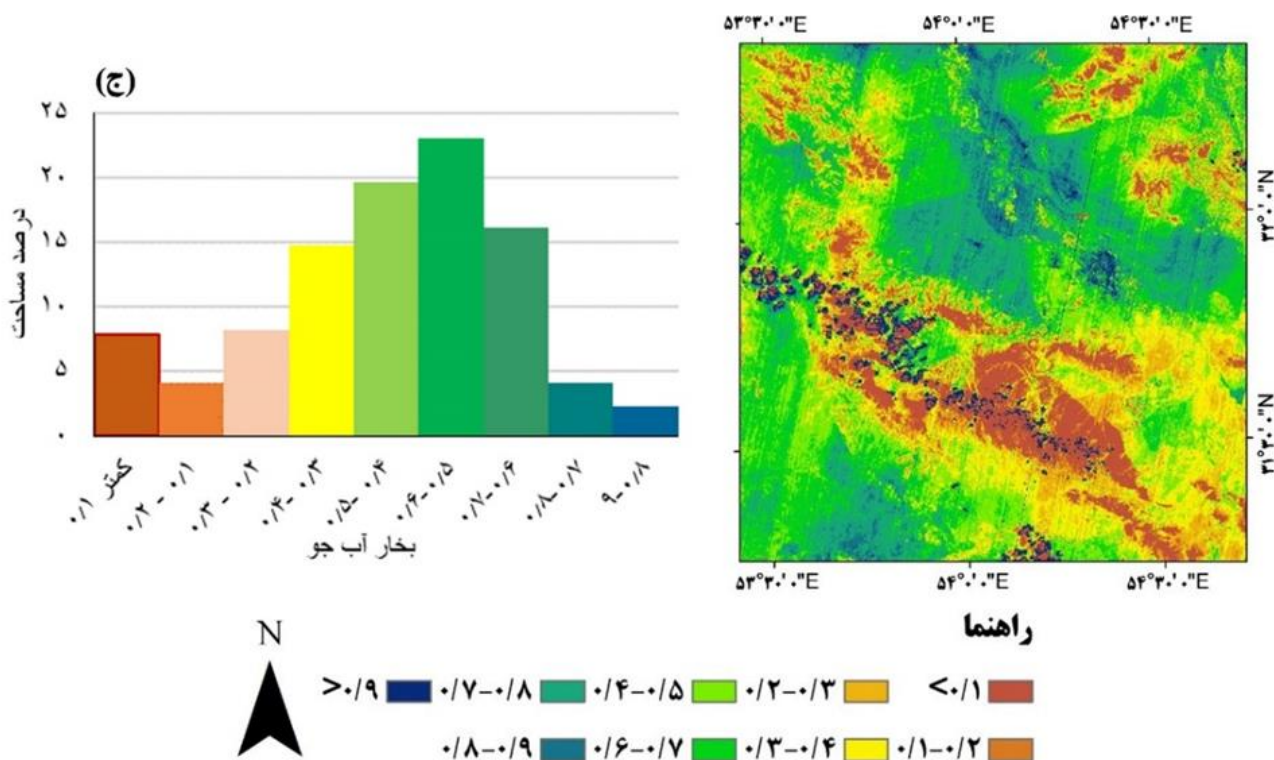
شکل ۴. تصویر RMSE الگوریتم پنجره مجزا با استفاده از: الف) بخار آب FLAASH، ب) مودیس، ج) SWCVR و پنجره تک‌باندی: د) بخار آب FLAASH، ه) مودیس و و) SWCVR (°C)



شکل ۵. مقایسه درصد مساحت تصاویر RMSE طبقه‌بندی شده حاصل از ارزیابی متقابل



شکل ۶. تصویر بخار آب حاصل از روش‌های مختلف و هیستوگرام آنها به ترتیب روش‌های الف) تصحیح اتمسفری FLAASH (ب) مودیس، و ج) SWCVR (ج)



ادامه شکل ۶. تصویر بخار آب حاصل از روش‌های مختلف و هیستوگرام آنها به ترتیب روش‌های الف) تصحیح اتمسفری FLAASH (ب) مودیس، و ج) SWCVR (°C)

جدول ۳. مقایسه شاخص‌های آماری در دمای حاصل از روش پنجره مجزا و تک‌باندی با استفاده از روش‌های مختلف برآورد بخار آب

روش پنجره مجزا			روش تک‌باندی			
SWCVR	مودیس	FLAASH	SWCVR	مودیس	FLAASH	
۳/۴۷	۳/۴۹	۳/۵۰	۳/۵۳	۳/۵۴	۳/۵۵	RMSE
۳/۱۸	۳/۲۰	۳/۲۴	۳/۲۸	۳/۲۹	۳/۲۹	MADE
۴/۸۱	۴/۸۶	۵/۳۱	۵/۷۱	۵/۷۱	۵/۷۱	MAX
۰/۱۹	۰/۲۴	۰/۶۵	۱/۰۶	۱/۰۶	۱/۰۶	MIN
۱/۴۴	۱/۴۴	۱/۳۳	۱/۳۲	۱/۳۳	۱/۳۳	SD

جو بر دقت دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر لندست ۸ پرداخته‌اند. بررسی نقشه‌های RMSE و تطبیق آن با نقشه کاربری اراضی نشان داد بیشترین خطا مربوط به دره مناطق کوهستانی و مناطق با رطوبت زیاد است که با نتایج پژوهش دیگری، که بیان داشته بیشترین خطا در برآورد دمای سطح زمین مربوط به پوشش گیاهی و مناطق با رطوبت زیاد است، مطابقت دارد (۳۸). در برآورد دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر استر نشان داده

نتایج حاصل از بررسی تصاویر بخار آب جو حاصل از روش‌های مختلف و هیستوگرام آنها نشان داد که روش SWCVR قابلیت بیشتری در تفکیک مقادیر مختلف بخار آب جو دارد، در صورتی که در دو روش دیگر بخار آب در یک دامنه برآورد شده و روش استفاده از تصاویر مودیس به دلیل قدرت تفکیک مکانی کم قادر به برآورد دقیق بخار آب جو در کاربری‌هایی با مساحت کم را ندارد (شکل ۶). پژوهش‌های اندکی به بررسی تأثیر بخار آب

بر داده زمینی در دمای اندازه‌گیری در مناطق همگن با پوشش یکنواخت استفاده شد. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه در مناطق خشک ایران مرکزی قرار دارد، از رخساره‌هایی مانند سنگفرش بیابان، تپه‌ماسه‌ای و مراتع با پوشش یکسان و اندک تشکیل شده است که با پوشش همگن، پیکسل‌های خالصی ایجاد کرده‌اند و برای اعتبارسنجی زمینی مناسب است. نتایج حاصل از ارزیابی متقابل و زمینی نشان داد که روش SWCVR در هر دو خوارزمیک، موجب افزایش دقت برآورد دمای سطح زمین شده است. برآورد دمای سطح زمین با استفاده از خوارزمیک پنجره مجزا، دقت بیشتری نسبت به خوارزمیک تک بانندی نشان داد. به طوری که در تصویر RMSE حاصل از روش پنجره مجزای مبتنی بر SWCVR در مقایسه با روش تک بانندی، $1/53$ ، $4/72$ ، $1/72$ درصد از مساحت گروه خطای RMSE بیشتر از 4°C ، $3-4^{\circ}\text{C}$ و $2-3^{\circ}\text{C}$ کاسته شده و $4/64$ ، $3/34$ درصد به مساحت طبقات RMSE $2-1^{\circ}\text{C}$ و کمتر از 1°C افزوده شده است. روش‌های برآورد دمای مبتنی بر خوارزمیک تصحیح اتمسفری FLAASH و تصاویر مودیس نتایج مشابهی در برآورد دمای سطح زمین داشته‌اند. در روش تخمین بخار آب جو با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس به دلیل قدرت تفکیک مکانی کم، بخار آب در کاربری‌ها با مساحت کم به درستی برآورد نشده است. هیستوگرام تصاویر بخار آب جو حاصل از روش‌های مختلف نیز بررسی شد که بیانگر قابلیت بهتر روش SWCVR در برآورد بخار آب جو بود. بنابراین نتایج پژوهش حاضر می‌تواند برای انتخاب خوارزمیک بهینه برای برآورد دمای سطح زمین راهگشا باشد و در مطالعاتی مانند زمینه‌های مختلف مدیریت محصولات زراعی، از جمله تشخیص تنش، نظارت بر رشد محصول، پیش‌بینی عملکرد و همچنین در برنامه‌ریزی آبیاری استفاده می‌شود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، تأثیر گسیلمندی بر دقت روش‌های مختلف برآورد دمای سطح زمین نیز بررسی شود.

شد که استفاده از بخار آب جو موجب افزایش دقت شده است (۶۶). نتایج پژوهش دیگری نشان داد خطا در برآورد بخار آب موجب کاهش دقت برآورد دمای سطح زمین می‌شود (۶۰) که با نتایج پژوهش حاضر که ثابت می‌کند دقت برآورد دمای سطح با دقت تخمین بخار آب جو ارتباط مستقیم دارد، منطبق است. نتایج نشان داد که استفاده از روش SWCVR در برآورد بخار آب جو موجب افزایش دقت برآورد دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر لندست ۸ می‌شود که با نتایج پژوهشی که ثابت کرد استفاده از تصویر بخار آب حاصل از روش SWCVR موجب افزایش دقت برآورد دمای سطح زمین می‌شود، منطبق است (۴).

■ نتیجه‌گیری

با توجه به ناهمگنی شدید ویژگی‌های سطح زمین، از جمله پوشش گیاهی، توپوگرافی و رطوبت خاک، دمای سطح زمین به سرعت در واحد زمان و مکان تغییر می‌کند. بنابراین دمای نقطه‌ای اندازه‌گیری شده نمی‌تواند اطلاعات دقیقی از دمای سطح زمین در سطحی وسیع ارائه دهد. با توجه به محدودیت دستگاه‌های زمینی برای اندازه‌گیری دمای سطح زمین در سطح وسیع، تنها روش برآورد دمای سطح زمین با قدرت تفکیک زمانی و مکانی مناسب، سنسور از دور است. یکی از مؤلفه‌های مورد نیاز برای برآورد دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، بخار آب جو است. در پژوهش حاضر بخار آب جو از طریق روش‌های استفاده از تصاویر سنجنده مودیس، تصحیحات اتمسفری FLAASH و روش SWCVR برآورد شد. در ادامه، تأثیر بخار آب جو بر دقت برآورد دمای سطح زمین حاصل از خوارزمیک پنجره مجزا و تک بانندی بررسی شد. به این منظور، از دو روش اعتبارسنجی زمینی و تقاطعی برای اعتبارسنجی دمای سطح زمین حاصل از روش‌های مختلف برآورد بخار آب استفاده شد. در اعتبارسنجی به روش تقاطعی از تصاویر دمای سطح زمین سنجنده مودیس مبنا قرار گرفت و در اعتبارسنجی به روش مبتنی

■ References

1. Albert, P., Bennartz, R., Preusker, R., Leinweber, R., & Fischer, J. (2005). Remote sensing of atmospheric water vapor using the moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22 (3), 309-314.
2. Allan, R. P., Lavers, D. A., & Champion, A. J., (2016). Diagnosing links between atmospheric moisture and extreme daily precipitation over the UK, *International Journal of Climatology*, 36 (9), 3191–3206.
3. Alshawaf, F., Balidakis, K., Dick, G., Heise, S., & Wickert, J. (2017). Estimating trends in atmospheric water vapor and temperature time series over Germany. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10, 3117-3132.
4. Arabi Aliabad, F., Zare, M., Ghafarian Malamiri, H. (2020). A comparative assessment of the accuracies of split-window algorithms for retrieving of land surface temperature using Landsat 8 data. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2, 260-272.
5. Berk, A. L.S., Bernstein, D.C., Robertson, P.K., Acharya, G.P., & Chetwynd, J.H. (1996). MODTRAN Cloud and Multiple Scattering Upgrades with Application to AVIRIS, *Summaries of the Sixth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication*, Pasadena, California, 1-7.
6. Bhatia, N., Stein, A., Reusen, I., & Tolpekin, V. A. (2018). An optimization approach to estimate and calibrate column water vapour for hyperspectral airborne data. *International journal of remote sensing*, 39 (8), 2480-2505.
7. Buntoung, S., Janjai, S., Nunez, M., Pattarapanitchai, S., Nimnuan, P., & Pariyothon, J. (2020). Spatial and temporal changes of precipitable water vapour in Thailand. *Physical Geography*, 41 (5), 467-488.
8. Carlson T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index, *Remote Sensing of Environment*, 62, 241-252.
9. Carlson, T. N., Perry, EM., & Schmugge, T. J., (1990). Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 52, 45–69.
10. 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), 893-903.
11. Coll, C., Caselles, V., Valor, E., & Niclòs, R. (2012). Comparison between different sources of atmospheric profiles for land surface temperature retrieval from single channel thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*, 117, 199–210.
12. Cristóbal, J., Jiménez-Muñoz, J., Prakash, A., Mattar, C., Skoković, D., & Sobrino, J. (2018). An improved single-channel method to retrieve land surface temperature from the Landsat-8 Thermal Band. *Remote Sensing*, 10 (3), 431.
13. Ding, H. and Shi, W. (2013). Land-use/land-cover change and its influence on surface temperature: a case study in Beijing City, *International Journal of Remote Sensing*, 34 (15), 5503-5517.
14. Dymond, J.R., Stephens, P.R., Newsome, P.F., & Wilde, R.H. (1992). Percentage vegetation cover of a degrading rangeland from SPOT. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 1999–2007.
15. Felde, G. W., G. P. Anderson, S. M. Adler-Golden, M. W. Matthew & A. Berk, (2003). Analysis of Hyperion Data with the FLAASH Atmospheric Correction Algorithm. Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery IX. *SPIE Aerosense Conference*, Orlando. 21-25 April 2003.
16. Frey, R.A., Ackerman, S.A., Liu, Y., Strabala, K.I., Zhang, H., Key, J.R., & Wang, X. (2008). Cloud detection with MODIS. Part I: Improvements in the MODIS cloud mask for collection 5. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25 (7), 1057-1072.
17. Frouin, R., Deschamps, PY., Lecomte, P., (1989) Determination from space of atmospheric total water vapour amounts by differential absorption near 940 nm: theory and airborne verification. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 29, 441-460.

18. Gao, B. C., & Kaufman, Y. J. (2003). Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108 (D13), 4389.
19. He, J., & Liu, Z. (2019). Comparison of Satellite-Derived Precipitable Water Vapor Through Near-Infrared Remote Sensing Channels. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57 (12), 10252-10262.
20. Jedlovec, G. J. (1990). Precipitable Water Estimation from High-Resolution Split Window Radiance Measurements. *Journal of Applied Meteorology*, 29 (9), 863-877.
21. Jiménez-Muñoz, J. C., Cristóbal, J. A., Sobrino, G., Soria, M., Ninyerola, & X. Pons. (2009). Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data, *IEEE Transaction of Geosciences in Remote Sensing*, 47 (1), 339-349.
22. Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A., Jiménez, 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, 1840-1843.
23. Kaufman, Y. J., & G, A.O. (1992). Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 871-884.
24. Kishore, P., Ratnam, M. V., Namboothiri, S. P., Velicogna, I., Basha, G., Jiang, J. H., Igarashi, K., Rao, S. V. B., & Sivakumar, V. (2011). Global (50 ° S-50 ° N) distribution of water vapor observed by COSMIC GPS RO: Comparison with GPS radiosonde, NCEP, ERA-Interim, and JRA-25, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73, 1849-1860.
25. Kleespies, T. J., & L. M. McMillin. (1984). Physical Retrieval of Precipitable Water Using the Split Window Technique, *Conference on Satellite Meteorology/Remote Sensing and Applications*, AMS, Boston.
26. Li, Z. L., B. H. Tang, H., Wu, H. Z., Ren, G. J., Yan, Z. M., Wan, I. F., Trigo, & J. A. Sobrino. (2013). Satellite-Derived Land Surface Temperature: Current Status and Perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131, 14-37.
27. Li, Z. L., Jia, L., Su, Z., Wan, Z., & Zhang, R. (2003). A new approach for retrieving precipitable water from ATSR2 split-window channel data over land area. *International Journal of Remote Sensing*, 24 (24), 5095-5117.
28. Liu, C., Li, Y., Gao, W., Shi, R., & Bai, K. (2011). Retrieval of columnar water vapor using multispectral radiometer measurements over northern China. *Journal of Applied Remote Sensing*, 5 (1), 053558.
29. Lu, L., Zhang, T., Wang, T., & Zhou, X. (2018). Evaluation of Collection-6 MODIS Land Surface Temperature Product Using Multi-Year Ground Measurements in an Arid Area of Northwest China. *Remote Sensing*, 10, 1852.
30. 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, 5717-5735.
31. Moradizadeh, M., Momeni, M. & Saradjian, M.R. (2014). Estimation and validation of atmospheric water vapor content using a MODIS NIR band ratio technique based on AIRS water vapor products. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 1891-1897.
32. Omidvar, J., Davari, K., Arshad, S., Mousavi bayegi, M., Akbari, M., Farid hosseini, A. (2012). Estimation of Evapotranspiration Actual Using Sensor Aster and Model Metric. *Irrigation and Water Engineering*, 3 (1), 38-49. (in Farsi)
33. Padmanabhan, S., Reising, S. C., Vivekanandan, J., & Iturbide-Sanchez, F. (2009). Retrieval of atmospheric water vapor density with fine spatial resolution using three-dimensional tomographic inversion of microwave brightness temperatures measured by a network of scanning compact radiometers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47 (11), 3708-3721.

34. Papandrea, E., Casadio, S., Castelli, E., Dinelli, B. M., De Grandis, E., & Bojkov, B. (2018). Validation of the Advanced Infra-Red Water Vapour Estimator (AIRWAVE) Total Column Water Vapour using Satellite and Radiosonde products. *Annals of Geophysics*, 61 (2018), 7524.
35. Prince, S.D., Goetz, S.J., Dubayah, R., Czajkowski, K., & Thawley, M. (1998). Inference of surface and air temperature, atmospheric precipitable water and vapor pressure deficit using AVHRR satellite observations: validation of algorithms. *Journal of Hydrology*, 4, 230–24.
36. Pouyan, S., Zare, M., Ekhtesasi, M., Mokhtari, M. (2019). Estimating of Surface Albedo in Geomorphological Facies of Desert Regions of the Yazd-Ardakan Plain Using Landsat 8 Data. *Desert Management*, 6 (12), 33-48. (in Farsi)
37. Qian, Y. G., Li, Z.-L., & Nerry, F. (2013). Evaluation of land surface temperature and emissivities retrieved from MSG-SEVIRI data with MODIS land surface temperature and emissivity products. *International Journal of Remote Sensing*, 34 (9-10), 3140-3152.
38. Rajeshwari, A., Mani, N. (2014). Estimation of Land Surface Temperature of Dindigul District Using Landsat 8 Data, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3, 1250-1269.
39. Ren, H., Du, C., Liu, R., Qin, Q., Yan, G., Li, Z. L., & Meng, J. (2015). Atmospheric water vapor retrieval from Landsat 8 thermal infrared images. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120 (5), 1723-1738.
40. Ren, H., Du, C., Qin, Q., Liu, R., Meng, J., & Li, J. (2014). Atmospheric water vapor retrieval from Landsat 8 and its validation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 3045-3048.
41. Román, R., Antón, M., Cachorro, V., Loyola, D., Ortiz de Galisteo, J., de Frutos, A., Romero-Campos, P., 2015. Comparison of total water vapor column from GOME-2 on MetOp-A against ground-based GPS measurements at the Iberian Peninsula. *Science of the Total Environment*. 533, 317–328 .
42. Rouse, J.W, Haas, R.H., Scheel, J.A., and Deering, D.W. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*, 1, 48-62.
43. Sabol, D. E., Gillespie, A. R., Abbott, E., & Yamada, G. (2009). Field validation of the ASTER Temperature-Emissivity Separation algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 113, 2328–2344.
44. Sánchez, J. M., Galve, J. M., González-Piqueras, J., López-Urrea, R., Niclòs, R., & Calera, A. (2020). Monitoring 10-m LST from the Combination MODIS/Sentinel-2, Validation in a High Contrast Semi-Arid Agroecosystem, *Remote Sensing*, 12, 1453.
45. Sanders, L.C., Schott, J.R., & Raquen, R., (2001). AVNIR/SWIR atmospheric correction algorithm for hyperspectral imagery with adjacency effect. *Remote Sensing of Environment*, 78, 252–263.
46. Sobrino, J.A., Kharraz, J., & Li, Z.L., (2003). Surface temperature and water vapor retrieval from MODIS data. *Remote Sensing*, 24, 5161– 5182.
47. Sobrino, J. A., Z.-L. Li, M. P. Stoll, & F. Becker. (1994). Improvements in the Split-Window Technique for Land Surface Temperature Determination. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32, 243–253.
48. Sobrino, J., & Raissouni, N. (2000). Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 353-366.
49. Sobrino, J., Li, Z., Stoll, M., & 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, 2089-2114.
50. Stemn, E., & Kumi-Boateng, B., (2020). Modelling of land surface temperature changes as determinant of urban heat island and risk of heat-related conditions in the Wassa West Mining Area of Ghana. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 1727–1740.
51. Vaquero-Martínez, J., Antón, M., de Galisteo, J. P. O., Román, R., & Cachorro, V. E. (2018). Water vapor radiative effects on short-wave radiation in Spain. *Atmospheric Research*, 205, 18-25.

52. Varade, D., & Dikshit, O. (2019). Improved Assessment of Atmospheric Water Vapor Content in the Himalayan Regions Around the Kullu Valley in India Using Landsat-8 Data. *Water Resources Research*, 55, 462-475.
53. Varamesh, S., Hosseini, S. M., & Rahimzadegan, M. (2017). Estimation of atmospheric water vapor using MODIS data (case study: Golestan province of Iran). *Journal of Materials and Environmental Science*, 8, 1690-1695
54. Vlassova, L., Perez-Cabello, F., Nieto, H., Martín, P., Riaño, D., & De La Riva, J. (2014). Assessment of methods for land surface temperature retrieval from Landsat-5 TM images applicable to multiscale tree-grass ecosystem modeling. *Remote Sensing*, 6, 4345-4368 .
55. Wan, Z., & Dozier, J., (1996). A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature measurement from space, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34, 892–905.
56. Wan, Z. & Li, Z.-L. (2008). Radiance-based validation of the V5 MODIS land-surface temperature product. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 5373–5395.
57. Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q., and Li, Z. L., (2002). Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data, *Remote Sensing of Environment*, 83, 163-180.
58. Wang, F., Qin, Z., Song, C., Tu, L., Karnieli, A., & Zhao, S. (2015). An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data. *Remote Sensing*, 7, 4268-4289.
59. Wang, L., Lu, Y., & Yao, Y. (2019). Comparison of Three Algorithms for the Retrieval of Land Surface Temperature from Landsat 8 Images. *Sensors*, 19 (22), 5049.
60. Wang, M., G. He, & Z. Zhang. (2015). NDVI-Based Split-Window Algorithm for Precipitable Water Vapour Retrieval from Landsat-8 TIRS Data over Land Area. *Remote Sensing Letters*, 6, 904– 913.
61. Wu, H., Ni, L., Qian, Y., Tang, B.-H., & Li, Z.-L. (2013). Estimation of atmospheric profiles from hyperspectral infrared IASI sensor. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6, 1485-1494.
62. Yang, F., Guo, J., Shi, J., Zhao, Y., Zhou, L., & Song, S. (2019). A new method of GPS water vapor tomography for maximizing the use of signal rays. *Applied Sciences*, 9 (7), 1446.
63. Yang, J., Duan, S.-B., Zhang, X., Wu, P., Huang, C., Leng, P., & Gao, M. (2020). Evaluation of Seven Atmospheric Profiles from Reanalysis and Satellite-Derived Products: Implication for Single-Channel Land Surface Temperature Retrieval. *Remote Sensing*, 12, 780-791.
64. Yu, X., Guo, X., & Wu, Z., (2014). Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS-comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote Sensing*, 6, 9829–9852.
65. Zare Ernani, M. (2009). Biophysical assessment of desertification in the Yazd-Ardakan basin, Iran. Ghent University. Faculty of Bioscience Engineering, Ghent, Belgium.
66. Zhang, T., Wen, J., Van der Velde, R., Meng, X., Li, Z., Liu, Y., & Liu, R. (2008). Estimation of the total atmospheric water vapor content and land surface temperature based on AATSR thermal data. *Sensors*, 8 (3), 1832-1845.
67. Zhang, Z., He, G., Wang, M., Long, T., Wang, G., Zhang, X., & Jiao, W. (2016). Towards an operational method for land surface temperature retrieval from Landsat 8 data. *Remote sensing letters*, 7, 279-288.