

(OPEN ACCESS)

Feasibility Study of Estimating Soil Depths Temperature and Pan Evaporation Using Satellite Images

Younes Khoshkhoo^{*1}, Rezgar Arabzadeh²

1. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: y.khoshkho@uok.ac.ir

2. Ph.D. Student in Civil and Environmental Engineering, University of Waterloo, Canada. E-mail: rarabzad@uwaterloo.ca

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 07.26.2025
Revised: 08.17.2025
Accepted: 09.24.2025

Keywords:
Cross-validation,
Kurdistan province,
MODIS sensor,
Multiple linear regression,
Surface temperature

ABSTRACT

Background and Objectives: Soil surface, as a boundary layer separating land from the atmosphere, plays a significant role in the exchange of heat and moisture fluxes between the land and the atmosphere. Soil surface temperature affects all components of the energy balance at the soil surface, including net radiation, sensible heat flux, latent heat flux, and heat flux into the soil. Land Surface Temperature (LST) is one of the most important products that can be extracted by sensors operating in the thermal infrared spectral range. The MODIS sensor is one of the most important of these sensors, installed on the Aqua and Terra satellites, capable of providing land surface temperature at four different times of the night and day. Given the close relationship between land surface temperature and hydro-climatic variables, this study used land surface temperatures obtained from this sensor to estimate soil depths temperatures and pan evaporation.

Materials and Methods: To conduct this research, six synoptic meteorological stations located in Kurdistan province were selected. For these six stations, alongside data on soil temperatures at various depths and evaporation from the pan, four LSTs derived from the MODIS sensor, including LSTTerra-Night, LSTTerra-Day, LSTAqua-Night, and LSTAqua-Day, were extracted. By averaging the nighttime and daytime land surface temperatures from the Aqua and Terra satellites, two average temperatures, namely LSTTerra-Mean-Night&Day and LSTAqua-Mean-Night&Day, were also derived. After forming daily time series from the aforementioned variables over the statistical period of 2002-2021, multiple linear regression modeling was employed using the stepwise method. The six land surface temperatures mentioned were used as predictor variables for soil temperatures at various depths and evaporation from the pan at two scales: station scale (for each of the six stations separately) and the regional scale (considering the total six stations). The model validation process at the station scale involved using 75% of the total data from each station (period 2002-2016) for calibration and the remaining 25% of the data (period 2017-2021) for validation. At the regional scale, cross-validation of the regression models was performed using a method that involved six separate stages (at each stage, one station was removed). Two performance metrics, the coefficient of determination (R^2) and the mean absolute error (MAE), were used to assess the model performance.

Results: The results obtained from the calibration of regression models at both station and regional scales showed that among the six land surface temperatures derived from the MODIS sensor, the multiple linear regression models that emerged were mostly effective in simulating temperatures at different soil depths based on four land surface temperatures and for evaporation from pans based on three land surface temperatures. The two daily average temperatures obtained from the Aqua and Terra satellites played a significant and prominent role in all the obtained models for both soil depth temperatures and evaporation from pans. The results of validating the regression models for simulating temperatures at different soil depths indicated that both at the station scale and the regional scale, based on both the coefficient of determination and the mean absolute error, the regression models performed well in simulating soil temperatures in the shallower layers (depths of 5 to 30 centimeters from the soil surface) and faced some decline in performance at a depth of 50 centimeters. At a depth of 100 centimeters from the soil surface, the decline in model performance compared to the surface layers was significant. This decline in model performance was attributed to the fact that soil temperatures at deeper depths are strongly dependent on the amount of net energy reaching the soil surface, and as heat penetrates from the soil surface to deeper layers, this energy and heat wave are gradually dissipated, leading to a lesser dependence of soil temperature at lower depths on land surface temperature. Regarding evaporation from pans, the validation results indicated a weaker performance of the obtained regression models in simulating evaporation from pans compared to soil temperatures at different depths. The results also indicated that the regression models performed somewhat more effectively at the station scale than at the regional scale, both in simulating soil temperature at depth and in simulating pan evaporation.

Conclusion: The overall results of this research indicated that the six surface temperature readings obtained from the MODIS sensor, accessible through the Aqua and Terra satellites, have a high potential for simulating soil temperatures at various depths, particularly in the upper layers. Thus, these surface temperatures can be used as the main variable to directly simulate soil temperatures at both station and regional scales. Regarding the simulation of evaporation from pans, the results from the regression models showed that it is not possible to directly estimate evaporation from pans with high accuracy solely by using surface temperatures. However, given the appropriate role and degree of influence that surface temperatures exhibited on evaporation from pans, there is potential to use them as auxiliary and useful variables alongside other factors that affect evaporation from pans.

Cite this article: Khoshkhoo, Younes, Arabzadeh, Rezgar. 2026. Feasibility Study of Estimating Soil Depths Temperature and Pan Evaporation Using Satellite Images. *Journal of Water and Soil Conservation*, 32 (4), 153-173.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23907.3823

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

امکان‌سنجی بر آورد دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت با به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای

یونس خوشخو*^۱، رزگار عرب‌زاده^۲

۱. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: y.khoshkho@uok.ac.ir
۲. دانشجوی دکتری مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه واترلو، کانادا. رایانامه: rarabzad@uwaterloo.ca

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: سطح خاک به‌عنوان یک لایه مرزی و جداکننده زمین از جو، نقش بسیار چشمگیری در مبادله شارهای گرما و رطوبت بین زمین و جو ایفاء می‌کند. دمای سطح خاک تمامی مؤلفه‌های بیلان انرژی در سطح خاک شامل تابش خالص، شار گرمای محسوس، شار گرمای نهان و شار گرما به داخل خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. دمای سطح زمین (LST) یکی از مهم‌ترین محصولات است که توسط سنجنده‌هایی که در محدوده طیفی مادون‌قرمز حرارتی دارای فعالیت هستند قابل استخراج است. سنجنده MODIS یکی از مهم‌ترین این سنجنده‌هاست که بر روی دو ماهواره Terra و Aqua نصب شده است و قادر است دمای سطح زمین را در ۴ زمان مختلف شبانه‌روز به‌دست دهد. نظر به ارتباط نزدیک دمای سطح زمین با متغیرهای هیدروکلیماتی، در این پژوهش از دماهای سطح زمین حاصل از این سنجنده جهت برآورد دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت استفاده گردید.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۴ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲	مواد و روش‌ها: برای انجام این پژوهش، ابتدا ۶ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک واقع در استان کردستان انتخاب شدند و برای این ۶ ایستگاه، در کنار داده‌های دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت، ۴ دمای حاصل از سنجنده MODIS شامل $LST_{Terra-Night}$ ، $LST_{Terra-Day}$ ، $LST_{Aqua-Night}$ و $LST_{Aqua-Day}$ استخراج شدند و با میانگین‌گیری کردن از مقادیر دماهای سطح زمین شبانه و روزانه دو ماهواره Terra و Aqua، دو دمای میانگین شامل $LST_{Terra-Mean-Night\&Day}$ و $LST_{Aqua-Mean-Night\&Day}$ نیز استخراج شدند. ابتدا سری‌های زمانی روزانه از متغیرهای فوق طی دوره آماری ۲۰۰۲-۲۰۲۱ استخراج شدند سپس با به‌کارگیری مدل رگرسیون چندگانه خطی به روش گام‌به‌گام، از دماهای شش‌گانه سطح زمین مذکور به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی‌کننده دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت استفاده شد. فرایند کلی فوق در دو مقیاس ایستگاهی (برای هر کدام از ۶ ایستگاه به‌صورت جداگانه) و منطقه‌ای (با در نظر گرفتن کل ۶ ایستگاه به‌صورت یکپارچه) به انجام رسید. فرایند اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی در مقیاس ایستگاهی با در نظر گرفتن ۷۵ درصد از کل داده‌های هر ایستگاه (دوره آماری ۲۰۰۲-۲۰۱۶) جهت واسنجی و ۲۵ درصد باقی‌مانده داده‌ها (دوره آماری
واژه‌های کلیدی: استان کردستان، اعتبارسنجی متقابل تک‌نمونه‌ای، دمای سطح زمین، رگرسیون خطی چندگانه، سنجنده MODIS	

۲۰۲۱-۲۰۱۷) جهت اعتبارسنجی به انجام رسید. در مقیاس منطقه‌ای نیز جهت اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی از روش اعتبارسنجی متقابل تک‌نمونه‌ای (LOOCV) طی ۶ مرحله مجزا (هر مرحله با حذف یک ایستگاه) استفاده شد. دو شاخص ضریب تعیین (R^2) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) جهت سنجش عملکرد مدل‌ها به کار گرفته شدند.

یافته‌ها: نتایج حاصل از واسنجی مدل‌های رگرسیونی در هر دو مقیاس ایستگاهی و منطقه‌ای نشان داد که از بین شش دمای سطح زمین حاصل از سنجنده MODIS، مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه‌ای که حاصل آمدند در اکثر موارد برای شبیه‌سازی دماهای اعماق مختلف خاک بر اساس چهار دمای سطح زمین و برای تبخیر از تشت بر اساس سه دمای سطح زمین حاصل آمدند. دو دمای میانگین شبانه‌روزی حاصل از دو ماهواره Aqua و Terra نقش چشمگیر و پررنگی در تمامی مدل‌های حاصله هم برای دماهای اعماق خاک و هم برای تبخیر از تشت داشتند. نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی جهت شبیه‌سازی دمای اعماق مختلف خاک نشان داد که هم در مقیاس ایستگاهی و هم در مقیاس منطقه‌ای بر اساس هر دو شاخص ضریب تعیین و میانگین قدرمطلق خطا، مدل‌های رگرسیونی در شبیه‌سازی دمای خاک در لایه‌های سطحی (عمق‌های ۵ تا ۳۰ سانتی‌متری از سطح خاک) دارای عملکردی بالا (R^2 نزدیک به ۰/۹۵) و در عمق ۵۰ سانتی‌متری خاک با مقداری افت در عملکرد (R^2 نزدیک به ۰/۹) مواجه شدند. در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری از سطح خاک، میزان افت عملکرد مدل (R^2 نزدیک به ۰/۷۵) در مقایسه با لایه‌های سطحی چشمگیر بود. این افت در عملکرد مدل به این مسأله نسبت داده شد که دمای اعماق خاک قویاً وابسته به مقدار انرژی خالص رسیده به سطح خاک است و به هنگام نفوذ گرما از سطح خاک به اعماق پایین‌تر، این انرژی و موج گرما به تدریج مستهلک شده و سبب وابستگی کمتر دمای خاک در اعماق پایین‌تر به دمای سطح زمین می‌گردد. در خصوص تبخیر از تشت، نتایج اعتبارسنجی حاکی از عملکرد ضعیف‌تر مدل‌های رگرسیونی حاصله در شبیه‌سازی تبخیر از تشت در مقایسه با دمای اعماق خاک بود. نتایج هم‌چنین نشان داد که مدل‌های رگرسیونی هم در شبیه‌سازی دمای اعماق خاک و هم در شبیه‌سازی تبخیر از تشت، در مقیاس ایستگاهی تا حدودی عملکردی مناسب‌تر از مقیاس منطقه‌ای داشتند.

نتیجه‌گیری: نتایج کلی این پژوهش نشان داد که دماهای شش‌گانه سطح زمین حاصل از سنجنده MODIS که از طریق دو ماهواره Aqua و Terra قابل استحصال هستند پتانسیل بسیار بالایی جهت شبیه‌سازی دمای اعماق مختلف خاک به‌ویژه لایه‌های سطحی‌تر دارند به‌گونه‌ای که از این دماهای سطح زمین می‌توان به‌عنوان متغیر اصلی و به‌طور مستقیم جهت شبیه‌سازی دمای اعماق خاک در هر دو مقیاس ایستگاهی و منطقه‌ای استفاده کرد. در خصوص شبیه‌سازی تبخیر از تشت، نتایج حاصل از مدل‌های رگرسیونی نشان داد که امکان برآورد مستقیم تبخیر از تشت با دقت بالا صرفاً با به‌کارگیری دماهای سطح زمین وجود ندارد اما با توجه به نقش و درجه تأثیر مناسبی که دماهای سطح زمین بر روی تبخیر از تشت از خود نشان دادند این پتانسیل وجود دارد که از آن‌ها به‌عنوان متغیرهای کمکی و مفید در کنار سایر متغیرهایی که بر روی تبخیر از تشت تأثیر دارند استفاده کرد.

استناد: خوشخو، یونس، عرب‌زاده، رزگار (۱۴۰۴). امکان‌سنجی برآورد دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت با به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۲ (۴)، ۱۷۳-۱۵۳.

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23907.3823



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

دمای خاک به‌عنوان یک متغیر بیوفیزیکی، نقشی مهم و مؤثر در فعالیت‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی درون خاک رخ دارد و به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر فعالیت‌های گیاهی اثر می‌گذارد (۱). در میان عوامل مختلف مؤثر بر دمای خاک، میزان تابش خالص رسیده به سطح زمین و نحوه تسهیم آن به مؤلفه‌های مختلف آن از یک‌سو و پوشش سطح خاک (برف، گیاه و ...) از سوی نقش‌هایی کلیدی به عهده دارند (۲، ۳ و ۴). سطح خاک به‌عنوان یک لایه مرزی و جداکننده زمین از جو، نقش بسیار چشمگیری در مبادله شارهای مختلف فیزیکی و بیولوژیکی مثل گرما و رطوبت بین زمین و جو ایفاء می‌کند (۵). در این میان، دمای سطح زمین (LST) یکی از متغیرهای کلیدی در بیان انرژی سطح است که تحت تأثیر تابش خالص، شار گرمای محسوس و نهان قرار دارد و خود نیز بر شار گرمای ورودی به خاک تأثیر می‌گذارد (۶). با توجه به وجود چنین ارتباط تنگاتنگی، این امکان فراهم است که از دمای سطح زمین به‌عنوان یک متغیر برآوردکننده متغیرهای هیدروکلیماتی که در بیان انرژی در سطح خاک دخیل هستند بهره‌گرفت (۷ و ۸). در زمره برخی از مهم‌ترین متغیرهای هیدروکلیماتی مرتبط با بیان انرژی در سطح خاک می‌توان از شدت تابش خورشید، دمای اعماق خاک، رطوبت خاک، تبخیر و تعرق، تبخیر از سطح آب، و تبخیر از سطح خاک نام برد. به‌طورکلی، در بین متغیرهای مختلف هواشناسی، برخی متغیرها ارتباط و همبستگی بالایی باهم دارند و وجود چنین ارتباط نزدیکی این امکان را فراهم می‌کند که در حالت فقدان مقادیر اندازه‌گیری شده یک متغیر، مقادیر آن توسط متغیرهای مرتبط دیگر برآورد شود. در این میان، دمای اعماق خاک و تبخیر از تشت که از درجه اهمیت بالایی برخوردار هستند جزو متغیرهای با خلأهای آماری نسبتاً زیادی هستند و جهت انجام

مطالعات مختلف، این نیاز احساس می‌شود که خلأهای آماری آن‌ها به روش‌هایی برآورد و تکمیل شوند (۹ و ۱۰). اگرچه برخی مدل‌های فیزیکی و نیمه‌فیزیکی هم برای برآورد دمای اعماق خاک (۱۱ و ۱۲) و هم برای شبیه‌سازی تبخیر از تشت (۱۳ و ۱۴) ارائه شده‌اند، اما چون این مدل‌ها از یک‌سو نیاز به داده‌های ورودی زیادی دارند و از سوی دیگر فقط به‌صورت نقطه‌ای قادر به ارائه خروجی هستند ضروری است به روش‌های جایگزینی مانند به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای، که از یک‌سو اطلاعات حاصل از آن‌ها به‌صورت پیکسل به پیکسل و پوشش‌دهنده کل نقاط یک منطقه است و از سوی دیگر به هنگام استفاده از آن‌ها نیاز به داده‌های تفصیلی چندانی نیست، روی آورد (۱۵).

محصولات ماهواره‌ای گوناگونی که مرتبط با متغیرهای هیدروکلیماتی هستند ارائه شده‌اند. دمای سطح زمین (LST¹)، یکی از مهم‌ترین این محصولات است که توسط سنجنده‌هایی که در محدوده طیفی مادون‌قرمز حرارتی دارای فعالیت هستند قابل استخراج است (۵). یکی از پرکاربردترین این سنجنده‌ها که دارای محصولات متنوعی برای کاربردهای مختلف زمینی، اقیانوسی و جوی است سنجنده MODIS است. نظر به ارتباط نزدیک دمای سطح زمین با سایر متغیرهای هیدروکلیماتی، این پتانسیل وجود دارد تا از دمای سطح زمین حاصل از این سنجنده، جهت برآورد سایر متغیرها استفاده کرد (۱۶). از آنجائی‌که از یک‌سو فاصله بین ایستگاه‌های هواشناسی قابل‌توجه است و مقادیر متغیرهای هواشناسی در نقاط ایستگاهی در غالب موارد قابلیت تعمیم به نقاط بین ایستگاهی را ندارد و از سوی دیگر برای اجرای بسیاری از مدل‌های منطقه‌ای، توزیع مکانی متغیرهای هواشناسی باید معلوم باشد بنابراین لازم و ضروری است مقادیر

1- Land Surface Temperature

روزانه و ماهانه دمای هوا (۱۷ و ۲۸) و ارزیابی تغییرات اقلیمی (۲۹) استفاده شده است. در این پژوهش در نظر است در ادامه پژوهش‌های صورت گرفته پیشین، با رویکردی نوین قابلیت به‌کارگیری دماهای سطح زمین مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای جهت برآورد متغیرهایی که کم‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند و پژوهش‌های محدودی بر روی آن‌ها انجام شده است پرداخته شود. بر این اساس در این پژوهش، کارایی به‌کارگیری دمای سطح زمین مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای جهت برآورد دمای پروفیل قائم خاک تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری و تخمین تبخیر از تشت مورد ارزیابی قرار گرفته است. جهت نیل به این منظور، با بهره‌گیری از روش‌های آماری مبتنی بر تحلیل‌های چندمتغیره، دمای اعماق مختلف خاک و همچنین تبخیر از تشت با استفاده از دماهای سطح زمین مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای مورد مدل‌سازی و میزان دقت حاصل از این روش، مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه جهت انجام این پژوهش، استان کردستان واقع در غرب ایران است. برای انجام این پژوهش، ۶ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک واقع در این استان انتخاب شدند. مشخصات جغرافیایی این ایستگاه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول هم‌چنین بافت خاک در لایه‌های سطحی خاک آورده شده است. داده‌های مورد استفاده جهت انجام این پژوهش شامل داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های مذکور و برخی داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای هستند. داده‌های ایستگاهی شامل مقادیر روزانه دمای اعماق مختلف خاک (عمق‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری) و تبخیر از تشت و داده‌های ماهواره‌ای نیز شامل دماهای سطح زمین حاصل از

این متغیرها در فواصل بین نقاط ایستگاهی به روش‌هایی برآورد شوند. در این راستا، برای برآوردهای مربوط به نقاط بین ایستگاهی، تصاویر ماهواره‌ای دارای کاربردی اساسی می‌باشند. جهت انجام این کار، الگوریتم‌هایی مبتنی بر درون‌یابی کردن و تخمین‌های زمین‌آماری مثل روش‌های مثل کریجینگ، کوکریجینگ و روش وزن‌دهی بر مبنای عکس فاصله جهت برآورد متغیرهای مختلف ارائه شده‌اند اما البته نتایج حاصل از به‌کارگیری آن‌ها در برآورد بسیاری از متغیرهای هواشناسی از دقت مناسبی برخوردار نیست. به‌طور ویژه در مناطق کوهستانی، وجود توپوگرافی شدید می‌تواند سبب تشدید خطای درون‌یابی توسط این دسته مدل‌ها گردد (۱۷). استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به‌عنوان یک روش جایگزین دارای برتری‌هایی از جمله پایین‌تر بودن هزینه جمع‌آوری داده‌ها، امکان برداشت داده‌های به‌نگام از تمام سطح منطقه، مرتفع کردن مشکل دسترسی به محل و حضور فیزیکی در آن و نیاز به نیروی انسانی کم و عملیات زمینی بسیار محدود می‌باشد (۱۸). جهت برآورد متغیرهای هیدروکلیماتی مرتبط با بیلان انرژی در سطح خاک، قابلیت دسترسی آسان و رایگان به مقادیر دمای سطح زمین حاصل از سنجنده MODIS در مقیاس روزانه و برای هر منطقه دلخواه این امکان را فراهم می‌نماید تا در نقاط غیرایستگاهی نیز به برآورد توزیع مکانی متغیرهای مرتبط با دمای سطح زمین پرداخت (۱۹). در پژوهش‌های پیشین، از دمای سطح زمین در مطالعات عدیده‌ای از جمله در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک (۲۰)، تبخیر تفرق (۱۹)، بیلان انرژی سطح خاک (۲۱)، پایش رطوبت خاک (۱۶ و ۲۲)، پایش خشکسالی (۲۳)، بررسی پدیده جزیره حرارتی شهری (۲۴)، پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی (۲۵)، بررسی وضعیت یخبندان خاک (۲۶ و ۲۷)، برآورد پارامترهای

روزانه استفاده شد. دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ جهت انجام این پژوهش انتخاب شد. طی دوره مذکور، داده‌های روزانه دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت برای ۶ ایستگاه سینوپتیک مورد مطالعه از سازمان هواشناسی کشور اخذ شدند و متناظر با مختصات جغرافیایی دقیق این ایستگاه‌ها به شرح جدول ۱، مقادیر دمای سطح زمین نیز طی ۴ نوبت شبانه‌روز (دو نوبت مربوط به ماهواره Aqua در ساعات ۱۳:۳۰ و ۱۰:۳۰ و دو نوبت مربوط به ماهواره Terra در ساعات ۱۳:۳۰ و ۱۰:۳۰) استخراج شدند. همه محاسبات مربوط به استخراج دماهای سطح زمین از تصاویر ماهواره‌ای، در زبان برنامه‌نویسی R پیاده‌سازی و اجراء شد. به جهت استخراج متغیرهای کمکی، از مقادیر روزانه و شبانه دماهای سطح زمین هر کدام از دو ماهواره فوق، میانگین‌گیری شد و جمعاً شش دمای سطح زمین شامل $LST_{Terra-Day}$ ، $LST_{Terra-Night}$ ، $LST_{Terra-Mean-Night\&Day}$ ، $LST_{Aqua-Day}$ ، $LST_{Aqua-Night}$ و $LST_{Aqua-Mean-Night\&Day}$ استخراج شدند.

سنجنده MODIS، که بر روی دو ماهواره Aqua و Terra نصب شده است، می‌باشند. این دو ماهواره به ترتیب در تاریخ‌های ۱۸ دسامبر ۱۹۹۹ و ۴ می ۲۰۰۲ توسط سازمان ملی هوا و فضای آمریکا (NASA) به فضا پرتاب شدند. زمان عبور ماهواره Terra از روی منطقه مورد مطالعه حدود ۱۰:۳۰ صبح و ۲۲:۳۰ شب و زمان عبور ماهواره Aqua حدود ساعت ۱:۳۰ شب و ۱۳:۳۰ بعد از ظهر است. سنجنده MODIS قادر است بازتاب‌های دریافت‌شده از پدیده‌های مختلف سطح زمین را در ۳۶ باند طیفی (از ۰/۴ تا ۱۴/۴ میکرومتر) متشکل از ۱۱ باند در طیف مرئی، ۵ باند در طیف مادون‌قرمز نزدیک، ۱۴ باند در طیف مادون‌قرمز کوتاه و میانی و ۶ باند در طیف مادون‌قرمز بلند تهیه کند (۱۹). از بین محصولات مختلف این سنجنده، جهت انجام این پژوهش از محصول MOD11A1 مربوط به ماهواره Terra و محصول MYD11A1 مربوط به ماهواره Aqua با توان تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر و توان تفکیک زمانی

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی و بافت لایه سطحی خاک در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در استان کردستان.

Table 1. Geographic characteristics and texture of the soil surface layer at the synoptic stations studied in Kurdistan Province.

ایستگاه Station	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	ارتفاع (متر) Elevation	بافت خاک Soil texture
سنندج Sanandaj	35° 15' 17"	47° 00' 52"	1373.4	لوم رسی Clay loam
سقز Saghez	36° 13' 15"	46° 18' 39"	1522.8	رسی سیلتی Silty caly
بیجار Bijar	35° 53' 11"	47° 37' 14"	1883.4	لومی Loam
قروه Qorveh	35° 10' 47"	47° 47' 09"	1906	لوم رسی Clay loam
مریوان Marivan	35° 29' 48"	46° 09' 06"	1286.6	لوم رسی Clay loam
زرینه Zarineh	36° 03' 35"	46° 54' 49"	2142.6	لوم رسی Clay loam

گرفته شدند و تلاش شد تا مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (دماهای شش‌گانه سطح زمین حاصل از تصاویر ماهواره‌ای) و پیش‌بینی‌شونده (دماهای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت) برای کل استان کردستان استخراج گردند. اهمیت و کاربرد این حالت از مدل‌سازی در این است که با تعمیم دادن مدل‌های رگرسیونی حاصله به کل محدوده استان، می‌توان مقادیر روزانه دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت را در هر نقطه دلخواه از استان کردستان بر اساس دماهای شش‌گانه سطح زمین، که برای کل استان در دسترس هستند، برآورد کرد. جهت اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی حاصله در این حالت، از روش اعتبارسنجی متقابل تک‌نمونه‌ای (LOOCV)^۲ استفاده شد. نقطه قوت اصلی این روش آن است که هم در واسنجی و هم در اعتبارسنجی مدل، تمامی داده‌های موجود نقش دارند (۳۰). اعتبارسنجی متقابل در ۶ مرحله مجزا انجام شد و در هر مرحله، داده‌های یکی از ۶ ایستگاه مورد مطالعه حذف شدند و مدل رگرسیون خطی چندگانه به روش گام به گام بر اساس ۵ ایستگاه دیگر واسنجی شد و این مدل واسنجی‌شده بر اساس داده‌های ایستگاهی که حذف شده بود مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. به تعبیری دیگر، در هر مرحله با حذف داده‌های یکی از ایستگاه‌ها، دماهای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت با استفاده از مدل‌های رگرسیونی مستخرج از داده‌های ۵ ایستگاه دیگر برآورد شدند سپس با مقادیر اندازه‌گیری‌شده آن‌ها در ایستگاه حذف‌شده در آن مرحله مورد مقایسه قرار گرفتند. پس از محاسبه دو شاخص مذکور در هر ۶ مرحله، با میانگین‌گیری کردن از مقادیر هر کدام از این دو شاخص طی ۶ مرحله مذکور، میزان خطای کلی مدل جهت برآورد هر کدام از متغیرهای پیش‌بینی‌شونده (دمای خاک در ۶ عمق

پس از تشکیل سری‌های زمانی روزانه از مقادیر دمای اعماق مختلف خاک (عمق‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری از سطح خاک) و تبخیر از تشت و همچنین مقادیر دماهای سطح زمین شش‌گانه مذکور طی دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۰۲، از مدل رگرسیون چندگانه خطی به روش گام به گام^۱ جهت انجام مدل‌سازی بین آن‌ها استفاده شد. طی فرایند مدل‌سازی، دماهای سطح زمین به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و دمای ۶ عمق مختلف خاک و تبخیر از تشت به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی‌شونده لحاظ شدند. فرایند مدل‌سازی طی دو مرحله کلی انجام شد. در مرحله اول، برای هر کدام از ۶ ایستگاه سینوپتیک مورد مطالعه به تفکیک، مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و هر کدام از متغیرهای پیش‌بینی‌شونده استخراج شدند. اهمیت و کاربرد انجام مدل‌سازی به تفکیک برای هر ایستگاه در برآورد مقادیر دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت در خود آن ایستگاه است که می‌تواند برای مقاصدی از جمله برآورد مقادیر گم‌شده در هر ایستگاه مورد استفاده قرار گیرد. جهت سنجش درجه اعتبار مدل‌های رگرسیونی حاصله در این مرحله، از ۷۵ درصد از کل داده‌های هر ایستگاه (دوره آماری ۲۰۱۶-۲۰۰۲) جهت انجام فرایند واسنجی مدل‌های رگرسیونی و استخراج پارامترهای آن‌ها استفاده شد سپس این مدل‌های واسنجی‌شده بر روی ۲۵ درصد باقیمانده داده‌ها (دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۱۷) اعمال شدند و خطای حاصل از به‌کارگیری این مدل‌ها جهت برآورد دماهای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت بر اساس دو شاخص ضریب تعیین (R^2) و میانگین قدرمطلق خطا (MAE) مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرحله دوم از فرایند مدل‌سازی، مجموعه داده‌های کل ۶ ایستگاه با هم به‌صورت یکجا در نظر

(مجموعه کل ایستگاه‌ها به صورت یک‌جا) آورده شده است. ستون آخر این جدول نیز مربوط به ضریب تعیین مربوط به هر کدام از این مدل‌های رگرسیونی است. دیده می‌شود که از بین دماهای شش‌گانه سطح زمین، در غالب موارد چهار دمای سطح زمین دارای اثر معنی‌داری در سطح اطمینان ۱٪ بوده‌اند و بنابراین مدل رگرسیون چندگانه خطی بر اساس چهار دمای سطح زمین و یک ضریب ثابت (عرض از مبدأ) حاصل می‌آید. علامت - در این جدول مربوط به دماهای سطح زمینی است که در مدل‌های رگرسیونی دارای اثر معنی‌دار نبوده‌اند و بنابراین از مدل حذف شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد تمامی دماهای شش‌گانه سطح زمین در مدل‌های رگرسیونی مختلفی که برای ایستگاه‌ها و اعماق مختلف خاک حاصل آمده‌اند نقش داشته‌اند. با این وجود، با یک نگاه کلی به جدول ۲ دیده می‌شود که دو دمای سطح زمینی که با متوسط‌گیری کردن از دماهای شبانه و روزانه برای هر کدام از دو ماهواره Aqua و Terra حاصل آمده‌اند حضور چشمگیرتر و پررنگ‌تری در مدل‌های رگرسیونی حاصله داشته‌اند. از بین این دو، دمای میانگین شبانه‌روزی حاصل از ماهواره Terra در مقایسه با ماهواره Aqua تأثیر پررنگ‌تری در مدل‌ها داشته است و در قریب به اتفاق مدل‌های رگرسیونی حاصله (به استثنای ۲ مدل از کل ۴۲ مدل) حضور داشته است. با نگاهی به ضرایب تعیین حاصله مشاهده می‌شود که برای همه ایستگاه‌ها و کل منطقه، مقدار این ضریب برای لایه‌های سطحی‌تر خاک (اعماق ۵ تا ۳۰ سانتی‌متری)، بالاتر از ۰/۹ به دست آمده است که بیانگر دقت بسیار بالای مدل‌های رگرسیونی حاصله در برآورد دمای خاک در این اعماق است. برای لایه‌های پایین‌تر، میزان این ضریب برای عمق ۵۰ سانتی‌متری در اکثر موارد نزدیک به ۰/۹ بوده است و برای عمق ۱۰۰ سانتی‌متری خاک، اگرچه عملکرد مدل کاهش یافته است اما همچنان

مختلف و تبخیر از تشت) بر اساس متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (دماهای شش‌گانه سطح زمین حاصل از تصاویر ماهواره‌ای) در استان کردستان مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت سنجش خطا در این مرحله نیز مشابه با مرحله اول، از دو شاخص ضریب تعیین و میانگین قدرمطلق خطا استفاده شد. فرمول محاسباتی دو شاخص فوق به شرح زیر است:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |C_i - O_i|}{n} \quad (1)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - C_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i - O_i)}{n} \quad (3)$$

که، C_i مقادیر برآوردشده، O_i مقادیر اندازه‌گیری‌شده، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و n تعداد کل مشاهدات است. بدیهی است هرچه مقدار شاخص MAE، که بیانگر میانگین قدرمطلق مقادیر خطا است، کم‌تر و ضریب تعیین بالاتر باشد بیانگر عملکرد بهتر مدل است.

نتایج و بحث

واسنجی مدل‌های رگرسیونی به صورت ایستگاهی و منطقه‌ای: در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقادیر روزانه دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت در دو حالت ایستگاهی و منطقه‌ای با به‌کارگیری دماهای شش‌گانه سطح زمین حاصل از تصاویر سنجنده MODIS، که از آن‌ها به عنوان ورودی‌های مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه استفاده شد، ارائه می‌گردد. در جدول ۲، ضرایب مربوط به مدل‌های رگرسیون چندگانه خطی مربوط به برآورد اعماق مختلف خاک (عمق‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری از سطح خاک) در دو مقیاس ایستگاهی (برای تک‌تک ایستگاه‌ها به تفکیک) و منطقه‌ای

دارای دقتی قابل بوده و در محدوده ۰/۷۲ تا ۰/۷۶ در نوسان بوده است. این کاهش در دقت مدل با تضعیف انتقال حرارت به اعماق پایین‌تر همخوانی دارد زیرا به هنگام نفوذ گرما از سطح خاک به اعماق پایین‌تر، موج گرما به تدریج مستهلک می‌گردد که این امر می‌تواند توجیه‌کننده وابستگی ضعیف‌تر و در نتیجه دقت پایین‌تر مدل‌های رگرسیونی به هنگام شبیه‌سازی دمای خاک در اعماق پایین‌تر باشد.

جدول ۲- ضریب تعیین و ضرایب مربوط به مدل‌های رگرسیون چندگانه خطی در برآورد دمای اعماق مختلف خاک توسط دماهای شش‌گانه سطح زمین در دو مقیاس ایستگاهی و منطقه‌ای.

Table 2. Coefficient of determination and coefficients of multiple linear regression models in estimating soil temperature depths using six land surface temperatures over both station and regional scales.

ایستگاه Station	عمق (cm) Depth (cm)	عرض از مبدأ Intercept	LST _{Terre-Night}	LST _{Terre-Day}	LST _{Aqua-Night}	LST _{Aqua-Day}	LST _{Terre-Mean-Night&Day}	LST _{Aqua-Mean-Night&Day}	R ²
سانداج Sanandaj	5 cm	2.87	0.268	-	0.054	-	0.32	0.37	0.964
	10 cm	3.32	0.23	-	-	-0.049	0.346	0.48	0.966
	20 cm	4.73	-	-0.184	-	-0.091	0.698	0.502	0.958
	30 cm	5.43	0.166	-	-	-0.111	0.305	0.504	0.943
	50 cm	7.09	-	-0.182	-	-0.109	0.588	0.502	0.902
	100 cm	10.62	0.239	0.045	0.114	-	-	0.213	0.755
سقز Saghez	5 cm	4.04	-	-0.388	-	-	0.952	0.314	0.944
	10 cm	4.27	-	-0.339	-	-	0.891	0.315	0.953
	20 cm	5.13	-	-0.241	-	-0.04	0.72	0.339	0.949
	30 cm	5.7	0.22	-	0.03	-	0.223	0.235	0.93
	50 cm	6.71	-	-0.191	-	-	0.585	0.208	0.885
	100 cm	8.99	-	-0.094	0.101	0.061	0.358	-	0.722
زرینه Zarneh	5 cm	5.21	0.255	-	0.181	0.13	0.224	-	0.936
	10 cm	5.39	0.202	-	0.048	-	0.255	0.265	0.942
	20 cm	5.57	0.151	-	-	-0.052	0.269	0.333	0.931
	30 cm	5.93	0.127	-	0.062	-	0.264	0.206	0.916
	50 cm	6.63	0.090	-	0.066	-	0.252	0.166	0.873
	100 cm	8.05	-	-	-	0.039	0.231	0.119	0.712
قروه Qorveh	5 cm	3.79	0.330	-	-	-0.031	0.205	0.430	0.951
	10 cm	4.36	0.253	-	0.034	-	0.248	0.351	0.954
	20 cm	5.13	0.206	-	-	-0.07	0.249	0.428	0.945
	30 cm	5.71	0.183	-	0.090	-	0.234	0.261	0.926
	50 cm	7.25	-	-0.177	0.202	0.108	0.545	-	0.876
	100 cm	9.73	-	-0.145	0.172	0.060	0.422	-	0.731
بیجار Bijar	5 cm	4.03	-	-0.246	0.053	-	0.752	0.326	0.958
	10 cm	4.42	0.164	-	0.080	-	0.314	0.307	0.962
	20 cm	5.26	-	-0.138	-	-0.109	0.587	0.478	0.954
	30 cm	5.98	-	-0.138	0.241	0.111	0.548	-	0.934
	50 cm	7.59	-	-0.148	0.242	0.09	0.495	-	0.884
	100 cm	10.88	-	-0.147	0.233	0.036	0.393	-	0.726
مریوان Marivan	5 cm	2.75	0.478	-	-0.038	-	0.19	0.4	0.954
	10 cm	3.05	-	-0.342	-	0.052	0.993	0.284	0.958
	20 cm	3.5	-	-0.227	-	0.034	0.836	0.263	0.953
	30 cm	4.17	-	-0.161	-	-	0.727	0.27	0.939
	50 cm	4.99	-	-0.072	-	-	0.597	0.22	0.906
	100 cm	7.08	-	-	-	-	0.454	0.132	0.803
کل منطقه (هر ۶ ایستگاه با هم) Total region	5 cm	4.65	0.362	-	0.222	0.147	0.206	-	0.944
	10 cm	5.16	-	-0.327	0.216	0.142	0.889	-	0.948
	20 cm	5.99	-	-0.295	0.095	-	0.818	0.237	0.939
	30 cm	6.48	0.265	-	0.103	-	0.222	0.205	0.923
	50 cm	7.86	0.258	-	0.116	-	0.183	0.162	0.875
	100 cm	10.62	0.306	0.0479	-	-0.138	-	0.343	0.726

در جدول ۳، ضرایب مربوط به مدل‌های رگرسیون چندگانه خطی حاصله در برآورد تبخیر از تشت در دو مقیاس ایستگاهی و منطقه‌ای همراه با ضرایب تعیین آن‌ها آورده شده است. دیده می‌شود که از بین دماهای شش‌گانه سطح زمین، مدل رگرسیون خطی چندگانه در غالب موارد براساس سه دمای سطح زمین حاصل آمده است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که میانگین دماهای سطح زمین شبانه و روزانه دو ماهواره Aqua و Terra در تمامی مدل‌های رگرسیونی نقش داشته‌اند و ۴ دمای سطح زمین دیگر به‌صورت پراکنده در معادلات رگرسیونی ظاهر شده‌اند.

ضرایب تعیین حاصله برای کل منطقه که با در نظر گرفتن مجموعه کل داده‌های هر ۶ ایستگاه با هم به‌دست آمده است (سطرهای آخر در جدول ۲) به‌استثنای عمق ۱۰۰ سانتی‌متر که تا حدودی کاهش یافته است، برای سایر عمق‌ها مقادیر بالایی بوده‌اند که بیانگر آن است که با تعمیم مدل‌های رگرسیونی حاصله به نقاط بین ایستگاهی در کل منطقه، پتانسیل بالا و مناسبی جهت برآورد دمای اعماق خاک (به‌ویژه لایه‌های سطحی‌تر) در هر نقطه دلخواه از این منطقه براساس دماهای سطح زمین حاصل از تصاویر سنجنده MODIS وجود دارد.

جدول ۳- ضرایب تعیین و ضرایب مربوط به مدل‌های رگرسیون چندگانه خطی در برآورد تبخیر از تشت توسط دماهای شش‌گانه سطح زمین در دو مقیاس ایستگاهی و منطقه‌ای.

Table 3. Coefficient of determination and coefficients of multiple linear regression models in estimating pan evaporation using six land surface temperatures over both stational and regional scales.

ایستگاه station	عرض از مبدأ Intercept	LST _{Terra-Night}	LST _{Terra-Day}	LST _{Aqua-Night}	LST _{Aqua-Day}	LST _{Terra-Mean-Night&Day}	LST _{Aqua-Mean-Night&Day}	R ²
سنندج Sanandaj	-1.04	-	-	-	-0.063	0.191	0.274	0.76
سقز Saghez	-0.41	-	-	0.08	-	0.187	0.136	0.72
زرینه Zarneh	0.72	-	-	0.029	-	0.168	0.163	0.69
قروه Qorveh	0.012	-	-	-	-	0.154	0.185	0.66
بیجار Bijar	0.87	-	-0.06	-	-	0.316	0.134	0.64
مریوان Marivan	-0.99	0.159	-	-	-	0.077	0.199	0.72
کل منطقه (هر ۶ ایستگاه با هم) Total region	-0.103	-	-	-	-0.023	0.157	0.232	0.67

با نگاهی به ضرایب تعیین در جدول ۳ مشاهده می‌شود که ضریب تعیین برای ایستگاه‌های مختلف بین ۰/۶۴ تا ۰/۷۶ در نوسان بوده است و برای کل منطقه نیز برابر با ۰/۶۷ حاصل آمده است. با توجه به مفهوم ضریب تعیین، که به معنای آن است که چند درصد از تغییرات متغیر پیش‌بینی‌شونده توسط متغیرهای پیش‌بینی‌کننده قابل تفسیر و توجیه است، می‌توان چنین بیان داشت که اگرچه دمای سطح زمین عاملی مؤثر بر میزان تبخیر از تشت است اما بر اساس دماهای سطح زمین به تنهایی به‌عنوان متغیر ورودی ناکافی بوده و نمی‌توان صرفاً بر اساس آن به برآورد تبخیر از تشت با دقت بالایی دست یافت. بنابراین چنین پیشنهاد می‌شود که از دماهای سطح زمین حاصل از تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان متغیرهای کمکی در کنار سایر متغیرهای مرتبط با تبخیر از تشت استفاده گردد. دلیل پایین بودن نسبی ضریب تعیین در برآورد تبخیر از تشت می‌تواند به تأثیر کم‌تر دمای سطح زمین بر روی عواملی مثل شدت تابش، فشار بخار آب، سرعت باد و رطوبت نسبی که مقدار تبخیر قویاً وابسته به آن‌هاست مرتبط باشد. به تعبیری دیگر، چون تأثیر چنین عواملی در ماهیت دماهای سطح زمین چندان نهفته نیست دماهای سطح زمین قادر نیستند جنبه‌های اثرپذیری تبخیر وابسته به این عوامل را توجیه نمایند.

اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی در مقیاس‌های ایستگاهی و منطقه‌ای: با هدف ارزیابی دقت مدل‌های رگرسیونی در برآورد مقادیر روزانه دمای اعماق خاک و تبخیر از تشت، اعتبارسنجی مدل به دو صورت ایستگاهی و منطقه‌ای انجام شد. در جدول ۴ نتایج حاصله از اعتبارسنجی مدل‌ها به‌صورت ایستگاهی، که با در نظر گرفتن ۷۵ درصد داده‌های هر ایستگاه جهت واسنجی مدل و ۲۵ درصد باقی‌مانده جهت اعتبارسنجی مدل انجام شد، برای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت و برای هر کدام از ایستگاه‌ها به تفکیک آورده شده است. مقادیر ضریب تعیین (R^2) و میانگین قدرمطلق خطا (MAE) در این جدول، در واقع مربوط به اعمال مدل‌های واسنجی‌شده طی دوره ۲۰۱۶-۲۰۲۰ بر دوره اعتبارسنجی ۲۰۲۱-۲۰۱۷ است و بیانگر درجه اعتبار هر کدام از مدل‌های رگرسیونی در هر ایستگاه به‌هنگام پیش‌بینی مقادیر جدید در خود آن ایستگاه در مقیاس روزانه است. سطر آخر این جدول نیز که با میانگین‌گیری کردن از شاخص‌های خطا برای این ۶ ایستگاه به‌دست آمده است معیاری از میزان خطای کل به‌هنگام برآورد مقادیر جدید روزانه دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت در مقیاس ایستگاهی است.

جدول ۴- نتایج حاصل از اعمال مدل‌های رگرسیونی واسنجی‌شده طی دوره ۲۰۰۲-۲۰۱۶ بر روی دوره اعتبارسنجی ۲۰۱۶-۲۰۲۱ جهت برآورد دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت در مقیاس ایستگاهی بر اساس دو شاخص R^2 و MAE.

Table 4. Results obtained from applying calibrated regression models over 2002-2016 on the validation period 2016-2021 to estimate soil temperatures at different depths and pan evaporation at the station scale based on R^2 and MAE.

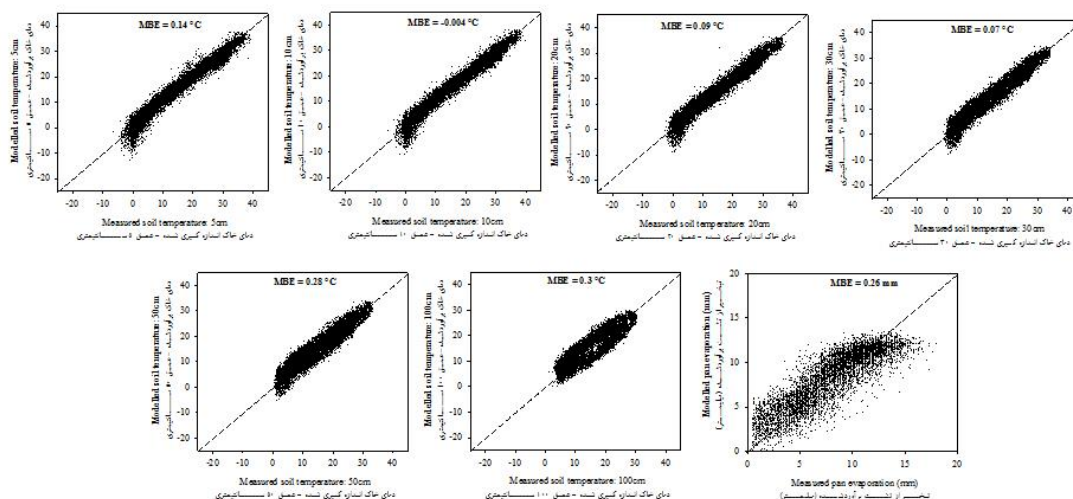
ایستگاه Station	عمق ۵ سانتی‌متری Soil depth 5 cm		عمق ۱۰ سانتی‌متری Soil depth 10 cm		عمق ۲۰ سانتی‌متری Soil depth 20 cm		عمق ۳۰ سانتی‌متری Soil depth 30 cm		عمق ۵۰ سانتی‌متری Soil depth 50 cm		عمق ۱۰۰ سانتی‌متری Soil depth 100 cm		تبخیر از تشت Pan evaporation	
	R^2	MAE (°C)	R^2	MAE (°C)	R^2	MAE (°C)	R^2	MAE (°C)	R^2	MAE (°C)	R^2	MAE (°C)	R^2	MAE (mm)
سنندج Sanandaj	0.97	1.69	0.97	1.59	0.96	1.74	0.95	1.83	0.90	2.51	0.74	3.31	0.81	1.25
سقز Saghez	0.95	2.06	0.96	1.54	0.96	1.56	0.94	1.68	0.91	2.05	0.73	2.73	0.79	1.41
زرینه Zarineh	0.94	1.95	0.94	1.89	0.93	1.99	0.92	2.11	0.87	2.29	0.69	2.76	0.75	1.51
قروه Qorveh	0.97	1.58	0.96	1.55	0.95	1.72	0.92	1.99	0.89	2.32	0.74	2.91	0.72	1.39
بیجار Bijar	0.96	1.80	0.96	1.57	0.96	1.60	0.94	1.82	0.89	2.28	0.76	2.90	0.74	1.91
مریوان Marivan	0.96	1.52	0.97	1.48	0.96	1.73	0.94	1.81	0.92	2.14	0.82	2.69	0.78	1.20
میانگین کل Total mean	0.96	1.77	0.96	1.60	0.95	1.72	0.94	1.87	0.90	2.26	0.75	2.88	0.77	1.45

برای عمق ۵۰ سانتی‌متری) تا ۲/۸۸ درجه سانتی‌گراد (برای عمق ۱۰۰ سانتی‌متری) به‌دست آمده است. در خصوص نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی در برآورد مقادیر روزانه تبخیر از تشت، میانگین مقادیر R^2 و MAE برای کل ۶ ایستگاه به‌ترتیب برابر با ۰/۷۷ و ۱/۴۵ میلی‌متر به‌دست آمده است. بر این اساس در یک اظهارنظر کلی می‌توان گفت به‌هنگام برآورد مقادیر جدید (به‌عنوان مثلاً برآورد خلأهای آماری) دمای اعماق خاک و تبخیر از تشت در منطقه مورد مطالعه براساس مدل‌های

همان‌گونه که از جدول ۴ پیداست میانگین مقادیر R^2 برای کل ۶ ایستگاه طی دوره اعتبارسنجی برای لایه‌های سطحی‌تر خاک (عمق‌های ۵ تا ۳۰ سانتی‌متری) نزدیک به ۰/۹۵، برای عمق ۵۰ سانتی‌متری برابر با ۰/۹ و برای عمق ۱۰۰ سانتی‌متری خاک برابر با ۰/۷۵ به‌دست آمده است که بیانگر دقت بالاتر مدل جهت برآورد دمای خاک در لایه‌های سطحی‌تر است. میانگین کل شاخص MAE نیز برای لایه‌های سطحی بین ۱/۶ تا ۱/۸۷ درجه سانتی‌گراد و برای لایه‌های عمقی‌تر بین ۲/۲۶ درجه سانتی‌گراد

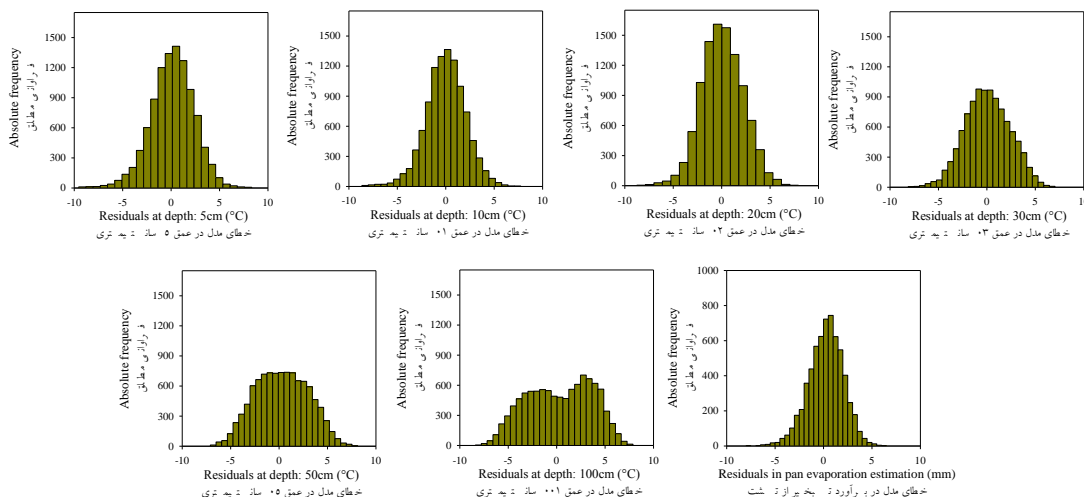
محدودیت مدل، کارایی مدل‌های غیرخطی مثل مدل رگرسیون غیرخطی، شبکه عصبی و مدل‌های مختلف یادگیری ماشین نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. در شکل ۱ هم‌چنین تراکم نازک‌تر (خطای کم‌تر) ابرنقاط پیرامون خط نیمساز برای لایه‌های سطحی‌تر خاک در مقایسه با لایه‌های عمقی‌تر خاک که در آن‌ها تراکم ابرنقاط ضخیم‌تر و در نتیجه خطا بیش‌تر بوده است به وضوح مشخص و نمایان است. هم‌چنین دیده می‌شود که تراکم ابرنقاط پیرامون خط نیمساز برای مقادیر تبخیر از تشت به‌طور نمایانی بیش‌تر از دماهای اعماق خاک است که نمایانگر دقت بالاتر الگوریتم کلی به‌کارگرفته‌شده در این پژوهش در برآورد دمای اعماق خاک در مقایسه با برآورد تبخیر از تشت است. به تعبیری دیگر، دماهای شش‌گانه سطح زمین حاصل از سنجنده MODIS متغیرهای پیش‌بینی‌کننده قوی‌تری به‌هنگام به‌کارگیری آن‌ها در مدل‌های رگرسیونی جهت برآورد دمای اعماق خاک هستند و قادرند به‌هنگام شبیه‌سازی، درصد بالاتری از تغییرپذیری‌های دمای اعماق خاک را در مقایسه با تبخیر از تشت توجیه نمایند. شکل ۲ نیز بیانگر آن است که اگرچه روش کلی به‌کارگرفته‌شده در این پژوهش در برخی موارد منجر به وقوع خطاهای با بزرگی زیاد اما با فراوانی کم شده است اما توزیع مقادیر خطا در اکثر موارد (به استثنای عمق ۱۰۰ سانتی‌متری خاک) به حالت نرمال نزدیک بوده است.

رگرسیونی حاصل از دماهای شش‌گانه سطح زمین در مقیاس روزانه و ایستگاهی، به‌طور متوسط می‌تواند برای دمای خاک در لایه‌های سطحی خاک (تا عمق ۳۰ سانتی‌متری) خطایی مابین ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد، در لایه‌های عمقی‌تر (اعماق ۵۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری) خطایی مابین ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد و برای تبخیر از تشت خطایی نزدیک به ۱/۵ میلی‌متر انتظار داشت. از آن‌جایی‌که چنین انتظار می‌رفت که مقادیر بسیار بالایی که برای R^2 به‌هنگام شبیه‌سازی دمای اعماق خاک حاصل آمد با حصول مقادیر کم‌تری از MAE همراه باشد این نیاز احساس گردید که توزیع و پراکنش مقادیر خطا با توجه بیش‌تری مورد ارزیابی قرار گیرد. جهت انجام این کار، در کنار ارائه دیاگرام پراکنش بین مقادیر روزانه مشاهداتی و برآوردشده برای دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت طی دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۱۷ در مقیاس ایستگاهی (شکل ۱)، هیستوگرام مقادیر خطا نیز ارائه شده است (شکل ۲). قابل ذکر است این شکل‌ها با تجمیع کل ۶ ایستگاه مورد مطالعه در قالب یک شکل واحد حاصل آمده‌اند. در شکل ۱ دیده می‌شود که اگر چه اکثر نقاط پیرامون خط نیمساز گرده آمده‌اند اما مدل در مقادیر پایین دما و مقادیر بالای تبخیر دارای تمایل به کم‌برآوردی بوده است که نشان‌دهنده محدودیت مدل در شبیه‌سازی شرایط حدی است. بر این اساس این نیاز احساس می‌شود که در کنار مدل رگرسیون چندگانه خطی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت جهت اصلاح و بهبود این



شکل ۱- دیاگرام پراکنش بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت طی دوره آماری ۲۰۱۷-۲۰۲۱ در حالت واسنجی کردن مدل‌های رگرسیونی در مقیاس ایستگاهی.

Figure 1. Scatter diagram between measured and estimated soil temperature at different depths and pan evaporation over 2017-2021 in the case of calibrating regression models at stational scale.



شکل ۲- هیستوگرام مقادیر خطای دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت طی دوره آماری ۲۰۱۷-۲۰۲۱ در حالت واسنجی کردن مدل‌های رگرسیونی در مقیاس ایستگاهی.

Figure 2. Histogram of residuals of soil temperature at different depths and pan evaporation over 2017-2021 in the case of calibrating regression models at stational scale.

تعمیم داده شدند تا دقت این مدل‌ها جهت برآورد دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت در هر نقطه دلخواه از منطقه مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گیرد. در جدول ۵ نتایج کلی حاصل از این امر با به‌کارگیری روش اعتبارسنجی متقابل تک‌نمونه‌ای منعکس شده است. مقادیر دو شاخص R^2 و MAE

همان‌گونه که ذکر شد در کنار واسنجی مدل‌های رگرسیونی برای هر ایستگاه به تفکیک که نتایج آن ارائه شد، مرحله دوم از فرایند مدل‌سازی با در نظر گرفتن مجموعه داده‌های کل ۶ ایستگاه با هم به‌صورت یکجا (در مقیاس منطقه‌ای) انجام شد و مدل‌های رگرسیونی حاصله به کل منطقه مورد مطالعه

عمق ۵۰ سانتی‌متری) تا ۳/۲ درجه سانتی‌گراد (برای عمق ۱۰۰ سانتی‌متری) به‌دست آمده است که بیانگر افزایش این شاخص و در نتیجه افزایش خطای مدل در مقیاس منطقه‌ای در مقایسه با مقیاس ایستگاهی است. در خصوص اعتبارسنجی متقابل تک‌نمونه‌ای برآورد مقادیر روزانه تبخیر از تشت، میانگین کل مقادیر R^2 و MAE در مقیاس منطقه‌ای به ترتیب برابر با ۰/۷۱ و ۱/۶۲ میلی‌متر به‌دست آمده است که تا حدودی افت عملکرد مدل را در مقایسه با مقیاس ایستگاهی نشان می‌دهد. به‌طور کلی می‌توان گفت به هنگام برآورد مقادیر دمای اعماق خاک و تبخیر از تشت در مقیاس منطقه‌ای برای هر نقطه دلخواه از منطقه مورد مطالعه براساس مدل‌های رگرسیونی حاصل از دماهای شش‌گانه سطح زمین در مقیاس روزانه، به‌طور متوسط می‌توان در لایه‌های سطحی خاک (تا عمق ۳۰ سانتی‌متری) خطایی مابین ۲ تا ۲/۲ درجه سانتی‌گراد، در لایه‌های عمقی‌تر (اعماق ۵۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری) خطایی مابین ۲/۵ تا ۳/۲ درجه سانتی‌گراد و برای تبخیر از تشت خطایی نزدیک به ۱/۶ میلی‌متر انتظار داشت.

که در این جدول ذکر شده‌اند با میانگین‌گیری کردن از ۶ مرحله مختلف اعتبارسنجی متقابل تک‌نمونه‌ای به‌دست آمده‌اند و به نوعی می‌توان آن‌ها را نمایانگر دقت مدل‌های رگرسیونی حاصله در مقیاس روزانه به هنگام به‌کارگیری برای هر نقطه دلخواه از استان در نظر گرفت. همان‌گونه که از این جدول پیداست میانگین کل مقادیر R^2 طی دوره اعتبارسنجی برای لایه‌های سطحی‌تر خاک (عمق‌های ۵ تا ۳۰ سانتی‌متری) بیش‌تر از ۰/۹، برای عمق ۵۰ سانتی‌متری برابر با ۰/۸۹ و برای عمق ۱۰۰ سانتی‌متری خاک برابر با ۰/۷۴ به‌دست آمده است که این اعداد نزدیک به اعداد به‌دست آمده در مرحله قبل به هنگام مدل‌سازی در مقیاس ایستگاهی هستند. در مقیاس منطقه‌ای نیز مشابه با مقیاس ایستگاهی، نتایج بیانگر دقت بالاتر مدل در برآورد دمای خاک در لایه‌های سطحی‌تر در مقایسه با لایه‌های عمقی‌تر می‌باشد. میانگین کل شاخص MAE برای لایه‌های سطحی خاک بین ۲/۰۳ تا ۲/۱۸ درجه سانتی‌گراد و برای لایه‌های عمقی‌تر بین ۲/۶ درجه سانتی‌گراد (برای

جدول ۵- نتایج حاصل از اعتبارسنجی متقابل تک‌نمونه‌ای جهت برآورد دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت در مقیاس منطقه‌ای

بر اساس دو شاخص R^2 و MAE.

Table 5. Results obtained from Leave-One-Outcross cross validation to estimate soil temperatures at different depths and pan evaporation at the regional scale based on R^2 and MAE.

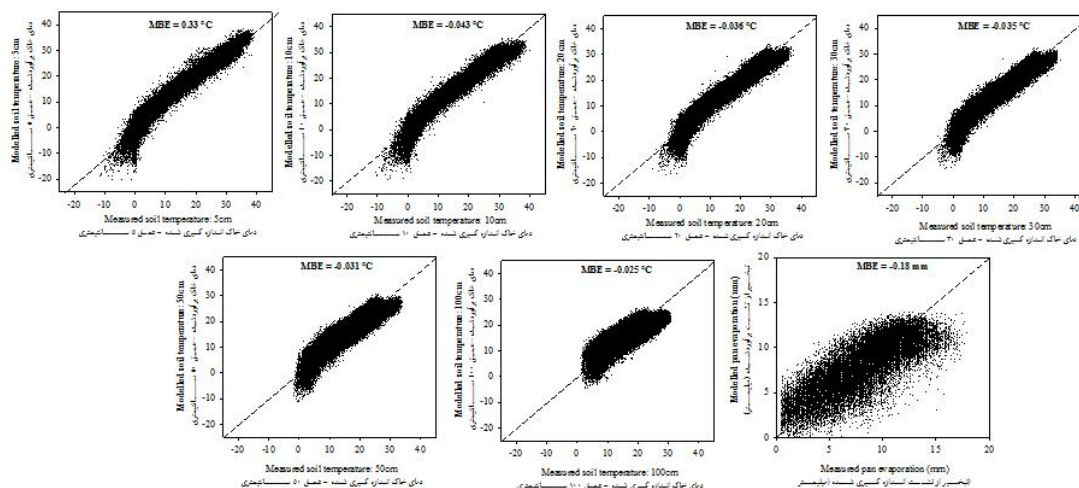
تبخیر از تشت Pan evaporation	عمق ۱۰۰ سانتی‌متری Soil depth 100 cm	عمق ۵۰ سانتی‌متری Soil depth 50 cm	عمق ۳۰ سانتی‌متری Soil depth 30 cm	عمق ۲۰ سانتی‌متری Soil depth 20 cm	عمق ۱۰ سانتی‌متری Soil depth 10 cm	عمق ۵ سانتی‌متری Soil depth 5 cm	میانگین شاخص‌های آماری در ۶ مرحله Average of indices across 6 steps
R^2	0.74	0.89	0.93	0.95	0.96	0.95	
MAE	3.20	2.60	2.18	2.06	2.03	2.07	

مختلف خاک در شکل ۳ و برای تبخیر از تشت در شکل ۴ ارائه شده است. مقایسه این دو شکل با شکل‌های ۱ و ۲ بیانگر پراکندگی بیش‌تر نقاط پیرامون خط نیمساز و در نتیجه افزایش مقدار خطا در این حالت (مقیاس منطقه‌ای) در مقایسه با مقیاس ایستگاهی است.

به جهت نمایش گرافیکی نتایج حاصل از اعتبارسنجی متقابل تک‌نمونه‌ای مدل‌های رگرسیونی در مقیاس منطقه‌ای، دیاگرام پراکنش بین مقادیر روزانه مشاهداتی و برآوردشده براساس داده‌های ایستگاه‌های حذف شده در هر کدام از ۶ مرحله برای دمای اعماق

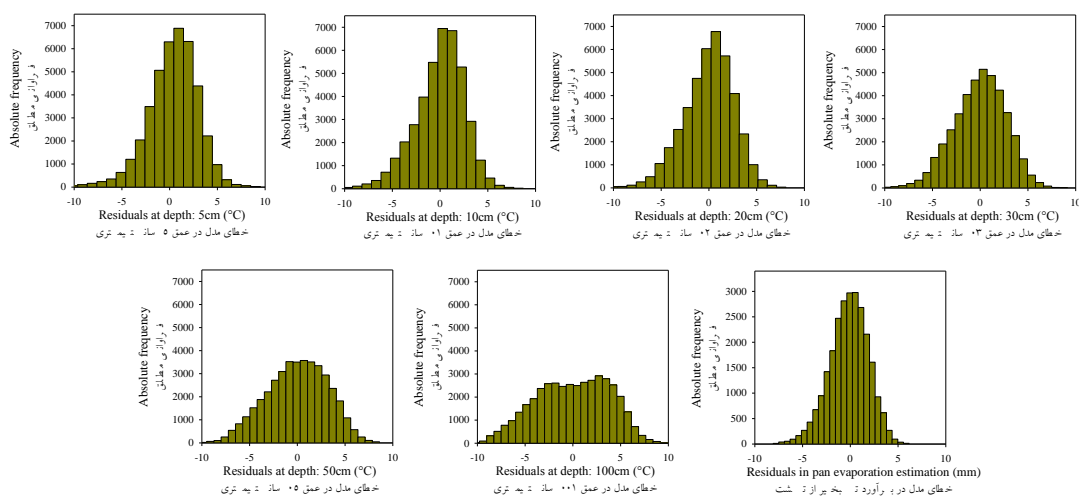
دیده می‌شود که در لایه‌های عمقی‌تر خاک (اعماق ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری)، تراکم مقادیر خطا به‌طور ملموسی بیش‌تر از لایه‌های سطحی‌تر خاک است و تراکم ابرنقاط پیرامون خط نیمساز به‌طور نمایانی برای مقادیر تبخیر از تشت بیش‌تر از دماهای اعماق خاک است.

در این حالت نیز دیده می‌شود که ابرنقاط حاصله به‌استثنای مقادیر پایین دماهای اعماق خاک و مقادیر بالا برای تبخیر از تشت، در سایر موارد به‌صورت نسبتاً تصادفی پیرامون خط نیمساز گرد آمده‌اند که بیانگر تصادفی بودن و غیرسیستماتیک بودن مقادیر خطا در اکثر موارد است. در این شکل‌ها هم‌چنین



شکل ۳- دیاگرام پراکنش بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و برآوردشده دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت در حالت اعتبارسنجی متقابل تک‌نمونه‌ای در مقیاس منطقه‌ای.

Figure 3. Scatter diagram between measured and estimated soil temperature at different depths and pan evaporation at regional scale using cross validation.



شکل ۴- هیستوگرام مقادیر خطای دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت طی دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۱۷ در حالت اعتبارسنجی متقابل تک‌نمونه‌ای در مقیاس منطقه‌ای.

Figure 4. Histogram of residuals of soil temperature at different depths and pan evaporation at regional scale using Leave-One-Out cross validation.

بهبود یافته است که این بهبود برای شاخص MAE چشمگیرتر از شاخص R^2 بوده است.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش که با هدف امکان‌سنجی پیش‌بینی دمای اعماق مختلف خاک و تبخیر از تشت با استفاده از دماهای شش‌گانه سطح زمین حاصل از تصاویر سنجنده MODIS با به‌کارگیری مدل رگرسیون خطی چندگانه به روش گام به گام در استان کردستان انجام شد از دو رویکرد کلی شامل رویکرد ایستگاهی (انجام مدل‌سازی برای هر ایستگاه به‌صورت جداگانه) و منطقه‌ای (انجام مدل‌سازی به‌صورت یکپارچه برای کل ۶ ایستگاه با هم) استفاده شد. نتایج کلی این پژوهش نشان داد که دماهای شش‌گانه سطح زمین حاصل از سنجنده MODIS که از طریق دو ماهواره Terra و Aqua قابل استحصال هستند پتانسیل بسیار بالایی جهت شبیه‌سازی دمای اعماق مختلف خاک به‌ویژه لایه‌های سطحی‌تر دارند به گونه‌ای که از این دماهای سطح زمین می‌توان به‌عنوان متغیر اصلی و به‌طور مستقیم جهت شبیه‌سازی دمای اعماق خاک در هر دو مقیاس ایستگاهی و منطقه‌ای استفاده کرد. نقطه قوت اصلی و کاربردی این پژوهش، استخراج مدل‌های رگرسیونی در مقیاس منطقه‌ای برای استان کردستان است که با به‌کارگیری این مدل‌ها، این امکان فراهم است که با استخراج دماهای سطح زمین حاصل از سنجنده MODIS برای هر نقطه دلخواه در این استان، دمای اعماق خاک را بر اساس مدل‌های استخراج‌شده با دقتی مناسب پیش‌بینی کرد. علی‌رغم دقت مناسب مدل‌های رگرسیونی حاصله در برآورد دمای اعماق خاک، پیشنهاد می‌گردد به جهت ارتقای دقت سطح مدل در پژوهش‌های آتی، در کنار دماهای سطح زمین که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شد از سایر محصولات ماهواره‌ای که بر روی دمای خاک

اجرای مدل با در نظر گرفتن تأخیر زمانی یک‌روزه: همان‌گونه که ذکر شد روش کلی به‌کارگرفته‌شده در این پژوهش، دقت نسبتاً کم‌تری در شبیه‌سازی دمای خاک در لایه‌های عمقی‌تر خاک در مقایسه با لایه‌های سطحی‌تر داشت. به جهت افزایش دقت مدل در اعماق پایین‌تر خاک، مقادیر دمای خاک در اعماق ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری خاک با یک گام تأخیر زمانی روزانه به‌عنوان متغیرهای مستقل جدید به مدل اضافه شدند. بنابراین در این مرحله، ۶ متغیر مستقل اضافی با در نظر گرفتن مقادیر دماهای شش‌گانه سطح زمین اما با یک روز تأخیر حاصل آمدند و در مدل رگرسیون چندگانه خطی به جای ۶ متغیر مستقل (دماهای شش‌گانه سطح زمین)، ۱۲ متغیر مستقل در نظر گرفته شدند. توضیح این‌که از آنجائی‌که نفوذ گرما از سطح خاک به اعماق پایین‌تر با تأخیر مواجه است بنابراین این امکان وجود دارد که دماهای سطح خاک در روز بعد دارای اثر باشند. نتایج حاصل از اعتبارسنجی متقابل تک‌نمونه‌ای مدل رگرسیون خطی چندگانه بر اساس ۱۲ متغیر مستقل مذکور برای دو عمق ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر و در مقیاس منطقه‌ای نشان داد که میانگین مقادیر R^2 و MAE که با در نظر گرفتن ۶ متغیر مستقل در مدل برای عمق ۵۰ سانتی‌متری خاک به ترتیب برابر با ۰/۸۹ و ۲/۶ درجه سانتی‌گراد و برای عمق ۱۰۰ سانتی‌متری به ترتیب برابر با ۰/۷۴ و ۳/۲ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمده بودند (مطابق با جدول ۵) در حالت در نظر گرفتن ۱۲ متغیر مستقل مذکور برای عمق ۵۰ سانتی‌متری به‌ترتیب برابر با ۰/۹۱ و ۲/۱ درجه سانتی‌گراد و برای عمق ۱۰۰ سانتی‌متری به ترتیب برابر با ۰/۷۷ و ۲/۸۵ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمدند. دیده می‌شود که براساس هر دو شاخص مذکور، عملکرد مدل در حالت در نظر گرفتن یک گام تأخیر زمانی، مقداری

داده‌ها و اطلاعات

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل داده‌های هواشناسی و تصاویر ماهواره‌ای هستند. داده‌های هواشناسی از سازمان هواشناسی کشور اخذ شدند و داده‌های ماهواره‌ای نیز به صورت رایگان از سایت محصولات MODIS دانلود شدند. دسترسی به اطلاعات مورد استفاده از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول مقاله امکان پذیر است.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: روش‌شناسی، انجام محاسبات، تهیه جداول و شکل‌ها، نوشتن مقاله، بازبینی و نهایی‌سازی آن
نویسنده دوم: کدنویسی، دانلود و پردازش تصاویر ماهواره‌ای و مشارکت در آنالیزها

اصول اخلاقی

نویسندگان مقاله، اصول اخلاقی را در انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید هر دو نویسنده مقاله می‌باشد.

حمایت مالی

حمایت مالی از این پژوهش در قالب گرنت پژوهشی نویسنده مسئول مقاله بوده است.

تأثیر دارند (به‌طور ویژه رطوبت سطح خاک) نیز به صورت توأمان و ترکیبی جهت شبیه‌سازی دمای اعماق خاک استفاده شود. در خصوص شبیه‌سازی تبخیر از تشت، نتایج حاصل از مدل‌های رگرسیونی نشان داد که امکان برآورد مستقیم تبخیر از تشت با دقت بالا صرفاً با به‌کارگیری دماهای سطح زمین وجود ندارد چون دمای سطح زمین به تنهایی نمی‌تواند تأثیر سایر عوامل دخیل و مؤثر بر روی تبخیر مثل شدت تابش، فشار بخار آب، سرعت باد و رطوبت نسبی را توجیه نمایند. اما با توجه به درجه تأثیری که دماهای سطح زمین بر روی تبخیر از تشت از خود نشان دادند این پتانسیل وجود دارد که از آن‌ها به‌عنوان متغیرهای کمکی و مفید در کنار سایر متغیرهایی که بر روی تبخیر از تشت تأثیر دارند استفاده کرد. هم‌چنین با توجه بروز محدودیت‌هایی به هنگام شبیه‌سازی مقادیر پایین دمای خاک و مقادیر بالای دمای خاک تبخیر از تشت، پیشنهاد می‌شود که جهت رفع چنین محدودیت‌هایی، در پژوهش‌های آتی، مدل‌های غیرخطی مانند رگرسیون غیرخطی، مدل‌های یادگیری ماشین و ... نیز به‌کار گرفته شوند و کارایی چنین روش‌هایی به‌ویژه به هنگام شبیه‌سازی مقادیر حدى دمای اعماق خاک و تبخیر از تشت نیز مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از واحد آمار سازمان هواشناسی کشور به جهت در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

منابع

1. Hillel, D. (2003). Introduction to environmental soil physics. Elsevier.
2. Hu, Q., & Feng, S. (2003). A daily temperature dataset and soil temperature climatology of the contiguous United States. *Journal of Applied Meteorology*, 42(8), 1139-1156.
3. Khoshkhoo, Y. (2016). Simulation of the snow depth using Single Layer Snow Model (SLSM) at Saghez station. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(3), 517-527. [In Persian]
4. Tan, X., Luo, S., Li, H., Hao, X., Wang, J., Dong, Q., & Chen, Z. (2022). Investigating the effects of snow cover and vegetation on soil temperature using remote sensing indicators in the three river source region, China. *Remote Sensing*, 14(16), 1-18.
5. Li, Z. L., Wu, H., Duan, S. B., Zhao, W., Ren, H., Liu, X., & Zhou, C. (2023). Satellite remote sensing of global land surface temperature: Definition, methods, products, and applications. *Reviews of Geophysics*, 61(1), 1-77.
6. Khoshkho, Y. (2018). Evaluating soil surface energy balance model and satellite images to estimating mean daily soil surface temperature. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(3), 177-192. [In Persian]
7. Bateni, S. M., Entekhabi, D., & Jeng, D. S. (2013). Variational assimilation of land surface temperature and the estimation of surface energy balance components. *Journal of Hydrology*, 481, 143-156.
8. Hain, C. R., & Anderson, M. C. (2017). Estimating morning change in land surface temperature from MODIS day/night observations: Applications for surface energy balance modeling. *Geophysical Research Letters*, 44(19), 9723-9733.
9. Alipoor, G., Ghasemi, A., & Mirabasi Najaf Abadi, R. (2024). Estimation of daily pan evaporation in Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province. *Iranian Water Researches Journal*, 18(1), 113-123. [In Persian]
10. Khoshkhoo, Y. (2019). Simulating different depths soil temperature in hourly and daily scales using a SVAT model. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(6), 223-238 [In Persian]
11. Jansson, P. E. (2012). CoupModel: model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1337-1344.
12. Li, Z., Ma, L., Flerchinger, G. N., Ahuja, L. R., Wang, H., & Li, Z. (2012). Simulation of overwinter soil water and soil temperature with SHAW and RZ-SHAW. *Soil Science Society of America Journal*, 76(5), 1548-1563.
13. Feng, Y., Jia, Y., Zhang, Q., Gong, D., & Cui, N. (2018). National-scale assessment of pan evaporation models across different climatic zones of China. *Journal of Hydrology*, 564, 314-328.
14. Wang, K., Liu, X., Li, Y., Liu, C., & Yang, X. (2018). A generalized evaporation model for Chinese pans. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 123(19), 10-943.
15. Syu, M. R., Lee, P. H., Leou, T. M., & Shen, Y. (2016). Solar Irradiance and Pan Evaporation Estimation from Meteorological Satellite Data. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 27(2), 221-239.
16. Gallego-Elvira, B., Taylor, H. M., Harris, P. P., & Ghent, D. (2019). Evaluation of regional-scale soil moisture-surface flux dynamics in Earth system models based on satellite observations of land surface temperature. *Geophysical Research Letters*, 46(10), 5480-5488.
17. Esmaeili, S., Khoshkhoo, Y. & Abdollahi, M. (2018). Estimating daily and monthly air temperature parameters at Kurdistan province using MODIS sensor images. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(2), 413-423. [In Persian]

18. Alavipanah, S. K. (2003). Application of remote sensing in earth science. Tehran University press.
19. Khoshkhoo, Y., & Nikmehr, S. (2021). Application of land surface temperature extracted from satellite images for zoning reference evapotranspiration. *Environment and Water Engineering*, 7(4), 708-722. [In Persian]
20. Gutmann, E. D., & Small, E. E. (2010). A method for the determination of the hydraulic properties of soil from MODIS surface temperature for use in land-surface models. *Water Resources Research*, 46(6), 1-16.
21. Tajfar, E., Bateni, S. M., Lakshmi, V., & Ek, M. (2020). Estimation of surface heat fluxes via variational assimilation of land surface temperature, air temperature and specific humidity into a coupled land surface-atmospheric boundary layer model. *Journal of Hydrology*, 583(2), 1-19.
22. Zhang, F., Zhang, L. W., Jing-Jing, S. H. I., & Huang, J. F. (2014). Soil moisture monitoring based on land surface temperature-vegetation index space derived from MODIS data. *Pedosphere*, 24(4), 450-460.
23. Zhao, X., Xia, H., Pan, L., Song, H., Niu, W., Wang, R., & Qin, Y. (2021). Drought monitoring over Yellow River basin from 2003–2019 using reconstructed MODIS land surface temperature in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(18), 1-23.
24. Alexander, C. (2020). Normalised difference spectral indices and urban land cover as indicators of land surface temperature (LST). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 86, 1-11.
25. Radočaj, D., Jurišić, M., & Gašparović, M. (2022). A wildfire growth prediction and evaluation approach using Landsat and MODIS data. *Journal of environmental management*, 304, 1-15.
26. Hachem, S., Duguay, C. R., & Allard, M. (2012). Comparison of MODIS-derived land surface temperatures with ground surface and air temperature measurements in continuous permafrost terrain. *The Cryosphere*, 6(1), 51-69.
27. Cao, H., Gao, B., Gong, T., & Wang, B. (2021). Analyzing changes in frozen soil in the source region of the Yellow River using the MODIS land surface temperature products. *Remote Sensing*, 13(2), 1-18.
28. Zhu, W., Lü, A., & Jia, S. (2013). Estimation of daily maximum and minimum air temperature using MODIS land surface temperature products. *Remote Sensing of Environment*, 130, 62-73.
29. Shen, Y., Shen, H., Cheng, Q., & Zhang, L. (2021). Generating comparable and fine-scale time series of summer land surface temperature for thermal environment monitoring. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 2136-2147.
30. Khoshkhoo, Y. (2022). Feasibility study of rainfed barley annual yield prediction based on different drought indices. *Journal of Water and Soil Conservation*, 29(2), 1-24. [In Persian]

