

## Evaluation of surface soil moisture of global products using measured data in different climates of Iran

Pardis Nikdad<sup>1</sup>, Mehdi Mohammadi Ghalehi<sup>\*2</sup>, Mahnoosh Moghaddasi<sup>3</sup>

1. M.Sc. Student in Water Science and Engineering, Arak University, Arak, Iran. E-mail: [pardiis78nk@gmail.com](mailto:pardiis78nk@gmail.com)
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Arak University, Arak, Iran and Research Institute for Water Science and Engineering, Arak University, Arak, Iran. E-mail: [m-mohammadighalehi@araku.ac.ir](mailto:m-mohammadighalehi@araku.ac.ir)
3. Associate Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Arak University, Arak, Iran and Research Institute for Water Science and Engineering, Arak University, Arak, Iran. E-mail: [m-moghaddasi@araku.ac.ir](mailto:m-moghaddasi@araku.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Full Paper

**Article history:**  
Received: 06.19.2023  
Revised: 08.25.2023  
Accepted: 10.04.2023

**Keywords:**  
Agricultural meteorological station,  
Climate,  
Global product database,  
Spatiotemporal variation,  
Surface soil moisture

### ABSTRACT

**Background and Objectives:** Soil moisture is one of the most important variables required from different aspects of research, such as agriculture (soil water balance, irrigation schedule, agricultural drought index) and hydrology (infiltration, runoff, recharge). Although the measured soil moisture data is the most accurate data available to researchers, it has disadvantages such as the length of the statistical period, missing data in some stations, point sources, and the inability to extend them to an area such as a basin. Soil moisture data in global products do not have these disadvantages, but their accuracy must be evaluated before use. In the present study, the accuracy of the global products databases has been evaluated to investigate the possibility of using surface soil moisture data from global products in Iran. The main aim of this research is to assess the accuracy of surface soil moisture data of global products based on the measured data of soil moisture variables in different climates of Iran.

**Materials and Methods:** In this regard, the measured data of soil moisture in 43 agricultural meteorological stations across Iran were collected at seven different depths (5, 10, 20, 30, 50, 70, and 100 cm from the soil surface) with a time step of three hours. After the preprocessing of the collected data, 14 stations from different climates of Iran with the most extended and most complete soil moisture data for two depths of 5 and 10 cm with a monthly time step during the period of 2014-2021 were selected to compare with the data of global products. In the next step, soil moisture data in different soil layers were extracted from 5 different global products, including GLEAM3.6a, ERA5, TERRA, MERRA2, and GLDAS2.1, with a monthly time scale. Surface soil moisture in the measured data, the average soil moisture at two depths of 5 and 10 cm, and in global products, the first layer of the soil surface was considered. The evaluation of the accuracy of surface soil moisture data has been done using three statistical criteria, including Pearson's correlation coefficient (R), Mean Bias Error (MBE), and Normalized Root Mean Square Error (NRMSE).

**Results:** Generally, among the studied stations, the highest and lowest values of the correlation coefficient are 0.55 and 0.04, respectively, for Kahriz and Zahak stations. Between the seasons, the highest correlation was obtained in the spring, April, equal to 0.51, and the lowest was obtained in the summer, September, equivalent to 0.11. The highest correlations are related to the GLEAM product, especially in May, June,

---

November, and December. The results of MBE indicate that soil moisture is underestimated in most humid and semi-humid climate stations (Gorgan, Karakhil, and Amol stations). The GLEAM products with a range of [-0.03 ~ +0.13] have the least MBE changes among the studied products. The highest accuracy related to the ERA5 product, especially in the humid climate with NRMSE equal to 0.29. In addition, the lowest accuracy among the studied products is related to the GLDAS, especially in dry climates, with NRMSE equal to 2.16.

**Conclusion:** The results of this research show that the accuracy of the global products of soil moisture varies according to the temporal and spatial of the case study. To select the appropriate product with high accuracy based on the spatiotemporal changes of soil moisture, the present research provides practical results to the researchers.

---

Cite this article: Nikdad, Pardis, Mohammadi Ghalehi, Mehdi, Moghaddasi, Mahnoosh. 2023. Evaluation of surface soil moisture of global products using measured data in different climates of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 30 (3), 127-146.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2024.21470.3659

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---

## ارزیابی رطوبت خاک سطحی پایگاه‌های جهانی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در اقلیم‌های مختلف ایران

پردیس نیک‌داد<sup>۱</sup>، مهدی محمدی قلعنی<sup>۲\*</sup>، مه‌نوش مقدسی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: [pardis78nk@gmail.com](mailto:pardis78nk@gmail.com)
۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران و پژوهشکده آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: [m-mohammadighaleni@araku.ac.ir](mailto:m-mohammadighaleni@araku.ac.ir)
۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران و پژوهشکده آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: [m-moghaddasi@araku.ac.ir](mailto:m-moghaddasi@araku.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: رطوبت خاک یکی از مهم‌ترین متغیرهای موردنیاز از جنبه‌های مختلف تحقیقاتی مانند کشاورزی (محاسبه بیلان آب در خاک، تعیین برنامه آبیاری، شاخص خشک‌سالی کشاورزی) و هیدرولوژیکی (نفوذ، رواناب، تغذیه) است. داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری شده با وجود این که دقیق‌ترین داده‌های در دسترس پژوهش‌گران است، دارای معایبی مانند طول دوره‌ی آماری کوتاه‌مدت، داده‌های ناقص زیاد در برخی از ایستگاه‌ها، نقطه‌ای بودن آن‌ها و عدم قابلیت تعمیم آن‌ها به یک سطح مانند حوزه آبخیز است. داده‌های رطوبت خاک در پایگاه‌های جهانی این معایب را نداشته، اما قبل از استفاده دقت آن‌ها باید مورد ارزیابی قرار گیرد. بر این اساس در پژوهش حاضر به منظور بررسی امکان استفاده از داده‌های رطوبت خاک سطحی پایگاه‌های جهانی در کشور ایران، دقت داده‌ها در این پایگاه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف از این پژوهش ارزیابی دقت داده‌های رطوبت خاک سطحی پایگاه‌های جهانی براساس داده‌های اندازه‌گیری شده از متغیر رطوبت خاک در اقلیم‌های مختلف ایران است.
تاریخ دریافت: ۰۲/۰۳/۲۹ تاریخ ویرایش: ۰۲/۰۶/۰۳ تاریخ پذیرش: ۰۲/۰۷/۱۲	مواد و روش‌ها: بدین منظور ابتدا داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک در ۴۳ ایستگاه هواشناسی کشاورزی کشور در ۷ عمق مختلف (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری از سطح خاک) با گام زمانی سه‌ساعته جمع‌آوری شد. پس از مرحله پیش‌پردازش روی داده‌های رطوبت خاک جمع‌آوری شده، تعداد ۱۴ ایستگاه از اقلیم‌های مختلف ایران با طولانی‌ترین و کامل‌ترین داده‌های رطوبت خاک برای دو عمق ۵ و ۱۰ سانتی‌متری با گام زمانی ماهانه طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۱۴ به منظور مقایسه با داده‌های پایگاه‌های جهانی انتخاب شدند. در مرحله بعد داده‌های رطوبت خاک در لایه‌های مختلف خاک از ۵ پایگاه جهانی مختلف شامل GLEAM3.6a،
واژه‌های کلیدی: اقلیم، ایستگاه هواشناسی کشاورزی، پایگاه داده جهانی، تغییرات زمانی- مکانی، رطوبت خاک سطحی	

ERA5, TERRA, MERRA2 و GLDAS2.1 با مقیاس زمانی ماهانه استخراج شد. رطوبت خاک سطحی در داده‌های اندازه‌گیری‌شده، میانگین رطوبت خاک در دو عمق ۵ و ۱۰ سانتی‌متری و در پایگاه‌های جهانی، لایه اول سطح خاک در نظر گرفته شد. ارزیابی دقت داده‌های رطوبت خاک سطحی پایگاه‌های مختلف به تفکیک ۱۲ ماه سال و سری زمانی متوالی ماهانه با استفاده از سه معیار آماری شامل ضریب همبستگی پیرسون (R)، میانگین خطای اریبی (MBE) و خطای جذر میانگین مربعات نرمال‌شده (NRMSE) انجام شده است.

**یافته‌ها:** در بین ایستگاه‌های موردبررسی، بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر ضریب همبستگی مربوط به ایستگاه‌های کهریز و زهک به‌ترتیب برابر با ۰/۵۵ و ۰/۰۴ است. در بین فصول سال، بیش‌ترین همبستگی در فصل بهار، ماه آوریل برابر ۰/۵۱، و کم‌ترین همبستگی در فصل تابستان، ماه سپتامبر برابر ۰/۱۱، به‌دست آمده است. بالاترین همبستگی‌ها مربوط به پایگاه GLEAM به‌خصوص در ماه‌های می، ژوئن، نوامبر و دسامبر است. نتایج معیار MBE بیانگر کم‌برآورد رطوبت خاک اکثر پایگاه‌ها در ایستگاه‌های اقلیم مرطوب و نیمه‌مرطوب (ایستگاه‌های گرگان، قراخیل و آمل) دارد. پایگاه GLEAM با محدوده برابر با  $[-۰/۰۳ \sim +۰/۱۳]$ ، کم‌ترین تغییرات MBE را در بین پایگاه‌های موردبررسی دارد. به‌طور میانگین، بیش‌ترین دقت مربوط به پایگاه ERA5 به‌خصوص در اقلیم مرطوب با NRMSE برابر ۰/۲۹ است. در کنار آن کم‌ترین دقت در بین پایگاه‌های موردبررسی مربوط به پایگاه GLDAS به‌ویژه در اقلیم خشک با NRMSE برابر ۲/۱۶ است.

**نتیجه‌گیری:** نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که دقت پایگاه داده‌های جهانی رطوبت خاک با توجه به زمان و مکان موردبررسی متفاوت می‌باشد. پژوهش حاضر در راستای انتخاب پایگاه داده مناسب با بیش‌ترین دقت و با توجه به تغییرات زمانی - مکانی متغیر رطوبت خاک، نتایج کاربردی را در اختیار پژوهش‌گران قرار می‌دهد.

**استناد:** نیک‌داد، پردیس، محمدی قلعه‌نی، مهدی، مقدسی، مهنوش (۱۴۰۲). ارزیابی رطوبت خاک سطحی پایگاه‌های جهانی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده در اقلیم‌های مختلف ایران. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۰ (۳)، ۱۴۶-۱۲۷.

DOI: 10.22069/jwsc.2024.21470.3659



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

### مقدمه

رطوبت خاک به‌ویژه رطوبت خاک سطحی<sup>۱</sup> (SSM)، از مهم‌ترین متغیرهای موردنیاز در مطالعاتی مانند بیلان آب در خاک، نیاز آبی گیاهان و پایش خشک‌سالی کشاورزی است (۱). از طرفی داده‌های اندازه‌گیری‌شده رطوبت خاک دارای نقایصی مانند هزینه‌بر بودن اندازه‌گیری، تعداد زیاد داده‌های گمشده، طول دوره آماری کوتاه‌مدت و نقطه‌ای بودن اندازه‌گیری‌ها می‌باشد (۲). در راستای حل این چالش‌ها، طی سالیان اخیر استفاده از داده‌های پایگاه‌های شبکه‌بندی‌شده جهانی رطوبت خاک توسط پژوهش‌گران گسترش زیادی داشته است. به‌طورکلی می‌توان انواع پایگاه‌های جهانی رطوبت خاک را به دودسته اصلی سنجش‌ازدور مینا و مدل‌مینا تقسیم‌بندی کرد (۳).

تاکنون پژوهش‌های زیادی در مورد ارزیابی دقت انواع پایگاه‌های جهانی رطوبت خاک براساس داده‌های اندازه‌گیری‌شده انجام‌شده است. آن و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از داده‌های کشور چین برای دوره ۲۰۱۰-۲۰۰۳ دقت داده‌های پایگاه ESA CCI را موردبررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها بیانگر میانگین خطای ۰/۰۷۵ مترمکعب در مترمکعب بود (۴). بی و همکاران (۲۰۱۶) داده‌های رطوبت خاک پایگاه GLDAS را با داده‌های اندازه‌گیری‌شده در فلات تبت برای دوره ۲۰۰۸-۲۰۱۱ مقایسه آماری کردند. نتایج نشان داد که میانگین ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۵۰ و مقدار خطا برابر ۰/۱۹۲ درصد می‌باشد (۵). لی و همکاران (۲۰۲۰) پژوهش جامعی در مورد ارزیابی دقت ۵ پایگاه بازتحلیل‌شده رطوبت خاک برای دوره ۲۰۱۷-۱۹۷۹ در ایستگاه‌های مختلفی از جهان انجام دادند. نتایج پژوهش آن‌ها بیانگر دقت بیش‌تر پایگاه ERA5 با میانگین ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۰ در مقایسه با سایر پایگاه‌های مورد مطالعه

بود (۶). زو و همکاران (۲۰۲۱) برای رطوبت خاک ناحیه ریشه، دقت ۸ پایگاه را در مقایسه با داده‌های شبکه رطوبت خاک جهانی در ایستگاه‌های مختلفی از جهان بررسی کردند. نتایج ایشان بیانگر دقت بالاتر پایگاه SMAP برای آمریکای شمالی و هم‌چنین دقت بیش‌تر پایگاه MERRA2 در ترکیب با پایگاه‌های ERA5، JRA-55، GLDAS است (۷). از جمله مهم‌ترین این پژوهش‌ها می‌توان به مطالعه لیو و همکاران (۲۰۲۱) اشاره کرد که در آن عدم قطعیت یازده پایگاه رطوبت خاک در فلات چینگهای تبت طی دوره ۲۰۱۸-۲۰۱۵ موردبررسی قرار گرفت. نتایج کلی این پژوهش بیانگر عدم قطعیت نسبی پایگاه‌های سنجش‌ازدور مینا و مدل‌مینا به ترتیب برابر ۳۹/۴۱ و ۲۸/۳۴ درصد بود. به‌عبارت‌دیگر نتایج پژوهش ایشان بیانگر یک تأثیرپذیری قوی‌تر رطوبت خاک پایگاه‌های مدل‌مینا در مقایسه با پایگاه‌های ماهواره‌مینا از متغیرهای هواشناسی مانند بارش و دمای هوا داشت (۸). در پژوهش مشابهی لی و همکاران (۲۰۲۲)، دقت داده‌های رطوبت خاک را در ۹ پایگاه ماهواره‌مینا براساس داده‌های اندازه‌گیری‌شده در دلتای رودخانه یانگ‌تسه برای سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۱۵ مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج ایشان بیانگر دقت بیش‌تر پایگاه ESA CCI با میانگین ضریب همبستگی برابر ۰/۵۲ و ریشه میانگین مربعات خطای برابر ۰/۰۴ مترمکعب در مترمکعب بوده است (۹). فان و همکاران (۲۰۲۲) در ۹۱ ایستگاه اندازه‌گیری رطوبت خاک در دولایه سطحی و ناحیه رشد ریشه خاک استان جیانگ‌سو در چین، دقت ۱۳ پایگاه ماهواره‌مینا و بازتحلیل‌شده را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج ایشان بیانگر دقت بیش‌تر با ترکیب داده‌های پایگاه‌های ERA5-Land، SMAP-L4، ESA CCI، GLDAS-Noah و ASCAT برای رطوبت لایه سطحی و پایگاه‌های ERA5-Land، SMAP-L4 و ESA CCI برای

1- Surface Soil Moisture (SSM)

پژوهش‌های کمی انجام شده است، که از مهم‌ترین دلایل آن می‌توان به نبود شبکه‌ای جامع برای پایش رطوبت خاک اشاره کرد (۱۲). با توجه به کاربرد وسیع متغیر رطوبت خاک در زمینه‌های مدیریت و حفاظت از منابع آب و خاک و جمع‌بندی مرور منابع، ضرورت بررسی پایگاه داده‌های رطوبت خاک جهانی قابل جایگزین با داده‌های اندازه‌گیری شده وجود دارد. این مطلب اهمیت زیاد ارزیابی امکان استفاده از انواع پایگاه‌های جهانی رطوبت خاک را در کشور ایران نشان می‌دهد. هدف اصلی از پژوهش حاضر پر کردن بخشی از این خلأ تحقیقاتی در مطالعات داخلی کشور در نظر گرفته شده است. به این منظور هدف اصلی این مطالعه ارزیابی دقت داده‌های رطوبت خاک سطحی پایگاه‌های جهانی براساس داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک در ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی کشور ایران است.

### مواد و روش‌ها

خاک از یک مجموعه سه‌جزئی شامل ذرات جامد (معدنی و آلی)، رطوبت و هوا تشکیل شده است. رطوبت خاک در واقع مقدار آب موجود در هر واحد جرم یا حجم خاک می‌باشد که به دو صورت رطوبت جرمی و حجمی قابل اندازه‌گیری است. رطوبت جرمی خاک ( $\theta_m$ ) نسبت جرم آب موجود در خاک به جرم بخش جامد و رطوبت حجمی ( $\theta_v$ ) نسبت حجم آب به حجم کل خاک بر اساس رابطه ۱ تعریف می‌شود (۱۳).

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_t} \quad (1)$$

اندازه‌گیری به سانتی‌مترمکعب و رطوبت حجمی خاک بر حسب درصد حجمی رطوبت می‌باشد.

رطوبت خاک در ناحیه رشد ریشه با ضریب همبستگی بالاتر است (۱۰).

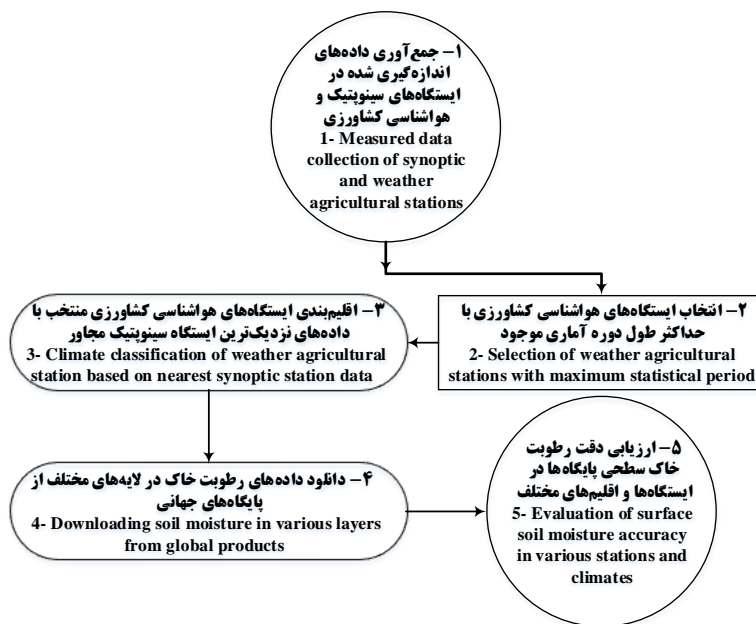
جامعی و همکاران (۲۰۱۷) اعتبارسنجی داده‌های اسموس را با استفاده از داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در پنج ایستگاه شامل اهواز، سرابله، سرارود، داراب و اکتانان انجام دادند. نتایج آن‌ها بیانگر همبستگی خوب داده‌های ماهواره اسموس با داده‌های زمینی با مقادیر ضریب همبستگی حدود ۰/۷۵ تا ۰/۸۸ بوده است. هم‌چنین مقادیر شاخص RMSD از ۰/۰۲ تا ۰/۰۶ مترمکعب در مترمکعب تغییرات نشان داد که بیش‌ترین دقت در ایستگاه اهواز مشخص شد (۱۱). اسعدی اسکویی و همکاران (۲۰۲۲) تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک سطحی پایگاه SMOS را بدون در نظر گرفتن داده‌های مشاهده‌ای در ایران طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۱۵ بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقادیر ماهانه رطوبت خاک عمق ۵ سانتی‌متری در طول دوره موردبررسی از ۰/۰۰۵ تا ۰/۵۳۸ مترمکعب متغیر بوده و بیش‌ترین مقادیر آن به ترتیب مربوط به نواحی شمالی و غربی و کم‌ترین آن مربوط به مناطق مرکزی و جنوب شرقی ایران است (۱۲). مطیعی و همکاران (۲۰۲۲) رطوبت خاک پایگاه داده‌های ECV را با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های فرخشهر، سرابله و سیلاخور مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیش‌ترین همبستگی برای ایستگاه سرابله و برابر با ۰/۸۲ است (۱۳).

در رابطه با ارزیابی دقت انواع پایگاه‌های رطوبت خاک در ایران با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده

در رابطه ۱،  $\theta_v$ ،  $V_t$ ،  $V_w$  به ترتیب حجم آب موجود در خاک به سانتی‌مترمکعب، حجم کل خاک مورد

سنجش از دور می‌باشد. مراحل انجام پژوهش حاضر به صورت خلاصه در گردش‌نمای شکل ۱ ارائه شده است.

روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک شامل دو دسته روش‌های میدانی (مانند روش‌های وزنی، بلوک گچی، تانسیومتر، انعکاس سنجی و نوترون‌متری) و روش‌های



شکل ۱- مراحل انجام پژوهش حاضر.

Figure 1. Flowchart of the present research.

در پژوهش حاضر داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی از سازمان هواشناسی ایران<sup>۱</sup> (IRIMO) دریافت و استفاده شده است. در مرحله اول داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در تمامی ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی در سرتاسر ایران جمع‌آوری و داده‌های آن‌ها از لحاظ طول دوره آماری و داده‌های ناقص مورد بررسی قرار گرفت. کل داده‌های رطوبت خاک جمع‌آوری شده در ۷ عمق خاک شامل اعماق ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری از سطح خاک با فاصله زمانی سه‌ساعته (۸ اندازه‌گیری در ۲۴ ساعت شبانه‌روز) در ۴۳ ایستگاه هواشناسی کشاورزی از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ اندازه‌گیری و جمع‌آوری شده

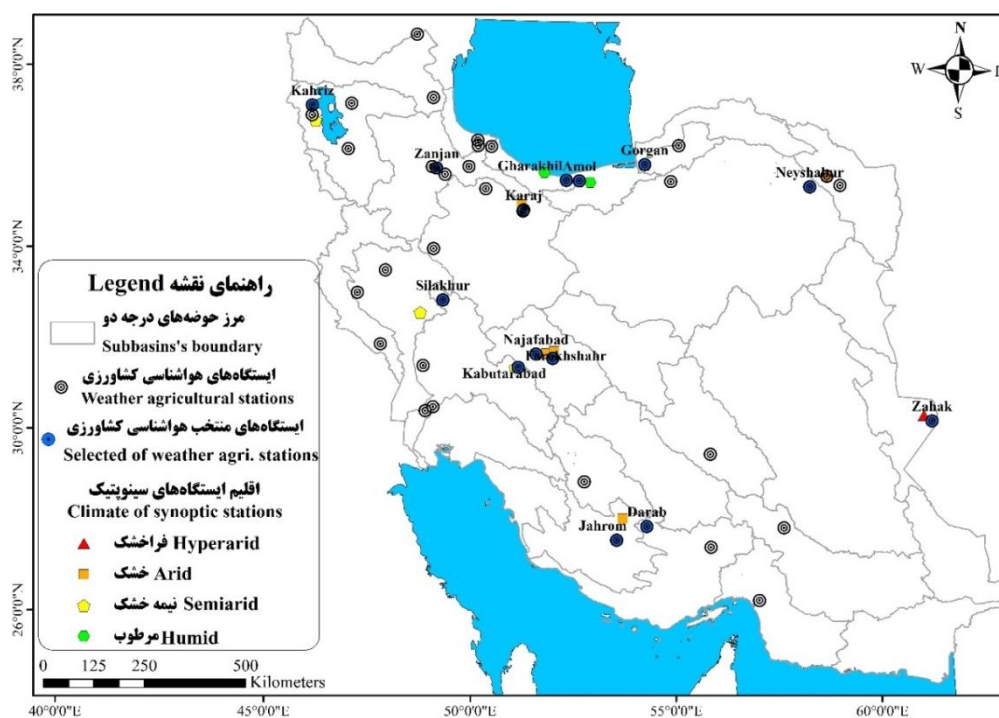
براساس شکل ۱، مراحل انجام پژوهش حاضر را می‌توان در ۵ مرحله شامل ۱) جمع‌آوری داده‌های اندازه‌گیری شده هواشناسی و رطوبت خاک در ایستگاه‌های سینوپتیک و هواشناسی کشاورزی، ۲) پیش‌پردازش اولیه داده‌های رطوبت خاک شامل تعیین ایستگاه‌ها با حداقل داده‌های ناقص و طولانی‌ترین دوره آماری، ۳) طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌های منتخب بر اساس داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک مجاور، ۴) دانلود داده‌های رطوبت خاک پایگاه‌های جهانی در لایه‌های مختلف خاک و ۵) ارزیابی دقت داده‌های رطوبت خاک سطحی پایگاه‌های جهانی براساس شاخص‌های آماری خلاصه کرد. این مراحل در ادامه توضیح داده شده است.

1- Islamic Republic of Iran Meteorological Organization (IRIMO)

در نزدیک‌ترین ایستگاه‌های سینوپتیک به ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی منتخب برای یک دوره ۳۳ ساله (۱۹۸۷-۲۰۱۹) از سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری شد (شکل ۲). در ادامه با استفاده از این داده‌ها مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه با استفاده از روش پنمن - مانیتث فائو<sup>۱</sup>  $56^1$  محاسبه و اقلیم‌بندی با استفاده از شاخص خشکی<sup>۲</sup>  $(AI=P/PET)$  یا نسبت میانگین بارش سالانه (P) به میانگین تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه (PET) انجام شد (۱۴). براساس شاخص AI، اقلیم ایران به چهار اقلیم فراخشک  $(P/PET < 0.03)$ ، خشک  $(0.03 < P/PET < 0.20)$ ، نیمه‌خشک  $(0.20 < P/PET < 0.65)$  و مرطوب  $(P/PET > 0.65)$  تقسیم‌بندی می‌شود (۱۵ و ۱۶).

است. با انجام پیش‌پردازش‌های لازم روی داده‌های جمع‌آوری شده و با توجه به کم‌ترین داده‌های ناقص در نهایت داده‌های رطوبت خاک در اعماق ۵ و ۱۰ سانتی‌متری در ۱۴ ایستگاه برای یک دوره ۸ ساله از ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ برای ارزیابی دقت داده‌های رطوبت خاک پایگاه‌های جهانی در عمق لایه سطحی خاک با گام زمانی ماهانه در نظر گرفته شد. در شکل ۲ موقعیت ۱۴ ایستگاه هواشناسی کشاورزی منتخب از بین ۴۳ ایستگاه اولیه نشان داده شده است.

با توجه به نیاز به داده‌های بلندمدت متغیرهای هواشناسی به منظور اقلیم‌بندی ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی مورد مطالعه، داده‌های هواشناسی شامل بارندگی، دمای حداقل و حداکثر، سرعت باد، رطوبت نسبی و تعداد ساعات آفتابی با مقیاس زمانی روزانه



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی و سینوپتیک مورد مطالعه در پژوهش حاضر.

Figure 2. Location of weather agricultural and synoptic stations in the present study.

1- Penman-Monteith method based on United Nations Food and Agriculture Organization in its Irrigation and Drainage Paper No. 56 (PM FAO56)

2- Aridity Index (AI)



(ایستگاه‌های زنجان، کهریز، فرخ‌شهر، سیلاخور و گرگان)، و ۲ ایستگاه در اقلیم مرطوب (ایستگاه‌های قراخیل و آمل) قرار دارند. مشخصات ۱۴ ایستگاه هواشناسی کشاورزی منتخب، در جدول ۱ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۲ و بر اساس اقلیم‌بندی شاخص خشکی، از بین ۱۴ ایستگاه هواشناسی کشاورزی منتخب، تعداد یک ایستگاه در اقلیم فراخشک (ایستگاه زهک)، ۶ ایستگاه در اقلیم خشک (ایستگاه‌های کبوترآباد، نجف‌آباد، نیشابور، کرج، داراب و جهرم)، ۵ ایستگاه در اقلیم نیمه‌خشک

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی مورد مطالعه در پژوهش حاضر.

Table 1. Characteristics of studied weather agricultural stations in the present study.

شماره Number	هواشناسی کشاورزی Weather agricultural	سینوپتیک Synoptic	ارتفاع Altitude (m)	بارش P (mm/y)	دما T (°C)	تبخیرتعرق PET (mm/y)	شاخص خشکی Aridity index	اقلیم Climate
1	زهک Zahak	زابل Zabol	495	53	22.8	2261	0.02	فراخشک Hyperarid
2	کبوترآباد Kabutarabad	اصفهان شرق Esfahan East	1543	104	15.4	1321	0.08	
3	نجف‌آباد Najafabad	اصفهان شرق Esfahan East	1636	104	15.4	1321	0.08	
4	نیشابور Neyshabur	گلمکان Golmakan	1213	266	13.7	1248	0.21	خشک Arid
5	کرج Karaj	کرج Karaj	1293	258	15.4	1208	0.21	
6	داراب Darab	فسا Fassa	1098	281	19.3	1199	0.23	
7	جهرم Jahrom	فسا Fassa	1082	281	19.3	1199	0.23	
8	زنجان Zanjan	زنجان Zanjan	1659	294	11.5	1085	0.27	
9	کهریز Kahriz	ارومیه Urmia	1336	319	11.8	1051	0.30	
10	فرخ‌شهر Farokhsahr	شهرکرد Shahrekord	2085	329	11.5	1019	0.32	نیمه‌خشک Semiarid
11	سیلاخور Silakhor	خرم‌آباد Khoramabad	1149	306	17.0	1208	0.44	
12	گرگان Gorgan	گرگان Gorgan	13	529	18.0	1115	0.47	
13	قراخیل Gharakhil	قراخیل Gharakhil	15	736	17.3	1052	0.70	مرطوب Humid
14	آمل Amol	بابلسر Babolsar	24	910	17.8	1061	0.86	

پایگاه *GLDAS NOAH2.1* سیستم جهانی همسان‌سازی داده‌های زمین، پایگاه *GLDAS* براساس داده‌های ماهواره‌ای و زمینی با استفاده از تکنیک‌های ادغام‌سازی با هدف تولید داده‌های سری زمانی توسعه یافته است. از پایگاه *GLDAS* انواع داده‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی و گیاهی در مقیاس جهانی با تفکیک مکانی ۰/۲۵ تا ۱ درجه از سال ۱۹۴۸ تا زمان حاضر قابل دریافت است. این پایگاه شامل انواع مدل‌هایی مانند *Noah*، *CLM*، *VIC*، *Mosaic* و *CLS* است. از مدل *GLDAS Noah* رطوبت خاک در چهار لایه شامل ۰-۱۰، ۱۰-۴۰، ۴۰-۱۰۰ و ۱۰۰-۲۰۰ سانتی‌متر قابل دریافت است. در پژوهش حاضر، داده‌های رطوبت خاک ماهانه پایگاه *GLDAS* مدل *Noah* نسخه 2.1 با تفکیک مکانی ۰/۲۵×۰/۲۵ درجه طی سال‌های ۱۹۸۰-۲۰۲۲ در لایه اول (۰-۱۰ سانتی‌متر) استفاده شده است (۲۰).

پایگاه *MERRA-2* مدل تحلیل گذشته‌نگر عصر مدرن برای پژوهش‌ها و کاربردها (*MERRA*) با استفاده از داده‌های زمینی توسط *NASA* توسعه یافته است. پایگاه *MERRA2* دو لایه از رطوبت خاک شامل لایه اول (۰-۵ سانتی‌متر) و لایه دوم (۱۰-۱۰۰ سانتی‌متر) دارد. در پژوهش حاضر داده‌های ماهانه رطوبت خاک لایه اول از نسخه دوم مدل *MERRA* با عنوان *MERRA-2* با تفکیک مکانی ۰/۵×۰/۶۲۵ درجه طی دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۲ استفاده شده است (۲۱ و ۲۲).

پایگاه *TerraClimate* یک بانک داده از متغیرهای هواشناسی و اقلیمی شامل بارش، دمای حداقل و حداکثر، سرعت باد، تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل و سایر داده‌ها را با تفکیک مکانی ۰/۰۴×۰/۰۴ درجه طی دوره ۱۹۵۸-۲۰۲۱ در مقیاس جهانی در اختیار پژوهش‌گران قرار می‌دهد. داده‌های رطوبت

به‌منظور ارزیابی جامع از داده‌های شبکه‌بندی شده جهانی برای متغیر رطوبت خاک، ۵ پایگاه داده جهانی شامل پایگاه‌های *ERA5*<sup>۱</sup>، *GLEAM*<sup>۲</sup>، *GLDAS*<sup>۳</sup>، *MERRA*<sup>۴</sup> و *TerraClimate*<sup>۵</sup> مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه خصوصیات هر یک از این پایگاه‌ها شرح داده شده است.

پایگاه داده *ERA5* نسخه پنجم داده‌های بازتحلیل شده مرکز *ECMWF*<sup>۱</sup> می‌باشد که تعداد زیادی متغیر در ترازهای مختلف فشاری جو را در اختیار پژوهش‌گران قرار می‌دهد پایگاه *ERA5* متغیر رطوبت خاک را به تفکیک ۴ لایه خاک شامل، لایه اول (۰-۷ سانتی‌متر)، لایه دوم (۷-۲۸ سانتی‌متر)، لایه سوم (۲۸-۱۰۰ سانتی‌متر) و لایه چهارم (۱۰۰-۲۸۹ سانتی‌متر) دارد. در پژوهش حاضر داده‌های ماهانه رطوبت خاک این پایگاه در لایه اول طی دوره ۱۹۷۹-۲۰۲۰ با تفکیک مکانی ۰/۲۵×۰/۲۵ درجه مورد استفاده قرار گرفته است (۱۷).

پایگاه *GLEAM 3.6a* یکی از تخصصی‌ترین پایگاه داده‌های جهانی مرتبط با رطوبت خاک، پایگاه داده *GLEAM* یا مدل آمستردام تبخیر زمین جهانی است. این پایگاه متغیرهایی مانند تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل و رطوبت خاک را در دو لایه سطحی و ناحیه رشد ریشه دارد. در پژوهش حاضر متغیر رطوبت سطحی با مقیاس زمانی ماهانه از پایگاه *GLEAM* نسخه 3.6a برای سال‌های ۱۹۸۰-۲۰۲۱ با تفکیک مکانی ۰/۲۵×۰/۲۵ درجه استفاده شده است (۱۸ و ۱۹).

- 1- The fifth generation ECMWF reanalysis
- 2- Global Land Evaporation Amsterdam Model
- 3- Global Land Data Assimilation System
- 4- The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications
- 5- A dataset of monthly climate and climatic water balance for global terrestrial surfaces
- 6- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

خاک ماهانه پایگاه *TerraClimate* در یک لایه از خاک قابل دانلود است (۲۳). مقدار رطوبت خاک این پایگاه با مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در لایه سطحی خاک مقایسه شده است. خلاصه‌ای از مشخصات پایگاه‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات پایگاه‌های رطوبت خاک مورد استفاده در مطالعه حاضر.

**Table 2. Characteristics of used soil moisture products in the present study.**

پایگاه	لایه‌های خاک	منبای داده	تفکیک مکانی	دوره زمانی	رفرنس
Product	Soil layers	Data source	Spatial resolution	Temporal period	Reference
ERA5	0-7, 7-28, 28-100, 100-289 cm	بازتحلیل شده Reanalysis	0.25°×0.25°	1979-2021	(17)
GLEAM3.6a	Surface and root zone layers	بازتحلیل شده Reanalysis	0.25°×0.25°	1980-2021	(18; 19)
GLDAS Noah2.1	0-10, 10-40, 40-100, 100-200 cm	ماهواره‌ای و ایستگاه‌مبنا Satellite and gauge-based	0.25°×0.25°	1980-2021	(20)
MERRA2	0-5, 10-100 cm	بازتحلیل شده Reanalysis	0.5°×0.625°	1958-2021	(21; 22)
TerraClimate	One layer	بازتحلیل شده و ایستگاه‌مبنا Reanalysis and gauge-based	0.04°×0.04°	1958-2021	(23)

سطحی در ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی لحاظ شده است. دوره زمانی جهت مقایسه رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و پایگاه‌ها، با توجه به دوره زمانی در دسترس داده‌های اندازه‌گیری شده، سری زمانی ماهانه ۲۰۲۱-۲۰۱۴ (۸ سال یا ۹۶ ماه) در نظر گرفته شده است.

به منظور بررسی دقت داده‌های پایگاه‌های رطوبت خاک، مقادیر اندازه‌گیری شده متغیرهای رطوبت خاک سطحی در ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی با مقادیر داده‌های شبکه‌بندی شده پایگاه‌ها مقایسه شده است. به این منظور از سه معیار ارزیابی شامل ضریب همبستگی پیرسون<sup>۱</sup> (r)، میانگین خطای اریبی<sup>۲</sup> (MBE) و خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده<sup>۳</sup> (NRMSE) استفاده شده است. معادله این معیارها در روابط ۲ تا ۴ ارائه شده است.

رطوبت خاک در لایه سطحی (SSM) معمولاً برابر با رطوبت خاک در لایه‌های سطحی خاک از ۰ تا ۱۰ سانتی‌متری سطح خاک در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال ایکسیو و همکاران (۲۰۲۱) مقدار رطوبت خاک در لایه ۰-۷ سانتی‌متری پایگاه ERA5 را معادل رطوبت خاک سطحی در نظر گرفتند (۲۴). بر اساس پژوهش‌های گذشته در پژوهش حاضر نیز رطوبت خاک سطحی برابر با رطوبت خاک در لایه‌های ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. به این منظور در پژوهش حاضر، رطوبت خاک لایه اول (۰-۷ سانتی‌متر) پایگاه ERA5، رطوبت خاک لایه اول (۰-۱۰ سانتی‌متر) پایگاه GLDAS، رطوبت خاک لایه اول (۰-۵ سانتی‌متر) پایگاه MERRA2، رطوبت خاک سطحی پایگاه GLEAM و متغیر رطوبت خاک پایگاه TERRA نیز به عنوان رطوبت خاک سطحی در نظر گرفته شده است (۲۵ و ۲۶). هم‌چنین میانگین رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در اعماق ۵ و ۱۰ سانتی‌متری به عنوان رطوبت خاک

1- Pearson Correlation Coefficient (R)  
2- Mean Bias Error (MBE)  
3- Normalized Root Mean Squared Error (NRMSE)

$$R = \frac{\sum_{t=1}^N (SM_{ot} - \overline{SM}_o)(SM_{pt} - \overline{SM}_p)}{\sqrt{\left[ \sum_{t=1}^N (SM_{ot} - \overline{SM}_o)^2 \right] \left[ \sum_{t=1}^N (SM_{pt} - \overline{SM}_p)^2 \right]}} \quad (2)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (SM_{pt} - SM_{ot}) \quad (3)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\overline{SM}_o} \quad (4)$$

آن، مانند مقادیر بارش، دمای هوا، رطوبت نسبی هوا، تبخیر و تعرق، سرعت باد، خصوصیات خاک، نوع پوشش گیاهی و اقلیم هر منطقه می‌تواند متفاوت باشد. معمولاً با توجه به ماه‌های بارندگی و مقدار دمای هوا، حداکثر مقدار رطوبت خاک باید در ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه (فصل زمستان) و حداقل آن در ماه‌های جولای، آگوست و سپتامبر (فصل تابستان) اتفاق بیفتد. این روند رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در اکثر ایستگاه‌های شکل ۳، از جمله نیشابور، داراب، جهرم، کهریز، زنجان، فرخشهر، سیلاخور، گرگان، قراخیل و آمل مشاهده می‌شود. به طوری که با شروع فصل زمستان رطوبت خاک روندی افزایشی گرفته و از ابتدای بهار (آوریل) تا انتهای تابستان (اکتبر) به روند کاهشی خود ادامه می‌دهد. در برخی از ایستگاه‌ها به خصوص ایستگاه‌های اقلیم خشک مانند کبوترآباد، نجف‌آباد و کرج (شکل ۳ ب، پ و ث)، رطوبت خاک روندی تقریباً ثابت از خود در طی ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد.

شکل ۳، بیانگر این نکته می‌باشد که هر چه از اقلیم‌های خشک به سمت اقلیم‌های مرطوب پیش می‌رویم، متغیر رطوبت خاک سطحی در پایگاه‌ها همخوانی بیشتری با داده‌های اندازه‌گیری از خود نشان می‌دهند. به منظور نمایش بهتر روند تغییرات

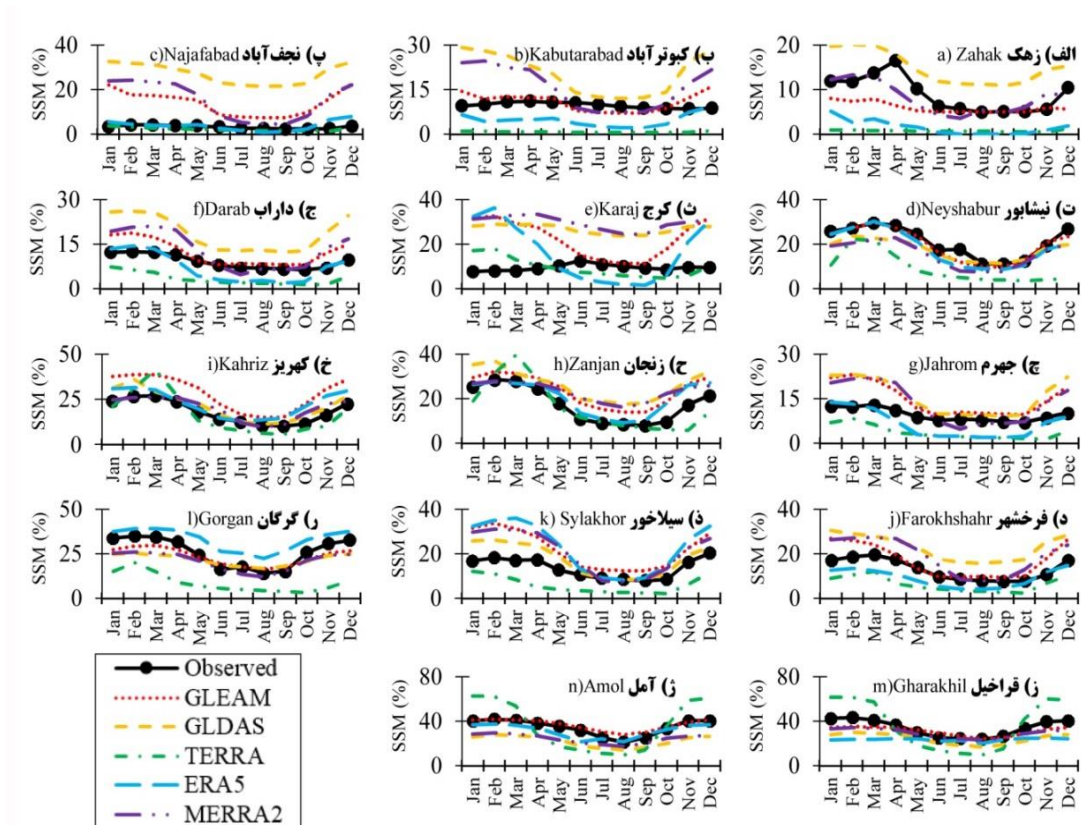
واحد رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و پایگاه‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر بر حسب درصد حجمی رطوبت خاک یا مترمکعب آب در مترمکعب خاک می‌باشد. در روابط ۱ تا ۳،  $SM_{pt}$  و  $SM_{ot}$  به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده پایگاه متغیر رطوبت خاک در زمان  $t$ ،  $\overline{SM}_o$  و  $\overline{SM}_p$  میانگین مقادیر متغیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و برآورد شده پایگاه،  $t$  مقیاس زمانی به ماه و  $N$  تعداد کل ماه‌های مورد بررسی در دوره زمانی مورد مطالعه می‌باشد. میزان دقت برآورد یک متغیر را با استفاده از شاخص  $NRMSE$  می‌توان به چهار دسته عالی ( $NRMSE < 0.1$ )، خوب ( $0.1 < NRMSE < 0.2$ )، متوسط ( $0.2 < NRMSE < 0.3$ ) و ضعیف ( $NRMSE > 0.3$ ) تقسیم‌بندی کرد (۲۷).

### نتایج و بحث

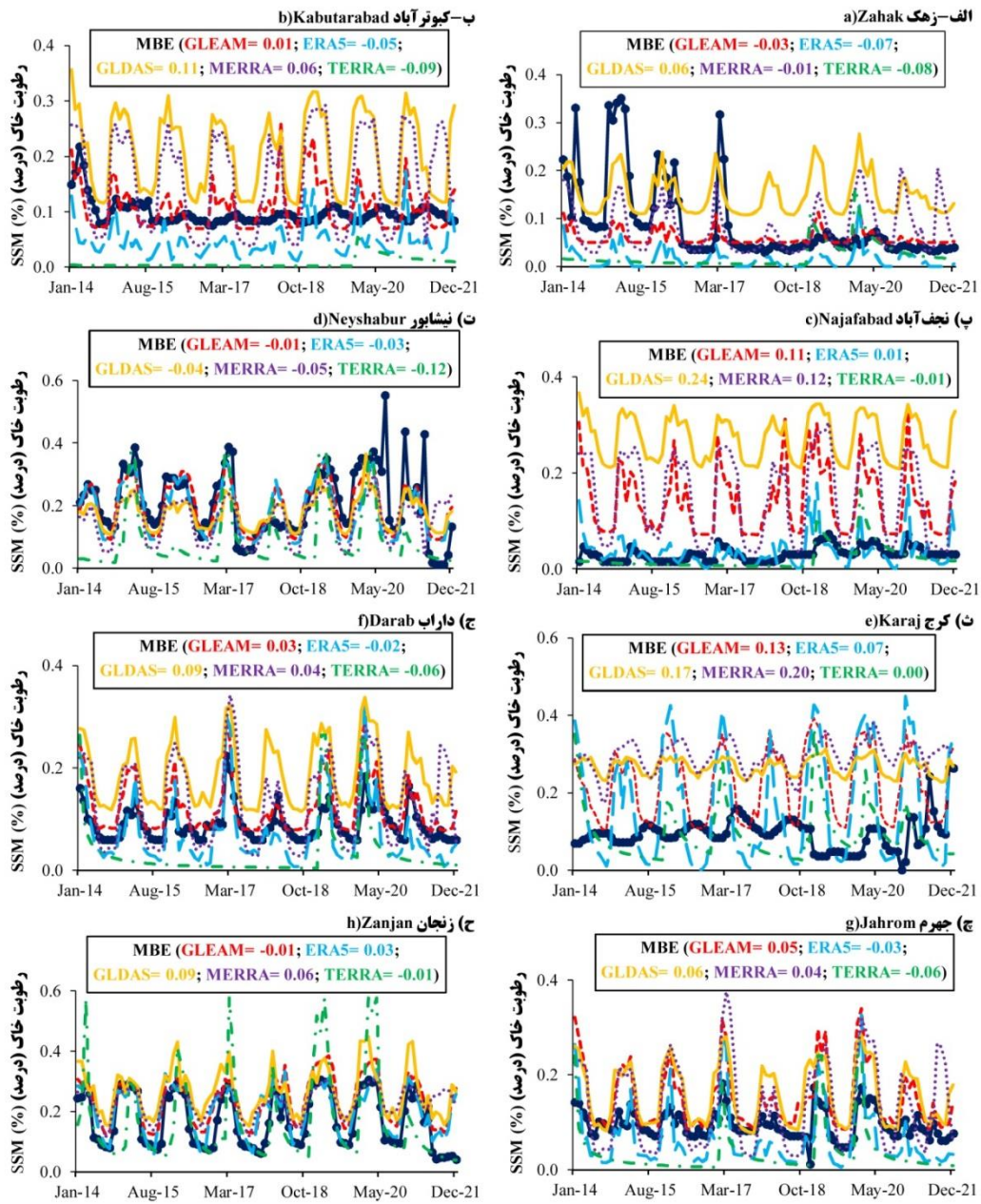
ارزیابی تغییرات ماهانه رطوبت در طول ماه‌های مختلف سال به لحاظ بررسی تغییرات آب قابل دسترس و محاسبه نیاز آبی ماهانه گیاهان از اهمیت بسیاری برخوردار است. میانگین مقادیر رطوبت خاک سطحی در ۱۲ ماه مختلف سال برای دوره ۲۰۱۴-۲۰۲۱، به تفکیک ایستگاه‌های مورد بررسی در شکل ۳ رسم شده است.

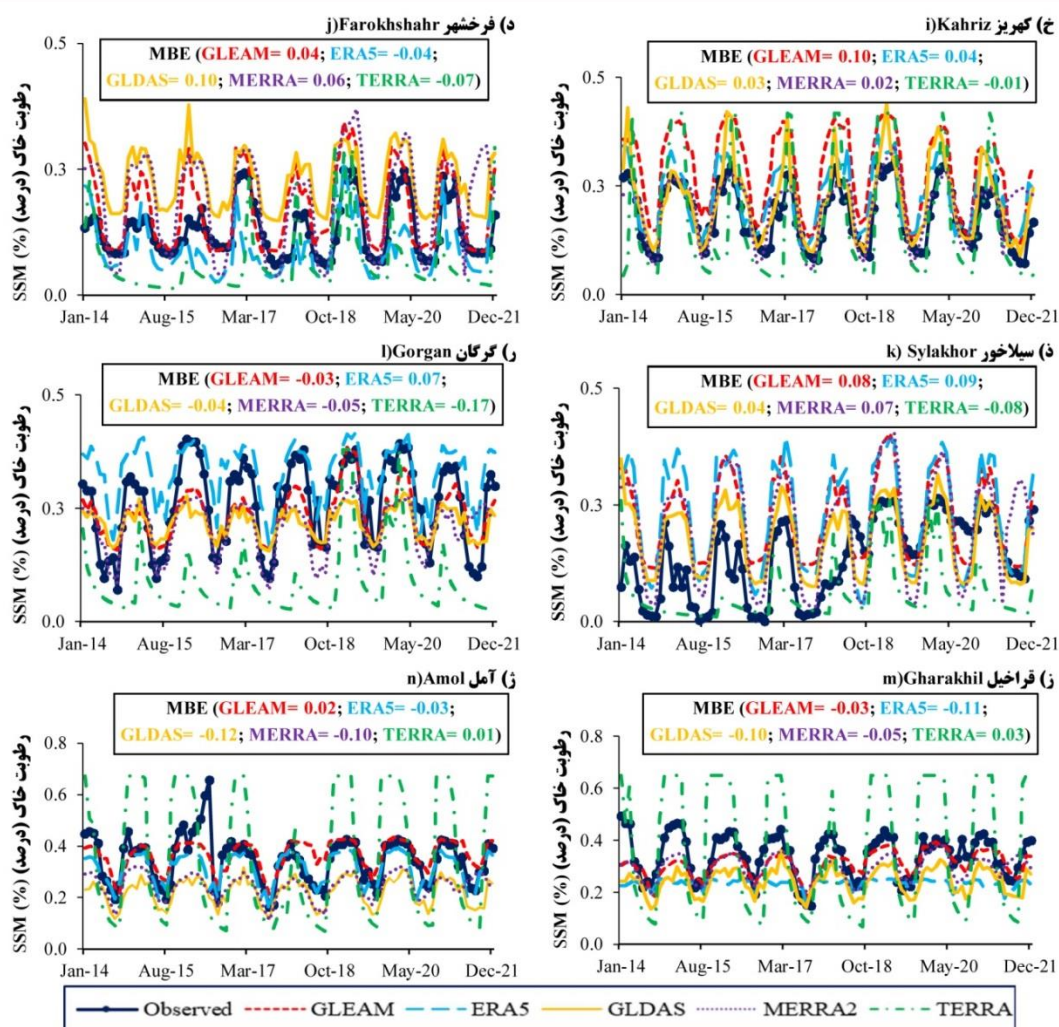
روند تغییرات میانگین رطوبت خاک سطحی طی ماه‌های مختلف سال با توجه به پارامترهای مؤثر روی

رطوبت خاک سطحی در ایستگاه‌های مورد مطالعه، تغییرات سری زمانی مقادیر اندازه‌گیری شده و پایگاه‌های مورد بررسی به همراه مقدار میانگین خطای اریبی (MBE) هر پایگاه در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳- تغییرات میانگین ماهانه رطوبت خاک سطحی اندازه‌گیری شده و پایگاه‌های مورد بررسی طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۱۴.  
 Figure 3. Measure and products monthly mean surface soil moisture variability during 2014-2021.



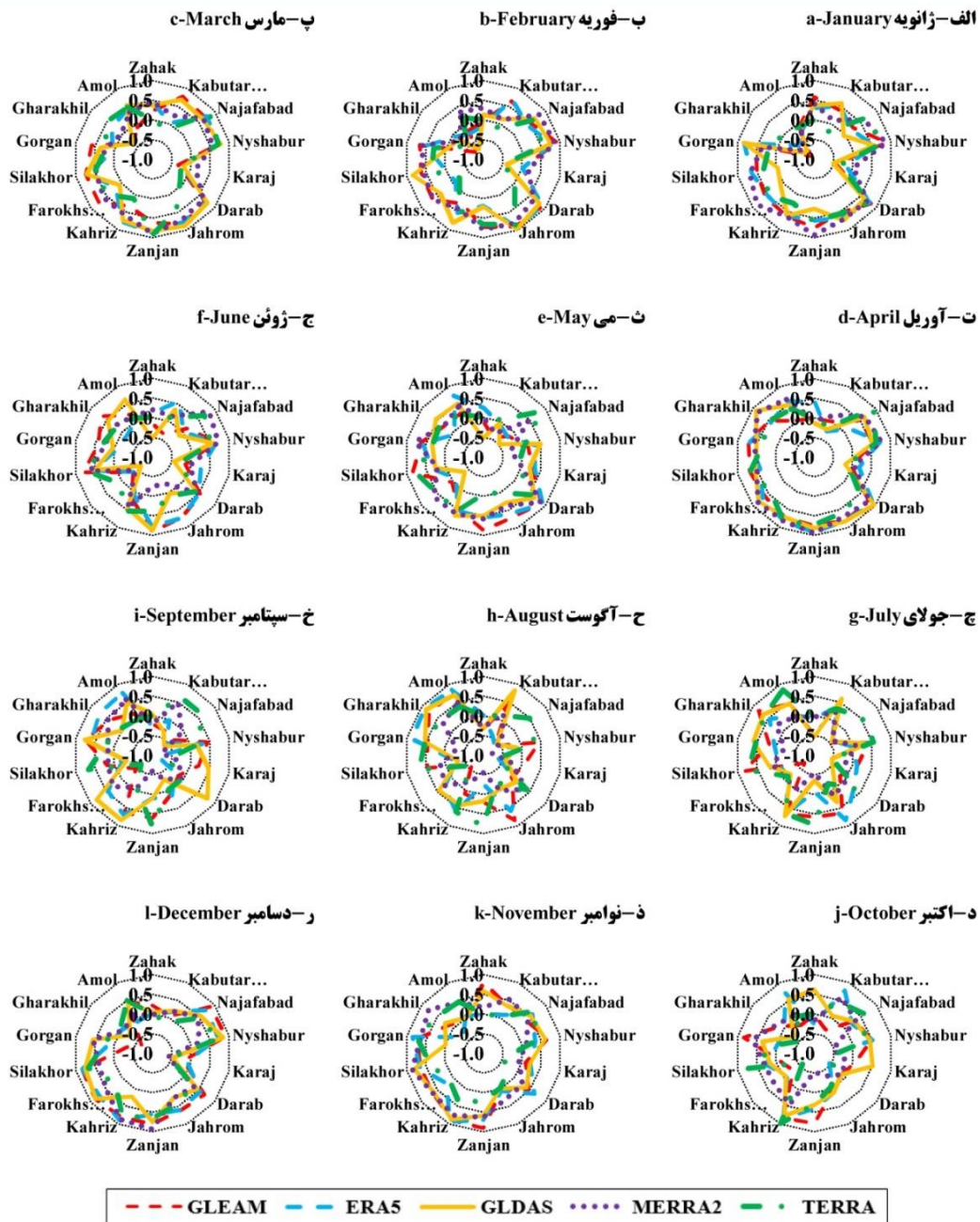


شکل ۴- تغییرات ماهانه رطوبت خاک سطحی اندازه‌گیری‌شده و میانگین خطای ارزیابی پایگاه‌های مورد بررسی طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۱۴.

Figure 4. Measure monthly surface soil moisture and MBE of products during 2014-2021.

نیمه‌مرطوب (گرگان، قراخیل و آمل) دارد. شکل ۴ نشان می‌دهد که پایگاه GLDAS با محدوده برابر با  $[-0.12 \sim +0.24]$  بیش‌ترین تغییرات MBE و پایگاه GLEAM با محدوده برابر با  $[-0.03 \sim +0.13]$  کم‌ترین تغییرات MBE را در بین پایگاه‌های مورد بررسی دارند. شکل ۵، مقادیر ضریب همبستگی پیرسون بین داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری‌شده و مقادیر پایگاه‌ها را برای ۱۲ ماه مختلف سال طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۱۴ نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۴، کم‌ترین و بیش‌ترین مقادیر MBE مربوط به پایگاه‌های TERRA و GLDAS در ایستگاه‌های گرگان (شکل ۴ ر) و نجف‌آباد (شکل ۴ پ) و به ترتیب  $-0.17$  و  $0.24$  است. بر اساس معیار MBE، پایگاه TERRA در ۱۱ تا از ۱۴ ایستگاه مورد بررسی و پایگاه GLDAS در ۴ تا از ۱۴ پایگاه دارای کم‌برآورد ( $MBE < 0$ ) می‌باشند. شکل ۴ ب به طور کلی بیانگر کم‌برآورد رطوبت خاک اکثر پایگاه‌ها در ایستگاه‌های اقلیم مرطوب و



شکل ۵- مقادیر ضریب همبستگی پیرسون پایگاه‌های مورد بررسی برای متغیر رطوبت خاک سطحی به تفکیک ماه‌های مختلف.

Figure 5. The Pearson correlation coefficient of studied products for SSM in separate of month.

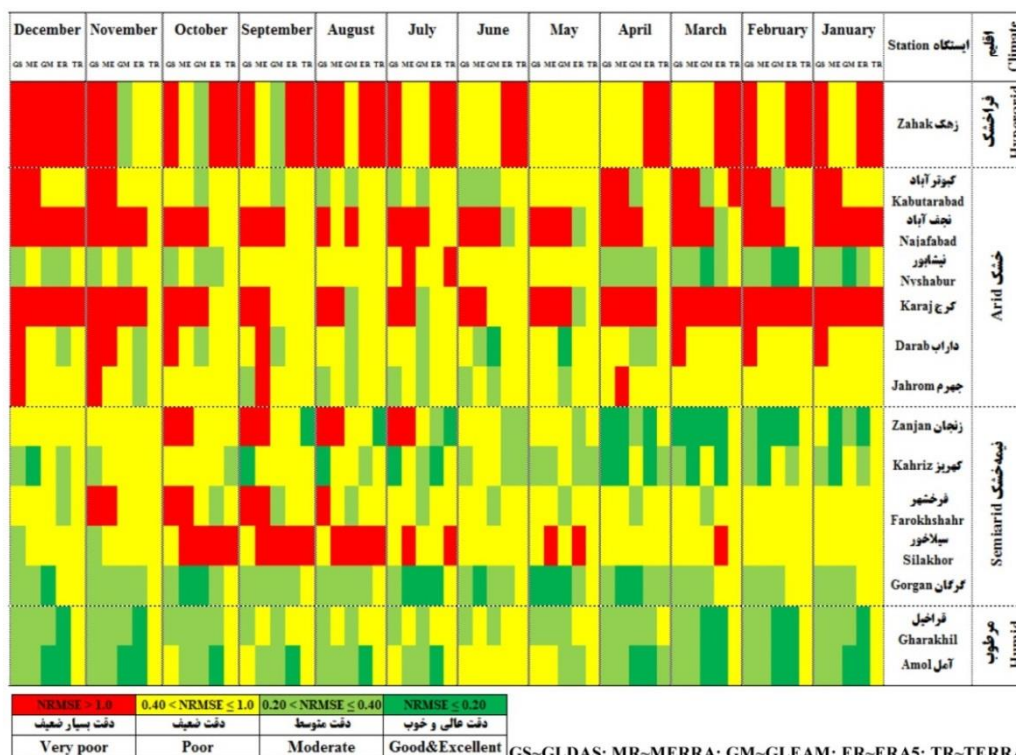
شکل ۵ (الف تا ر) نشان می‌دهد که در هر یک از ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن، جولای، آگوست، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر به ترتیب پایگاه‌های MERRA2، MERRA2، GLEAM، GLDAS، TERRA، TERRA، GLEAM و GLEAM با میانگین ضریب همبستگی برابر با ۰/۴۳، ۰/۴۹، ۰/۴۸، ۰/۵۹، ۰/۳۴، ۰/۳۰، ۰/۳۶، ۰/۲۴، ۰/۲۰، ۰/۲۶، ۰/۴۸ و ۰/۴۳ بیش‌ترین همبستگی را با داده‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک

شکل ۵ (الف تا ر) نشان می‌دهد که در هر یک از ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن، جولای، آگوست، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر به ترتیب پایگاه‌های MERRA2، MERRA2، GLEAM، GLDAS، TERRA، TERRA، GLEAM و GLEAM با میانگین ضریب همبستگی برابر با ۰/۴۳، ۰/۴۹، ۰/۴۸، ۰/۵۹، ۰/۳۴، ۰/۳۰، ۰/۳۶، ۰/۲۴، ۰/۲۰، ۰/۲۶، ۰/۴۸ و ۰/۴۳ بیش‌ترین همبستگی را با داده‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک



ضریب همبستگی مربوط به ایستگاه‌های کهریز و زهک به ترتیب برابر با ۰/۵۵ و ۰/۰۴ است. در شکل ۶، مقادیر NRMSE به تفکیک ماه‌ها و ایستگاه‌های مورد بررسی نشان داده شده است.

داشته‌اند. در بین فصول سال، بیش‌ترین همبستگی در فصل بهار، ماه آوریل برابر ۰/۵۱ (شکل ۵ ت)، و کم‌ترین همبستگی در فصل تابستان، ماه سپتامبر برابر ۰/۱۱ (شکل ۵ خ) به‌دست آمده است. در بین ۱۴ ایستگاه مورد بررسی، بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر



شکل ۶- مقادیر RMSE نرمال‌شده به تفکیک پایگاه‌ها و ماه‌های مختلف در ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی.

Figure 6. The NRMSE of products and months for weather agricultural stations.

در فصل بهار (ماه ژوئن برابر ۰/۶۹) و کم‌ترین دقت در ماه‌های فصل پاییز (ماه نوامبر برابر ۱/۱۰) به دست آمده است. با توجه به شکل ۶، از مقایسه کلی دقت پایگاه‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که به‌طور میانگین، بیش‌ترین دقت مربوط به پایگاه ERA5 به‌خصوص در اقلیم مرطوب با NRMSE برابر ۰/۲۹ می‌باشد. در کنار آن کم‌ترین دقت در بین پایگاه‌های مورد بررسی مربوط به پایگاه GLDAS و به‌ویژه در اقلیم خشک با NRMSE برابر ۲/۱۶ است.

در شکل ۶، مقادیر NRMSE در چهار دسته با دقت عالی و خوب، متوسط، ضعیف و بسیار ضعیف و به ترتیب با رنگ‌های سبز تا قرمز نشان داده شده است. به‌طورکلی، دقت پایگاه‌های مختلف از اقلیم فراهشک به مرطوب افزایش می‌یابد به‌طوری‌که میانگین مقدار NRMSE در ایستگاه زهک از ۰/۹۶ به ۰/۳۴ در ایستگاه آمل کاهش پیدا می‌کند. کم‌ترین و بیش‌ترین مقادیر NRMSE در ایستگاه‌های گرگان و نجف‌آباد، به ترتیب برابر با ۰/۳۱ و ۳/۳۲ محاسبه شده است. از نظر زمانی نیز بیش‌ترین دقت در ماه‌های

### نتیجه‌گیری کلی

هدف از مقاله حاضر ارزیابی دقت پایگاه‌های جهانی برای متغیر رطوبت خاک سطحی در اقلیم‌های مختلف ایران است. در این راستا از داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک سطحی (عمق ۱۰ سانتی‌متری) در ۱۴ ایستگاه هواشناسی کشاورزی و داده‌های رطوبت خاک ۵ پایگاه TERRA، ERA5، GLEAM، MERRA2 و GLDAS طی سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۱۴ با مقیاس زمانی ماهانه استفاده شده است. به‌منظور ارزیابی دقت داده‌های پایگاه‌ها از سه معیارها آماری شامل ضریب همبستگی پیرسون ( $r$ )، میانگین خطای اریبی (MBE) و خطای جذر میانگین مربعات نرمال‌شده (NRMSE) استفاده شده است. نتایج بیانگر همبستگی بیش‌تر پایگاه GLEAM با داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک سطحی به‌خصوص در ماه‌های می، ژوئن، نوامبر و دسامبر دارد. هم‌چنین پایگاه MERRA2 که در پژوهش‌ها و همکاران (۲۰۲۱) به‌عنوان پایگاه برتر معرفی شده است، در ماه‌های ژانویه، فوریه و آوریل دارای همبستگی بالاتری با داده‌های اندازه‌گیری شده در مقایسه با سایر پایگاه‌های مورد مطالعه است. در پژوهش‌ها و همکاران (۲۰۲۱) عدم قطعیت کم‌تر پایگاه‌های مدل‌مبنا در مقایسه با پایگاه‌های ماهواره‌مبنا مشخص شد که عدم قطعیت بیش‌تر پایگاه GLDAS در پژوهش حاضر تأییدکننده نتایج پژوهش (۸) است. نتایج پژوهش حاضر بیانگر دقت بیش‌تر پایگاه‌ها در ایستگاه‌های دارای اقلیم مرطوب به‌خصوص نواحی شمالی و شمال‌غربی کشور است که با نتایج اسعدی اسکویی و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد. با توجه به چالش‌هایی مانند هزینه‌بر بودن و عدم کیفیت داده‌های اندازه‌گیری شده (ناقص بودن، دوره آماری کوتاه‌مدت،

پراکنش مکانی نامناسب) برای متغیر رطوبت خاک، استفاده از پایگاه‌های جهانی می‌تواند جایگزین مناسبی برای داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک باشد. انجام این پژوهش می‌تواند در راستای انتخاب صحیح پایگاه داده با دقت مناسب برای رطوبت خاک به پژوهش‌گران کمک شایانی انجام دهد.

### تقدیر و تشکر

این مقاله با همکاری سازمان هواشناسی کشور انجام شده است. نویسندگان از دانشگاه اراک که امکانات انجام این پژوهش را فراهم نموده‌اند تشکر می‌نمایند. هم‌چنین از داوران محترم این مقاله که با نظرات خود موجب بهبود مقاله شده‌اند، تقدیر و تشکر می‌شود.

### داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

داده‌های این پژوهش مربوط به پایان‌نامه فوق‌لیسانس نویسنده اول است که با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل دسترسی می‌باشند.

### تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

### مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این مقاله به‌صورت، نویسنده اول: دانلود و آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات و تهیه نسخه اولیه مقاله، نویسنده دوم: طرح تحقیق و روش‌شناسی، انجام آنالیزها و اصلاح و نهایی‌سازی مقاله، و نویسنده سوم: نظارت تحقیق، مشارکت در آنالیزها و بازبینی مقاله است.

## اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.

## حمایت مالی

این پژوهش از حمایت مستقیم مالی برخوردار نبوده است ولی از امکانات دانشگاه اراک استفاده شده است.

## منابع

1. Hosseini-Moghari, S. M., Araghinejad, S., Ebrahimi, K., & Tourian, M. J. (2019). Introducing modified total storage deficit index (MTSDI) for drought monitoring using GRACE observations. *Ecological indicators*, 101, 465-475.
2. Zhang, X., Hao, Z., Singh, V. P., Zhang, Y., Feng, S., Xu, Y., & Hao, F. (2022). Drought propagation under global warming: Characteristics, approaches, processes, and controlling factors. *Science of The Total Environment*, 838, 156021.
3. Zhou, Z., Shi, H., Fu, Q., Ding, Y., Li, T., & Liu, S. (2021). Investigating the propagation from meteorological to hydrological drought by introducing the nonlinear dependence with directed information transfer index. *Water Resources Research*, 57, 8.
4. An, R., Zhang, L., Wang, Z., Quaye-Ballard, J.A., You, J., Shen, X., Gao, W., Huang, L., Zhao, Y., & Ke, Z. (2016). Validation of the ESA CCI soil moisture product in China. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 48, 28-36.
5. Bi, H., Ma, J., Zheng, W., & Zeng, J. (2016). Comparison of soil moisture in GLDAS model simulations and in situ observations over the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121 (6), 2658-2678.
6. Li, M., Wu, P., & Ma, Z. (2020). A comprehensive evaluation of soil moisture and soil temperature from third-generation atmospheric and land reanalysis data sets. *International Journal of Climatology*, 40 (13), 5744-5766.
7. Xu, L., Chen, N., Zhang, X., Moradkhani, H., Zhang, C., and Hu, C. (2021). In-situ and triple-collocation based evaluations of eight global root zone soil moisture products. *Remote Sensing of Environment*, 254, p. 112248.
8. Liu, J., Chai, L., Dong, J., Zheng, D., Wigneron, J.P., Liu, S., Zhou, J., Xu, T., Yang, S., Song, Y., & Qu, Y. (2021). Uncertainty analysis of eleven multisource soil moisture products in the third pole environment based on the three-corned hat method. *Remote sensing of environment*, 255, 112225.
9. Li, L., Liu, Y., Zhu, Q., Liao, K., & Lai, X. (2022). Evaluation of nine major satellite soil moisture products in a typical subtropical monsoon region with complex land surface characteristics. *International Soil and Water Conservation Research*, 10 (3), 518-529.
10. Fan, L., Xing, Z., De Lannoy, G., Frappart, F., Peng, J., Zeng, J., Li, X., Yang, K., Zhao, T., Shi, J., & Ma, H. (2022). Evaluation of satellite and reanalysis estimates of surface and root-zone soil moisture in croplands of Jiangsu Province, China. *Remote Sensing of Environment*, 282, p. 113283.
11. Jamei, M., Baygi, M.M., Alizadeh, A., & Irannejad, P. (2017). Validation of soil moisture retrievals from SMOS microwave satellite. *J Water Soil*, 31 (2), 660-672. [In Persian]
12. Asadi Oskouei, E., Godarzy, L., & Helali, J. (2022). Introducing the SMAP L4 Products and Investigating the Spatio-Temporal Variability of Soil Moisture in Iran. *Nivar*, 46 (116), 13-25. [In Persian]
13. Motiee, H., Abdeh Kolahchi, A., & Aminian, R. (2022). Assessment of soil moisture using remote sensing ECV Database and its correlation with dust events-South and West of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (7), 1531-1544. [In Persian]
14. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-

- Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300 (9), 5109.
15. Tsiros, I. X., Nastos, P., Proutsos, N. D., & Tsaousidis, A. (2020). Variability of the aridity index and related drought parameters in Greece using climatological data over the last century (1900–1997). *Atmospheric Research*, 240, 104914.
  16. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (1979). Map of the world distribution of arid regions: map at scale 1:25,000,000 with explanatory note, *MAB Technical Notes* 7. UNESCO, Paris, 56.
  17. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 146 (730), 1999-2049.
  18. Martens, B., Miralles, D. G., Lievens, H., Van Der Schalie, R., De Jeu, R. A., Fernández-Prieto, D., ... & Verhoest, N. E. (2017). GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geoscientific Model Development*, 10 (5), 1903-1925.
  19. Miralles, D. G., Holmes, T. R. H., De Jeu, R. A. M., Gash, J. H., Meesters, A. G. C. A., & Dolman, A. J. (2011). Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 (2), 453-469.
  20. Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U. E. A., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C. J., ... & Toll, D. (2004). The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological society*, 85 (3), 381-394.
  21. Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., ... & Zhao, B. (2017). The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of climate*, 30 (14), 5419-5454.
  22. Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., ... & Woollen, J. (2011). MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of climate*, 24 (14), 3624-3648.
  23. Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Scientific data*, 5 (1), 1-12.
  24. Xu, L., Chen, N., Zhang, X., Moradkhani, H., Zhang, C., & Hu, C. (2021). In-situ and triple-collocation based evaluations of eight global root zone soil moisture products. *Remote Sensing of Environment*, 254, p. 112248.
  25. Zhang, M., Yuan, X., & Otkin, J.A. (2020). Remote sensing of the impact of flash drought events on terrestrial carbon dynamics over China. *Carbon Balance and Management*, 15 (1), 1-11.
  26. Ji, Y., Li, Y., Yao, N., Biswas, A., Chen, X., Li, L., Pulatov, A., & Liu, F. (2022). Multivariate global agricultural drought frequency analysis using kernel density estimation. *Ecological Engineering*, 177, p. 106550.
  27. Li, M. F., Tang, X. P., Wu, W., & Liu, H. B. (2013). General models for estimating daily global solar radiation for different solar radiation zones in mainland China. *Energy Conversion and Management*. 70, 139-148.