



Evaluating the Performance of CMIP6 Models in Simulating and Projecting Surface Soil Moisture Under Climate Change Scenarios: A Case Study of Qazvin Province

Mansoureh Kouhi*¹ , Ebrahim Asadi Oskouei² , Fatemeh Abbasi¹ 

¹ Applied Climatological Research Group, Faculty of Climate Research Institute, RIMAS, Mashhad, Iran.

² Climate Disaster and Climate Change Research Group, Faculty of Climate Research Institute, RIMAS, Mashhad, Iran.

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	<p>Objective: Soil moisture is considered one of the key variables in the water cycle, playing a significant role in agricultural production and climate dynamics. Accurate estimation and projection of this, especially in semi-arid regions like Qazvin province, which lacks an extensive field monitoring network, is of high importance for water resource management. Given the increasing impact of climate change, the study aims to evaluate the capability of two selected models from the CMIP6 models, including ACCESS-CM2 and MPI-ESM1-2-LR, in simulating soil surface moisture under two Shared Socioeconomic Pathways (SSP5-8.5, SSP1-2.6). This study fills an important gap in the field of projecting this variable in Qazvin province.</p> <p>Materials and Methods: In this study, monthly surface soil moisture data (0 to 7 cm depth) from the ERA5-Land reanalysis database were used for the baseline period (1985-2014). The output of two selected CMIP6 climate models was bias-corrected using the linear scaling (LS) method. To evaluate the models' performance, the statistical indices RMSE, MAE, and Pearson's correlation coefficient were used. Climate projections for the near future (2021-2040) were also carried out under the two SSP scenarios, and spatial-temporal analysis was performed on them.</p> <p>Results and Discussion: Examining the spatial distribution pattern of surface soil moisture in Qazvin province based on ERA5-land data showed that the highest amount of soil moisture is present from January to April and from October to December. The lowest values were related to the central and southeastern regions of the province. After bias correction, the output of both models became closer to the observation. The ACCESS model performed better than the MPI model in displaying spatial patterns, especially in mountainous areas. The predictive results showed that in the optimistic scenario (SSP1-2.6), surface soil moisture will increase in winter, but a decrease or slight change was observed in summer. In the pessimistic scenario (SSP5-8.5), a more severe decline was observed in the summer and early autumn (a decrease of up to 35%). The most significant decrease was observed in October.</p> <p>Conclusion: The results showed that soil moisture in warmer months will decrease due to climate change, potentially affecting irrigation management, drought monitoring, and agricultural crop yields. Among the main limitations of this research was the lack of field data in Qazvin province. Using downscaled data alongside remote sensing sources and employing machine learning methods can increase the accuracy of projections.</p>
Article history: Received: 22July2025	
Revised: 27October2025	
Accepted: 11November2025	
Published online: 29March2025	
Keywords: Soil Moisture CMIP6 Reanalysis ERA5-land	

* Corresponding author, E-mail: ma.kouhi@alumni.um.ac.ir

Cite this article: Kouhi, Mansoureh., Asadi Oskouei, Ebrahim & Abbasi, Fatemeh (2026). Title of paper in lower case letters (except for initial letter of first word, initial of first word after a colon, and proper nouns). Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment. <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.536321.1169>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.536321.1169>

Publisher: Gonbad Kavous University.



ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی و پیش‌بینی رطوبت خاک سطحی تحت سناریوهای تغییر اقلیم: مطالعه موردی استان قزوین

منصوره کوهی^{۱*}، ابراهیم اسعدی اسکویی^۲، فاطمه عباسی^۱

^۱ گروه اقلیم شناسی کاربردی، پژوهشکده اقلیم شناسی و تغییر اقلیم (پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو)، مشهد، ایران. رایانامه:

^۲ گروه مخاطرات اقلیمی و تغییر اقلیم، پژوهشکده اقلیم شناسی و تغییر اقلیم (پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو)، مشهد، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: رطوبت خاک یکی از متغیرهای کلیدی چرخه آب محسوب می‌شود که نقش مهمی در تولیدات کشاورزی و پویایی اقلیم ایفا می‌کند. برآورد دقیق و پیش‌نگری آن به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک مانند استان قزوین، که فاقد شبکه پایش میدانی گسترده است، اهمیت بالایی برای مدیریت منابع آب دارد. با توجه به تأثیر روزافزون تغییر اقلیم، هدف پژوهش حاضر، ارزیابی توانمندی دو مدل منتخب از مدل‌های اقلیمی CMIP6 شامل ACCESS-CM2 و MPI-ESM1-2-LR در شبیه‌سازی رطوبت سطحی خاک تحت دو سناریوی مشترک اقتصادی-اجتماعی (SSP5-8.5, SSP1-2.6) است. این مطالعه خلأ مهمی را در زمینه پیش‌نگری این متغیر در استان قزوین پوشش می‌دهد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱	مواد و روش‌ها: در این تحقیق از داده‌های ماهانه رطوبت خاک سطحی (عمق ۰ تا ۷ سانتی‌متر) بانک داده بازتحلیل ERA5-Land برای دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) استفاده شد. خروجی دو مدل اقلیمی CMIP6 منتخب انتخاب و اصلاح اریبی با روش نسبت‌گیری خطی (LS) انجام شد. برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از شاخص‌های آماری RMSE، MAE و ضریب همبستگی پیرسون استفاده گردید. همچنین پیش‌نگری‌های اقلیمی برای دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) تحت دو سناریوی مذکور انجام و تحلیل مکانی-زمانی روی آن‌ها صورت گرفت.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵	نتایج و بحث: بررسی الگوی توزیع مکانی رطوبت خاک در استان قزوین بر اساس داده‌های ERA5-Land نشان داد بیشترین مقدار رطوبت خاک در ماه‌های ژانویه تا آوریل و اکتبر تا دسامبر وجود دارد. کمترین مقادیر به مناطق مرکزی و جنوب شرقی استان مربوط بود. پس از اصلاح اریبی، خروجی هر دو مدل به واقعیت نزدیک‌تر شد. مدل ACCESS در نمایش الگوی مکانی، به‌ویژه در مناطق کوهستانی، عملکرد بهتری نسبت به مدل MPI داشت. نتایج پیش‌نگری نشان داد که در سناریوی خوشبینانه، مقدار رطوبت خاک در فصل زمستان افزایش خواهد یافت، اما در تابستان کاهش یا تغییر اندکی مشاهده شد. در سناریوی بدبینانه، کاهش شدیدتری در فصل تابستان و اوایل پاییز مشاهده شد (کاهش تا ۳۵٪). بیشترین کاهش در ماه اکتبر مشاهده گردید.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰	نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که رطوبت خاک در ماه‌های گرم تحت تأثیر تغییر اقلیم کاهش خواهد یافت که این موضوع می‌تواند بر مدیریت آبیاری، پایش خشکسالی و عملکرد محصولات کشاورزی اثرگذار باشد. از جمله محدودیت‌های اصلی این پژوهش، نبود داده‌های میدانی در استان قزوین بود. استفاده از داده‌های ریزمقیاس شده در کنار منابع سنجش از دور و همچنین بهره‌گیری از روش‌های یادگیری ماشین می‌تواند دقت پیش‌نگری‌ها را افزایش دهد.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۹	
کلیدواژه‌ها: رطوبت خاک بازتحلیل ERA5-Land CMIP6	

*نویسنده مسئول، Email: ma.kouhi@almuni.um.ac.ir

استناد: کوهی، منصوره؛ اسعدی اسکویی، ابراهیم؛ عباسی، فاطمه. (۱۴۰۵). ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی و پیش‌بینی رطوبت خاک سطحی

تحت سناریوهای تغییر اقلیم: مطالعه موردی استان قزوین. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*

<http://doi.org/10.22034/nawee.2025.536321.1169>

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.



مقدمه

رطوبت خاک به عنوان متغیری پویا در مکان و زمان، یکی از عوامل اصلی اثرگذار در چرخه آب در طبیعت و تولید محصولات کشاورزی محسوب می‌شود. بنابراین برآورد دقیق آن برای مدیریت بهینه منابع آب در بخش کشاورزی حائز اهمیت است (شکری و همکاران، ۱۴۰۱). داده‌های رطوبت خاک اهمیت شایانی در کاربردهای گوناگون همچون هیدرولوژی، کشاورزی (El Hajj et al., 2018)، اقلیم‌شناسی و هواشناسی، علوم خاک، اکولوژی جنگلداری، زراعت، مهندسی منابع آب (Mekonnen, 2009) دارد.

تاکنون شاخص‌های هواشناسی و هواشناسی کشاورزی متعددی از جمله متغیر اقلیمی بارش و یا محاسبه نمایه‌های خشکسالی جهت تعیین رطوبت موجود در خاک ارائه شده است که عمدتاً مبتنی بر اندازه‌گیری‌های میدانی و مستقیم می‌باشد. استفاده از این روش‌ها در مقیاس گسترده علاوه بر اینکه کاری بسیار دشوار، پرهزینه و وقت‌گیر است برای دوره‌های طولانی مدت قابل اجرا نمی‌باشد (اسعدی اسکویی و جامعی، ۱۴۰۰). بنابراین در پهنه جغرافیایی ایران، شبکه سراسری پایش رطوبت خاک وجود نداشته و اندازه‌گیری‌ها محدود به ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی سازمان هواشناسی کشور است. این سازمان، در مجموع دارای ۴۵ ایستگاه هواشناسی کشاورزی در سراسر کشور است که در بیشتر آنها داده‌های رطوبت خاک برای دوره‌های طولانی مدت و به صورت کامل وجود ندارد. همچنین پراکنش جغرافیایی و اقلیمی این ایستگاه‌ها در کشور نامنظم بوده و حتی بعضی از استان‌ها مانند استان قزوین، فاقد ایستگاه اندازه‌گیری این متغیر می‌باشند. از این رو در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی مبتنی بر داده‌های شبکه‌ای بازتحلیل و مدل‌های اقلیمی برای برآورد و مدل‌سازی رطوبت خاک توسعه داده شده است.

برای رطوبت خاک سه مجموعه داده بازتحلیل شامل داده‌های بازتحلیل مرکز پیش‌بینی میان‌مدت وضع هوای اروپا (ERA-5) (ECMWF Interim) و بازتحلیل اخیر آن (ERA5)، ریزمقیاس شده ERA5 با نام ERA5-land، و سامانه ترکیبی داده‌های جهانی زمین نوح (GLDAS-NOAH 2.0) وجود دارد که در پژوهش‌های زیادی به طور گسترده‌ای ارزیابی شده‌اند (Cheng et al. 2019, Deng et al., 2020, Wu et al. 2021).

ECMWF به دلیل بهبود عملکرد محاسباتی در سال‌های اخیر، مجموعه داده‌های جهانی دقیق‌تری نسبت به هر زمان دیگری تولید کرده است. دو محصول قبلی ECMWF، شامل ERA-Interim و ERA5 هستند که داده‌های رطوبت خاک را از مشاهدات ایستگاهی شبکه جهانی همدید ارایه می‌کنند (Hersbach et al. 2020). وضوح مکانی ERA5 و ERA-Interim هر دو برابر با 0.25° در 0.25° است و رطوبت خاک را در چهار لایه عمودی به ترتیب در محدوده‌های $0-7$ ، $7-28$ ، $28-100$ و $100-289$ سانتی‌متر بر حسب $m^3 \cdot m^{-3}$ تولید می‌کنند. پیشرفته‌ترین مجموعه داده ECMWF، مجموعه داده ERA5-Land است (Muñoz-Sabater et al., 2021). ERA5-Land دارای یک مجموعه داده رطوبت سطحی خاک ماهانه با قدرت تفکیک بالا حدود $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ وضوح افقی برای دوره ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۴ می‌باشد و رطوبت سطحی خاک در این بانک داده، مربوط به لایه $0-7$ سانتی‌متری است. اگرچه بر اساس مطالعات انجام شده داده‌های بازتحلیل رطوبت خاک به دلیل تأثیر طرحواره‌های مختلف جذب و مدل‌های سطح زمین که در شرایط کمبود مشاهدات قرار دارند دارای عدم قطعیت می‌باشند اما پایگاه داده ERA5-Land از اعتبار بالایی برخوردار است (Muñoz-Sabater et al., 2021). نتایج بررسی توانمندی ERA5-Land برای رطوبت خاک نشان داده است که این پایگاه داده در یک مقایسه جهانی بین ۱۸ محصول رطوبت خاک با تعداد زیادی ایستگاه مشاهداتی (۸۲۶ ایستگاه) عملکرد قوی دارد (Beck et al., 2021).

با توجه به تغییر اقلیم و افزایش فراوانی پدیده‌های فرین مانند خشکسالی و سیلاب‌ها، پیش‌نگری دقیق رطوبت خاک برای دوره‌های آینده از اهمیت بالایی برخوردار است. مدل‌های فاز ششم ارزیابی متقابل مدل‌های جفت شده جو - اقیانوس یا CMIP6 به‌عنوان آخرین نسل از مدل‌های اقلیمی، ابزارهای قدرتمندی برای شبیه‌سازی و پیش‌نگری رطوبت خاک تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم ارائه می‌دهند. Eyring و همکارانش در سال ۲۰۱۶ به بازنگری طراحی آزمایشات و سازمان‌های فاز ۶ پروژه یکسان سازی مدل‌های جفت شده (CMIP6) پرداختند. بواسطه طراحی و توزیع شبیه‌سازی مدل‌های اقلیم جهانی در اقلیم گذشته، حال و آینده، پروژه ارزیابی مدل‌های جفت شده (CMIP6) به یکی از عناصر پایه در دانش اقلیم تبدیل شده است. فاز ششم پروژه ارزیابی متقابل مدل‌های جفت شده (CMIP6)، محصولات رطوبت خاک (SM) را برای دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) و دوره آتی (۲۰۱۵-۲۱۰۰)، به منظور مطالعه وضعیت رطوبت خاک در اختیار پژوهشگران قرار داده است. این محصولات شامل رطوبت خاک نزدیک سطح (۰-۱۰ cm) از ۴۰ مدل و رطوبت نزدیک ریشه (۰-۱۰۰ cm) برای ۲۵ مدل

1. Coupled Model Intercomparison Project Phase

2. Soil Moisture

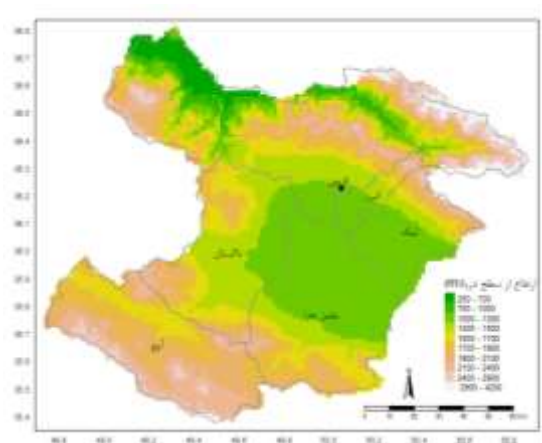
می‌باشد. در زمینه پیش‌نگری‌های اقلیمی، Grose و همکاران (۲۰۲۰) افق تغییرات اقلیمی استرالیا را بر اساس سناریوهای CMIP6 بررسی نمودند. نتایج نشان داد مدل‌های CMIP6 پیشرفت قابل ملاحظه‌ای را در شبیه‌سازی اقلیم در منطقه استرالیا داشته است. Jiang و همکاران (۲۰۲۰) تغییرات آبی بارش در آسیای میانه بر اساس پیش‌نگری‌های CMIP6 مورد بررسی قرار دادند. Almazroui و همکاران (۲۰۲۰) به پیش‌نگری تغییرات فرین‌های گرم و خشک، و مرطوب در کشورهای جنوب آسیا بر اساس فاز CMIP6 پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که تحت پدیده گرمایش جهانی فرین‌های دمایی به شکل قابل توجهی افزایش خواهند یافت. Zou و همکاران (۲۰۲۳) حساسیت بارش به تغییرات رطوبت خاک (SM-P) را در چندین مدل اقلیمی جهانی CMIP6 در دو بخش تأثیر رطوبت خاک بر تبخیر-تعرق (SM-ET) و تأثیر تبخیر-تعرق بر بارش (ET-P) بررسی کردند. نتایج نشان داد بطور کلی، بدلیل تغییر اقلیم روند تبخیر-تعرق پتانسیل در آینده افزایش بیشتری یافته است. Qiao و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از داده‌های باز تحلیل ERA5، ERA-Interim، و GLDAS رطوبت خاک سطحی و عمیق را در شبیه‌سازی‌های CMIP6 ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مدل چند مدلی ترکیبی CMIP6 روشی مؤثرتر برای بازتولید توزیع فضایی و ویژگی‌های چرخه سالانه رطوبت خاک نسبت به بیشتر شبیه‌سازی‌های تک‌مدلی است. میانگین همادی چندمدلی CMIP6، شبیه‌سازی‌های قابل قبولی برای کل اقلیم، مراکز مرطوب و خشک، و نقاط اوج سالانه در فصل ذوب برف در عرض‌های میانی تا بالا و فصل بارش در عرض‌های پایین تولید می‌کند. قابلیت شبیه‌سازی رطوبت خاک سطحی به رابطه بین رطوبت خاک و اختلاف بارش و تبخیر (P-E) وابسته است. اگرچه اکثر مدل‌ها در نواحی که رطوبت خاک با P-E رابطه معناداری دارند (مانند اروپا، آسیا در عرض‌های پایین و نیم کره جنوبی) شبیه‌سازی‌های موثری را ارائه می‌دهند، اما بین مقادیر شبیه‌سازی شده و داده‌های بازتحلیل در ارتفاعات و عرض‌های جغرافیایی بالا (مثلاً سیبری و فلات تبت) اختلاف معناداری مشاهده می‌شود. در مناطقی که فرآیندهای فصل سرما نقش اصلی در نوسانات رطوبت خاک دارند. این اختلاف بدلیل کمبود اطلاعات ذوب برف و یخ‌زدگی در داده‌های بازتحلیل و ناتوانی مدل‌ها در شبیه‌سازی این فرآیندها است. همچنین در نواحی با خشکی بسیار زیاد، عملکرد مدل‌ها ضعیف است. در مقیاس جهانی، بیشتر مدل‌ها به دلیل کم بودن تغییرپذیری در رطوبت خاک عمیق و محدود بودن اطلاعات مشاهده‌ای در داده‌های بازتحلیل، شبیه‌سازی‌های قابل اعتمادی ارائه می‌دهند. در مطالعه‌ای دیگر، Zhu و همکاران (۲۰۲۳) ویژگی‌های بلندمدت رطوبت سطحی خاک و واکنش رطوبت خاک به متغیرهای اقلیمی را در منطقه فلات تبت بررسی کردند. آنها دو محصول ماهواره SSM/I (هنگ‌کننده‌های مایکروویو مخصوص حسگرهای ویژه) و ECV COMBINED (مجموع متغیرهای اقلیمی اساسی) و سه محصول بازتحلیل ERA5-Land، MERRA2، و GLDAS NAOH را با استفاده از داده‌های دو ایستگاه مشاهداتی در منطقه مقایسه و ارزیابی کردند. نتایج نشان داد محصول SSM/I و GLDAS NOAH نسبت به سایر محصولات رطوبت خاک، عملکرد بهتری دارند و پس از آن MERRA2 و ECV COMBINED قرار دارند. در مطالعه‌ای دیگر، ادغام داده‌های ۲۵ مدل سیستم زمین (ESM) با استفاده از روش یادگیری عمیق (DL) انجام شد. این مدل یادگیری عمیق همزمان توانست ادغام داده‌ها و کاهش مقیاس فضایی را انجام دهد و برای تجزیه و تحلیل روند آینده رطوبت خاک در چین استفاده شد. از طریق این مدل، داده‌های رطوبت خاک ماهانه در چهار سناریوی آینده (SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0، SSP5-8.5) از سال ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰، با وضوح بالا در ۰/۲۵ درجه، به دست آمد. وزیر و قهرمان (۱۴۰۲) در پژوهشی با استفاده از مدل برنامه‌ریزی منابع آب WEAP و خروجی‌مدل‌های اقلیمی KIOST-ESM و MPI-ESM1-2-LR تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل را با توجه به تغییر اقلیم احتمالی در چهار ایستگاه خرم‌آباد، بستان، اسلام‌آباد و اسدآباد واقع در حوضه کرخه طی دوره (۲۰۲۰-۲۱۰۰) مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج حاصله میزان تبخیر-تعرق پتانسیل تا سال ۲۱۰۰ میلادی روندی افزایشی نشان داد. بیشترین میزان افزایش پیش‌نگری شده در مدل MPI-ESM1-2-LR تحت سناریوی SSP5-8.5 به میزان ۸۹ میلی‌متر در ماه ژوئن و در مدل KIOST-ESM به میزان ۷۳ میلی‌متر در ماه بدست آمد. فخار و نظری (۱۴۰۳) به بررسی رطوبت خاک در اراضی کشاورزی و شوره‌زار دشت قزوین بر اساس اطلاعات دو سنجنده لندست-۸ و سنتینل-۲ پرداختند. نتایج نشان داد که مدل رگرسیونی رطوبت خاک حاصل از شاخص دمای سطح زمین LST و NDTI سنجنده لندست-۸ با مقدار ضریب تعیین ۰/۸۱ و درصد اریبی ۰/۲۷ بیش‌ترین دقت را داشته است. این مطالعه نشان داد استفاده از مدل‌های رطوبت خاک بر اساس سنجش از دور می‌تواند جایگزین مناسب و مقرون به صرفه‌ای در بررسی رطوبت خاک در اراضی مختلف باشد.

استان قزوین، با ویژگی‌های توپوگرافی متنوع و اقلیم نیمه‌خشک، به طور خاص در معرض مخاطرات جوی و اقلیمی قرار دارد. وجود دشت‌های حاصلخیز، مراکز صنعتی و منابع طبیعی حساس در این استان، لزوم پایش و پیش‌نگری رفتار متغیرهای اقلیمی همچون رطوبت خاک را دوچندان کرده است. بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات متعددی بر ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 در پیش‌نگری رطوبت خاک تحت سناریوهای SSP در مقیاس جهانی یا مناطق دیگر (مانند چین یا خاورمیانه) تمرکز داشته‌اند، اما تاکنون پژوهشی جامع بر پیش‌نگری رطوبت خاک با تمرکز بر استان قزوین ایران، با ادغام داده‌های CMIP6 و واسنجی آن با داده‌های مشاهداتی

ERA5-Land، انجام نشده است. نوآوری اصلی این پژوهش، توسعه یک چارچوب ترکیبی نوین برای پیش‌نگری رطوبت خاک با قدرت تفکیک بالا است که از طریق تصحیح اریبی مدل‌های CMIP6 با داده‌های رطوبت خاک ERA5-Land، دقت پیش‌بینی را در سطح محلی افزایش می‌دهد و آن را از مطالعات پیشین که عمدتاً بر پیش‌نگری‌های بلندمدت یا ارزیابی کلی مدل‌ها متمرکز بوده‌اند، متمایز می‌سازد. لذا هدف از این پژوهش، بررسی توانمندی مدل‌های منتخب CMIP6 در برآورد رطوبت خاک طی دوره پایه و پیش‌نگری میزان تغییرات آن طی دوره آینده نزدیک است. نتایج این مطالعه می‌تواند برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی منابع آب، به خصوص در حیطه کاربردهای کشاورزی و مطالعات تغییر اقلیم در آینده مؤثر باشد.

مواد و روش‌ها

استان قزوین در حوضه مرکزی ایران در دامنه جنوبی رشته کوه‌های البرز مرکزی بین 48° و 43° و 50° و 52° طول شرقی از نصف النهار گرینویچ و 35° و 24° تا 36° و 48° عرض شمالی نسبت به خط استوا قرار دارد. بر اساس آخرین تقسیمات سیاسی استان قزوین با مساحت 15626 کیلومتر مربع از 6 شهرستان، 19 بخش، 25 شهر و 46 دهستان تشکیل گردیده است (شکل ۱). استان قزوین متشکل از سه منطقه متمایز و مشخص کوهستانی، کوهپایه‌ای و دشتی است. حداکثر ارتفاع کوه‌های شمالی سیاهلان 4175 متر از سطح دریا می‌باشد. محدوده‌ی مرکزی و شرق استان را دشت تشکیل می‌دهد. حداقل ارتفاع استان در شمال غرب (بخش طارم سفلی) در کناره‌های دریاچه سفیرود با ارتفاع 300 متر از سطح دریاست (http://www.earthenv.org/topography) (شکل ۲).



شکل ۲. مدل رقومی ارتفاع استان قزوین (SRTM4.1)



شکل ۱. نقشه تقسیمات سیاسی استان قزوین (دفتر امور اجتماعی

و انتخابات استانداری قزوین، ۱۴۰۱)

در این پژوهش به منظور پیش‌نگری رطوبت سطحی خاک از برون‌داد دو مدل آرشیو در CMIP6 بنام مدل ACCESS-CM2 (ACCESS) و مدل MPI-ESM1-2-LR (MPI) برای محدوده استان قزوین در دوره تاریخی و تحت دو سناریوی خوشبینانه و بدبینانه برای دوره آینده نزدیک ۲۰۲۱-۲۰۴۰ استفاده شد (جدول ۱). از آنجایی که مدل MPI در پژوهش چائو و همکاران (۲۰۲۲) مدل به عنوان توانمندترین مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک در منطقه خاورمیانه شناخته شده بود لذا در این پژوهش از این مدل استفاده گردید.

جدول ۱. مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش به منظور پیش‌نگری رطوبت سطحی خاک

نام مدل	قدرت تفکیک	کشور	مرکز تحقیقاتی
MPI-ESM1-2-LR	$1.875^{\circ} \times 1.86^{\circ}$	آلمان	(MPI- پژوهشگاه هواشناسی ماکس پلانک M)

^۱. QIAO

همچنین، از داده‌های رطوبت ماهانه بازتحلیل ERA5-Land (عمق ۰-۷ cm) نیز در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) به عنوان داده‌های مشاهداتی استفاده شد که این داده‌ها از پایگاه کوپرنیک به آدرس <https://www.ecmwf.int/en/era5-land> بارگذاری گردید. مشخصات این داده‌ها در جدول ۲ آمده است. با توجه به تفاوت دو سری داده بازتحلیل و برون‌داد مدل های CMIP6، از رابطه زیر به منظور تبدیل واحد برون‌داد دو مدل CMIP6 (kg.m⁻²) به محتوای حجمی رطوبت^۱ (VWC) استفاده شد (Zhu & Shi, 2014).

$$VWC (m.m^{-3}) = \frac{kg}{m^2} \frac{m^3}{1000kg} \frac{1000mm}{1m} \frac{1}{(mm) \text{ خاک لایه ضخامت}} \quad (۱)$$

جدول ۲ مشخصات پایگاه داده‌های بازتحلیل

بانک داده بازتحلیل	مرکز دریافت داده‌ها	پوشش زمانی	تفکیک
ERA5-LAND	Copernicus Climate Change Service's (C3S) Climate Data Store (CDS). https://climate.copernicus.eu/climate-data-store .	پوشش زمانی: ۱۹۵۰ تا حال حاضر	۰/۱ در ۰/۱ درجه

با تابع Resample و تنظیمات "Bilinear" و کدنویسی در محیط R قدرت تفکیک مکانی دو مدل اقلیمی با در نظر گرفتن قدرت تفکیک لایه‌های رستری ERA5-Land، ریز مقیاس شد. روش‌های تصحیح اریبی مدل‌های اقلیمی شامل روش‌های دینامیکی و آماری است که برای پر کردن شکاف بین تفکیک پذیری کم GCMها و نیاز به تولید داده‌های اقلیمی در مقیاس محلی استفاده می‌شوند (Su et al., 2016; Senanayake et al., 2021). در این روش، یک ضریب اصلاح شده ثابت را که از اختلاف بین شبیه‌سازی مدل و مقادیر مشاهداتی برای هر ماه بدست می‌آید، بکار می‌رود. در این پژوهش، به منظور تصحیح اریبی از روش نسبت گیری خطی (LS) استفاده شد.

نسبت گیری خطی

روش نسبت گیری خطی (رابطه ۲) یک ضریب اصلاح شده ثابت بدست آمده از اختلاف بین شبیه‌سازی مدل (P_m) و مقادیر مشاهداتی (P_{obs}) برای هر ماه را بکار می‌برد (با فرض ثابت ماندن ضرایب و فاکتورهای اصلاحی اعمال شده در شرایط فعلی داده‌ها و شرایط آینده). این روش به رغم سادگی و سرعت بالا، برای متغیرهایی مانند رطوبت خاک که نیاز به حفظ نسبت‌ها دارند موثر است (Tumsa, 2021).

$$P_{hst,m,d}^{cor} = P_{hst,m,d} \times \left[\frac{\mu(P_{obs,m,Q})}{\mu(P_{hst,m,Q})} \right] \quad (۲)$$

تحلیل چندک‌های حدی

بیشتر مطالعات انجام شده به منظور برآورد تغییرات متغیرهایی اقلیمی بر بررسی تغییر در میانگین/میانه سری‌ها متمرکز شده‌اند که منجر به تجزیه و تحلیل شرایط تر و خشک نمی‌شود. تغییرات در سال‌های تر و خشک، معادل تغییرات در چندک‌های بالا و پایین، تأثیرات مهمی بر فعالیت‌های انسانی، محیطی و اکولوژیکی دارد (Modabber-Azizi et al., 2023). مطالعات مختلفی تغییرات متغیرهای هیدرولوژیکی و هیدرواقلمی را با استفاده از رگرسیون چندک بررسی کرده‌اند (Nasri et al., 2017; Salarijazi et al., 2023).

تحلیل چندک‌های بالا و پایین به عنوان یک روش ناپارامتریک قدرتمند در ارزیابی رفتار مقادیر حدی سیستم‌های هیدروکلیماتولوژی به کار می‌رود. این روش بر خلاف روش‌های پارامتریک مبتنی بر توزیع‌های مقادیر حدی (مانند GEV)، نیاز به فرضیه‌های اولیه در مورد توزیع داده‌ها ندارد و بنابراین در شرایطی که داده‌ها از توزیع مشخصی پیروی نکنند، نتایج قابل اطمینان‌تری ارائه می‌دهد.

تعریف تابع چندک

برای یک متغیر تصادفی X با تابع توزیع تجمعی F_X(x)، تابع چندک Q(p) به صورت زیر تعریف می‌شود:

(۳)

$$Q(p) = \inf\{x \in \mathbb{R} : F_X(x) \geq p\}$$

^۱. Volumetric water content

^۲. Linear Scaling

که در آن $p \in [0,1]$ سطح احتمال مورد نظر است. در این تعریف چندک‌های پایین ($p \leq 0.1$) نماینده شرایط حدی خشک هستند در حالیکه چندک‌های بالا ($p \geq 0.9$) نماینده شرایط حدی تر هستند. در مطالعات هیدروکلیماتولوژی، معمولاً از چندک‌های زیر استفاده می‌شود:

-چارک ۱٪: ($p=0.01$) نماینده شرایط خشک شدید

-چندک ۵٪: ($p=0.05$) نماینده شرایط خشک

-چندک ۹۵٪: ($p=0.95$) نماینده شرایط تر

-چندک ۹۹٪: ($p=0.99$) نماینده شرایط تر شدید

چندک‌های پایین که منعکس کننده کارایی مدل در شبیه‌سازی تبخیر-تعرق، نفوذپذیری خاک و ظرفیت میدان هستند در حالیکه چندک‌های بالا منعکس کننده دقت مدل در شبیه‌سازی رواناب، شارش زیرسطحی و ظرفیت نگهداری رطوبت محسوب می‌شوند. برخی مزایای تحلیل چندک عبارت است از

۱- مقاومت در برابر نقاط پرت: تحلیل چندک نسبت به مقادیر پرت مقاوم است، چرا که بر اساس رتبه‌بندی داده‌ها عمل می‌کند و تحت تأثیر مقادیر افراطی قرار نمی‌گیرد.

۲- عدم نیاز به فرض توزیع خاص: بر خلاف روش‌های مبتنی بر توزیع‌های مقادیر حدی مانند (GEV)، این روش نیاز به فرض توزیع خاصی برای داده‌ها ندارد.

۳- قابلیت تفسیر مستقیم: چندک‌ها تفسیر مستقیم دارند: به عنوان مثال، چندک ۱٪ مقداری است که تنها ۱٪ از مشاهدات کمتر از آن قرار می‌گیرند.

شاخص‌های ارزیابی

به منظور مقایسه توانمندی دو مدل ACCESS و MPI در شبیه‌سازی رطوبت خاک سطحی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی (ERA5-land) از دو معیار RMSE و MAE استفاده شد. در نهایت، درصد تغییر این متغیر برای مقادیر ماهانه رطوبت سطحی خاک دو مدل MPI و ACCESS تحت دو سناریوی بدبینانه و خوشبینانه (SSP) برای دوره آتی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ محاسبه شد. فرض کنید O_i داده مشاهداتی در روز i ام، P_i رطوبت سطحی خاک بدست آمده از مدل در روز i ام و \bar{O} به ترتیب مقادیر متوسط O_i ها و P_i ها و n تعداد مشاهدات باشد. MAE (رابطه ۲) و RMSE (رابطه ۳) بیانگر میانگین خطا در واحد متغیر مورد نظر است، با این تفاوت که RMSE به خطاهای بزرگ وزن نسبتاً بالایی می‌دهد. هر دو معیار می‌توانند از ۰ تا ∞ تغییر کنند، مقادیر کمتر نشان‌دهنده‌ی خطای کمتر پایگاه داده در پیش‌بینی مقادیر مشاهده‌ای است (ایزدی و همکاران، ۲۰۲۱).

$$MAE = n^{(-1)} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|, \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(n^{(-1)} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right)} \quad (5)$$

نسبت چندک (Quantile Ratio - QR)

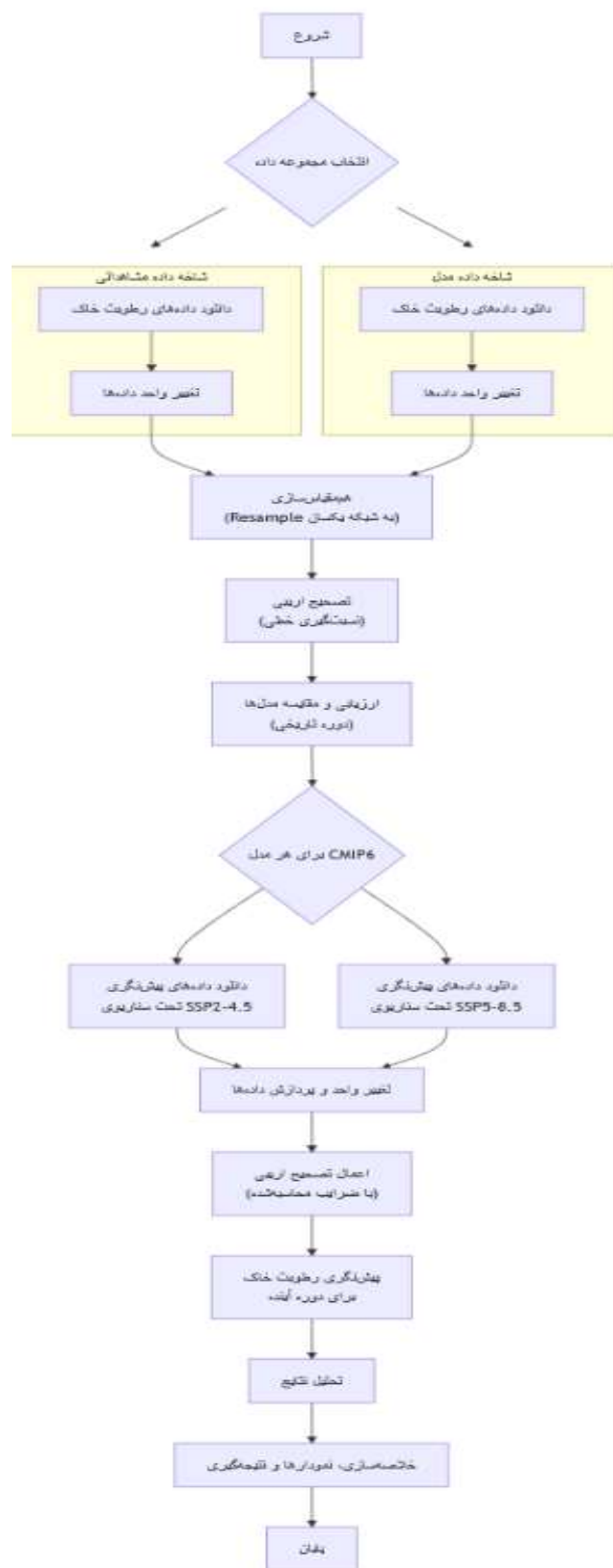
$$QR(p) = Q_model(p) / Q_obs(p) \quad (6)$$

این شاخص، شاخص ارزیابی مبتنی بر چندک است که نشان می‌دهد که مدل در سطح چندک p ام چه نسبتی از مقادیر مشاهداتی را شبیه‌سازی می‌کند بر اساس مقادیر بدست آمده به صورت زیر تفسیر می‌شود.

QR < 1 : کم‌برآوردی مدل

QR > 1 : بیش‌برآوردی مدل

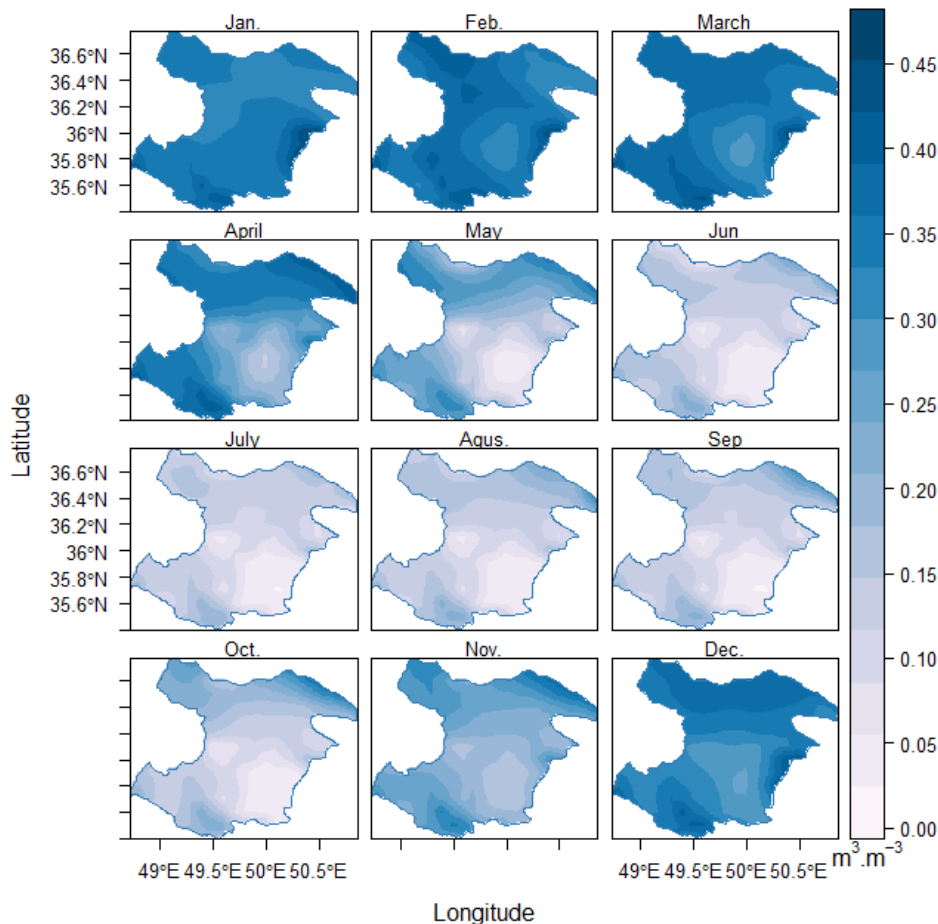
QR = 1 : برآورد کامل



شکل ۳- فلوچارت انجام مراحل پژوهش

بحث

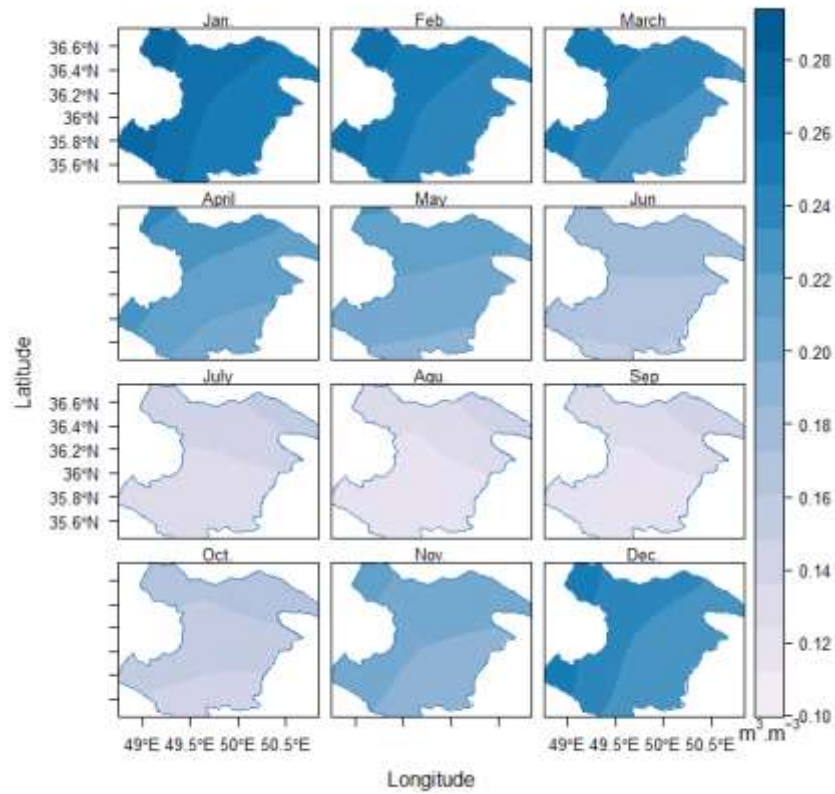
در شکل توزیع مکانی میانگین ماهانه رطوبت سطحی خاک برای دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) بر اساس داده‌های رطوبت خاک سطحی ERA5-land آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار رطوبت خاک به تفکیک فصل‌ها به خوبی نشان داده شده است. از نظر زمانی، بیشترین مقدار رطوبت طی ماه‌های ژانویه تا آوریل و اکتبر با دسامبر برای استان برآورد شده است. از نظر مکانی، کمترین مقادیر این متغیر طی طول سال، در مناطق مرکزی و جنوب شرقی استان قابل مشاهده است.



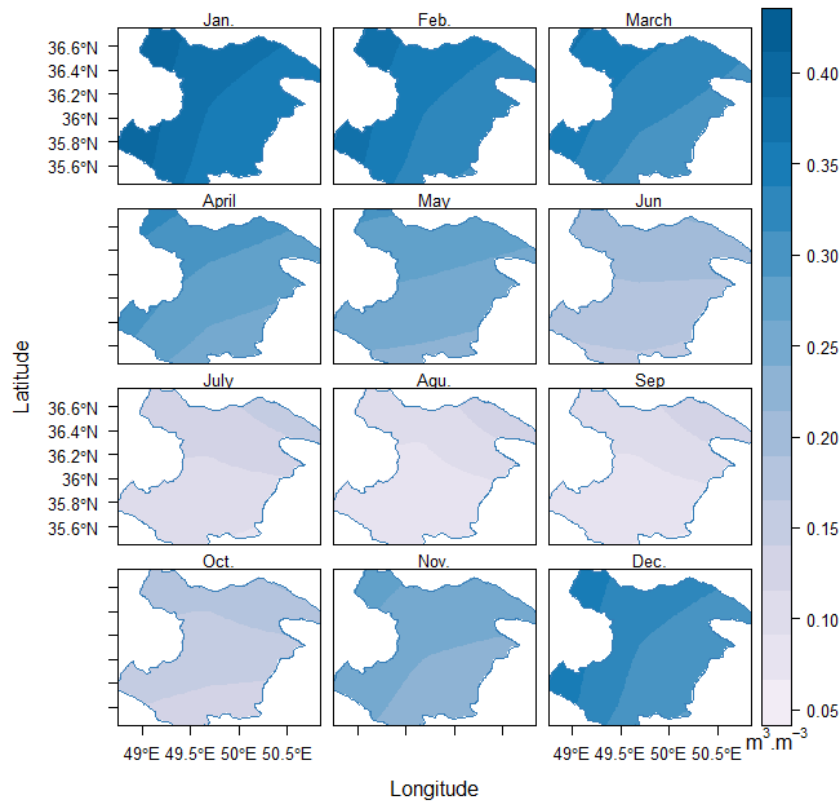
شکل ۴. میانگین ماهانه رطوبت سطحی خاک ($m^3.m^{-3}$) برای دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴ بر اساس داده‌های شبکه‌ای بازتحلیل ERA5-Land

به منظور ارزیابی توانمندی دو مدل منتخب CMIP6، در گام نخست، ضمن تغییر واحد برون داد مدل‌های مذکور، قدرت تفکیک مدل با استفاده از تابع Resample و با استفاده از لایه‌های رستری ERA5-land برای دوره پایه افزایش یافت. در شکل و شکل توزیع مکانی مقادیر حاصل از Resample و اصلاح آریبی شده به روش نسبت‌گیری خطی میانگین ماهانه این متغیر برای دوره پایه برای مدل ACCESS نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در مقایسه با نقشه‌های ماهانه رطوبت خاک ERA5-land، توزیع مکانی میانگین ماهانه این، دارای الگوی هموارتری هستند و شدت تغییرات رطوبت به‌طور یکنواخت‌تری توزیع شده است. در شکل ۵ توزیع مکانی رطوبت خاک سطحی مدل ACCESS بعد از ریزمقیاس‌نمایی آماری به روش نسبت‌گیری خطی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در این شکل الگوهای مکانی و زمانی وضوح بیشتری یافتند. مقادیر برآورد شده به مقادیر واقعی (ERA5-land) نزدیک‌تر شده و بازه مقادیر در این روش بزرگتر شده است. در این روش، تغییرات فصلی و الگوهای ماهانه بهتر مشخص هستند، به خصوص در ماه‌های تابستانی (جولای و آگوست) که مقادیر رطوبت به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. توزیع مکانی رطوبت در این مدل، طی ماه‌های نوامبر تا مارس تابع

طول جغرافیایی بوده و از غرب به سمت شرق کاهش می یابد. در کل، بعد از انجام تصحیح اریبی جزئیات بیشتری از مقادیر مکانی رطوبت خاک آرایه شده است. همانطور که مشاهده می شود تصحیح اریبی به روش نسبت گیری خطی منجر به بهبود مقادیر میانگین ماهانه این متغیر در تمامی ماهها شده است.

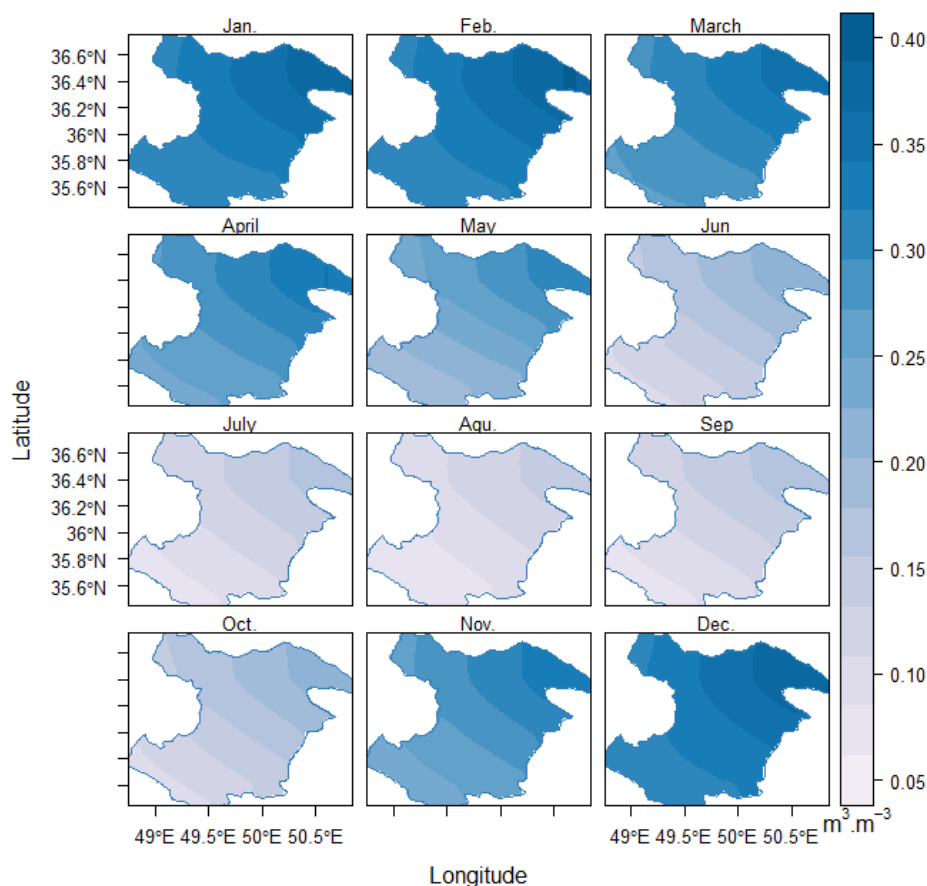


شکل ۵. میانگین ماهانه رطوبت سطحی خاک ($m^3.m^{-3}$) برای دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴ برای مدل ACCESS قبل از تصحیح اریبی



شکل ۶. میانگین ماهانه رطوبت سطحی خاک ($m^3.m^{-3}$) برای دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴ برای مدل ACCESS بعد از تصحیح اریبی

در **Error! Reference source not found.** نیز توزیع مکانی رطوبت خاک سطحی دوره پایه مدل MPI بعد از ریزمقیاس‌نمایی آماری نشان داده شده است. در این مدل نیز، در مقایسه با نقشه‌های ترسیم شده برای ERA5-land، توزیع مکانی میانگین ماهانه، دارای الگوی هموارتری هستند و شدت تغییرات رطوبت به‌طور یکنواخت‌تری توزیع شده است. شیب تغییرات رطوبت تابع عرض جغرافیایی شده و از شمال به جنوب استان کاهش می‌یابد و این الگو برای تمامی ماه‌ها حفظ شده است. در مقایسه با توزیع مکانی مقادیر مشاهده‌ای (ERA5-land) همخوانی کمتری در توزیع مکانی رطوبت نسبت به مدل مقابل (ACCESS) مشاهده می‌شود.



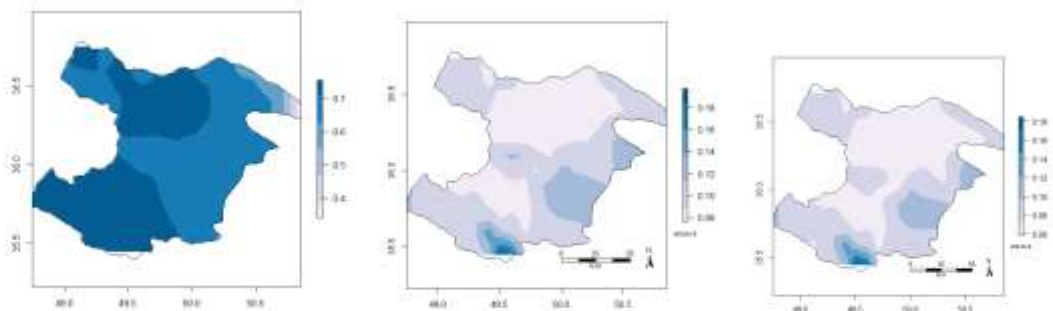
شکل ۷. توزیع مکانی مقادیر ریزمقیاس شده میانگین ماهانه رطوبت سطحی خاک ($m^3.m^{-3}$) مدل MPI با استفاده از روش LS برای دوره پایه

نتایج ارزیابی مدل‌ها

اگرچه لازم است تا صحت مجموعه داده‌ای که برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده می‌شود، تأیید شود (Collins et al., 2013) ولیکن به دلیل عدم وجود ایستگاه هواشناسی کشاورزی برای ثبت این متغیر در استان قزوین این امر میسر نمی‌باشد (اسعدی اسکویی و همکاران، ۲۰۲۴). لذا تصحیح اریبی برونداد مدل های منتخب CMIP6، به روش نسبت‌گیری خطی با استفاده از داده های رطوبت سطحی خاک ERA5-land انجام شد. اگرچه لازم است تا صحت مجموعه داده‌ای که برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده می‌شود، تأیید شود (Collins et al., 2013) ولیکن به دلیل عدم وجود ایستگاه هواشناسی کشاورزی برای ثبت این متغیر در استان قزوین این امر میسر نمی‌باشد (اسعدی اسکویی و همکاران، ۲۰۲۴). لذا تصحیح اریبی برونداد مدل های منتخب CMIP6، به روش نسبت‌گیری خطی با استفاده از داده های رطوبت سطحی خاک ERA5-land انجام شد.

به منظور مقایسه توانمندی مدل‌ها در شبیه‌سازی رطوبت خاک سطحی، مقادیر RMSE و MAE بین مقادیر ماهانه دو مدل MPI و ACCESS ریزمقیاس شده با روش LS با مقادیر مشاهداتی (ERA5-land) محاسبه و توزیع مکانی آن ترسیم شد (*Error! Reference source not found.* و *Error! Reference source not found.* شکل ۷ نشان می‌دهد بازه مقدار RMSE برای مدل MPI از ۰/۰۶ تا ۰/۱۸ متغیر بوده همچنین توزیع مکانی این دو معیار آماری نشان می‌دهد نقاط شبکه دارای خطای بالا بیشتر در جنوب شرقی و شرقی استان برآورد شده اند. میزان ضریب همبستگی ساده بین دو سری زمانی ماهانه این مدل با مقادیر مشاهداتی در شکل ۸ نشان داده شده است.

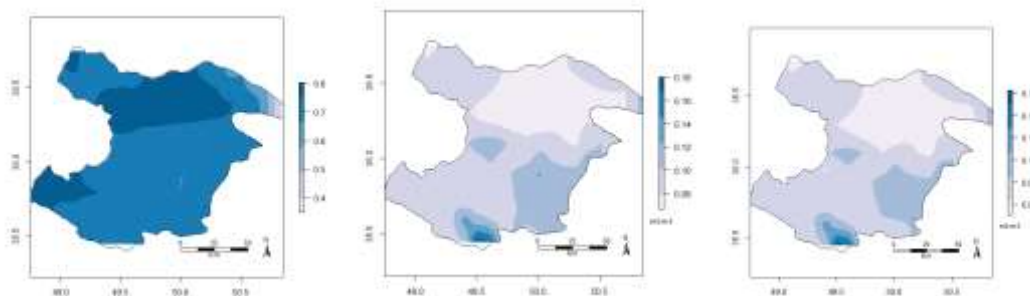
مقایسه توزیع مکانی سنجه های آماری با ارتفاع نشان داد دقت مدل در ارتفاعات پایین تر کمتر و در ارتفاعات متوسط تا بالا بهتر است، که ممکن است به شرایط خاص اقلیمی یا کیفیت داده های مشاهداتی در این نواحی مربوط باشد. این نتیجه با پژوهش Qiao و همکاران (۲۰۲۱) که نشان دادند مدل های CMIP6 در مناطق خیلی خشک از عملکرد ضعیفی برخوردار هستند همسو می باشد. مدل ACCESS در مقایسه با مدل MPI از توانمندی بالاتری در نمایش توزیع مکانی این متغیر در میانگین ماهانه این متغیر برخوردار بود که این امر ممکن است به دلیل قدرت تفکیک بالاتر این مدل نسبت به MPI باشد که در این صورت با نتیجه بدست آمده توسط Qiao et al., (2021) مبنی بر اینکه مدل هایی با وضوح فضایی بالاتر توافق نزدیک تری با داده های تحلیل مجدد نشان نمی دهند و این امر نشان می دهد وضوح فضایی اولین عامل محدودکننده برای شبیه سازی رطوبت خاک CMIP6 نیست در تضاد می باشد.



شکل ۸. توزیع مکانی RMSE (سمت راست)، MAE (سمت چپ) و ضریب همبستگی بین مقادیر ماهانه مدل MPI ریزمقیاس شده با روش LS

در شکل به ترتیب مقادیر RMSE و میانگین خطای مطلق بین دو سری ماهانه رطوبت سطحی خاک ERA5-land و مدل ACCESS که با روش LS ریزمقیاس شده ارائه شده است. همانطور که در این شکل کل مشاهده می شود بازه مقدار RMSE در حالت ریزمقیاس شده به روش LS از ۰/۰۶ تا ۰/۱۶ متغیر می باشد که در کل نشان می دهد انجام ریزمقیاس نمایی آماری در بهبود مقادیر برآورد شده نقش داشته است. همچنین توزیع مکانی این دو معیار آماری نشان می دهد تعداد نقاط شبکه دارای خطای بالا بویژه در مناطق شمالی استان به طرز مطلوبی کاهش یافته است. در شکل نیز مقدار میانگین خطای مطلق بین دو سری ماهانه رطوبت سطحی خاک ERA5-land و مدل ACCESS که با روش LS ریزمقیاس شده نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود روش LS منجر به بهبود مقادیر این متغیر بویژه در مناطق شمالی استان شده است.

در کل، نتایج ارزیابی مدل ها در شبیه سازی رطوبت خاک سطحی با دو معیار خطا RMSE و MAE نشان داد اگرچه هر دو مدل مقدار این متغیر را کم برآورد کردند که با نتایج همسو (Giardina et al., 2024; Gambill et al., 2020; Elmi et al., 2024) می باشد ولیکن با انجام تصحیح اریبی، بازه مقادیر ماهانه این متغیر به مقادیر واقعی (ERA5-land) نزدیک تر شده و از نظر مکانی، جزئیات مکانی بیشتری در سطح استان از این متغیر ارائه شده است.



شکل ۹. توزیع مکانی RMSE (سمت راست)، MAE (سمت چپ) و ضریب همبستگی بین مقادیر ماهانه مدل ACCESS ریزمقیاس شده با روش LS

تحلیل چندک های حدی

همانطور که از جدول ۳ استنباط می شود هر دو مدل MPI و ACCESS چندک های پایین (دوره های خشک) رطوبت خاک را نسبت به مقادیر مشاهداتی ERA5-LAND کم برآورد می کند ($Q < 1$). در واقع، مدل در برآورد شرایط خشک شدید عملکرد ضعیفتری دارد. این در حالی است که در چندک های بالا (ترسالی) هر دو مدل بیش برآورد دارند در واقع، مدل در شرایط تر شدید بیش برآورد قابل توجهی وجود دارد. با توجه به نتایج، در مقایسه توانمندی دو مدل در برآورد مقادیر حدی رطوبت خاک سطحی، مدل ACCESS توانمندی بهتری در برآورد چندک های بالا دارد در حالیکه مدل MPI از قابلیت بهتری در شبیه سازی چندک های پایین داشته است. نتایج این پژوهش همسو با یافته های Qiao et al., (2022)؛ Li et al. (2022) می باشد که نشان داده اند مدل های CMIP6 دارای محدودیت هایی در شبیه سازی مقادیر حدی رطوبت خاک هستند.

جدول ۳- مقایسه چندک های داده های رطوبت خاک ERA5-LAND با مدل MPI در استان قزوین

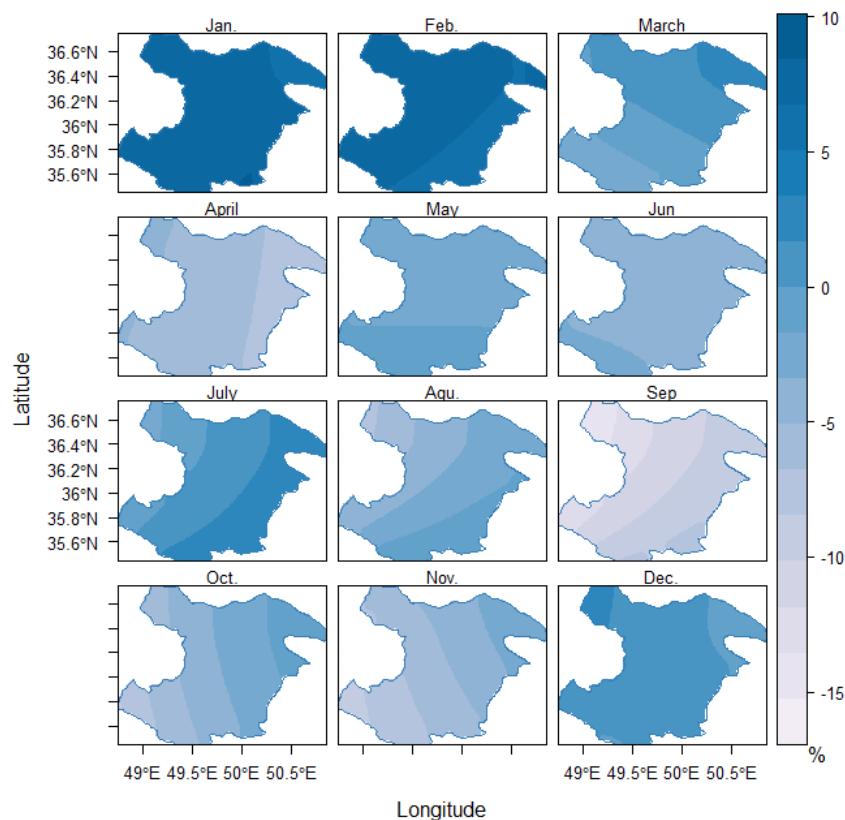
چندک	ERA5-LAND	MPI	نسبت	خطای نسبی
۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۷۶	۲۳/۵
۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۱۰	۰/۸۲	۱۷/۷
۰/۹۵	۰/۳۶	۰/۴۱	۱/۱۲	۱۲/۲
۰/۹۹	۰/۳۸	۰/۴۷	۱/۲۲	۲۲/۴

جدول ۴- مقایسه چندک های داده های رطوبت خاک ERA5-LAND با مدل ACCESS در استان قزوین

چندک	ERA5-LAND	ACCESS	نسبت	خطای نسبی
۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۶۶	۳۳/۵
۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۷۱	۲۸/۷
۰/۹۵	۰/۳۶	۰/۴۰	۱/۱	۹/۵
۰/۹۹	۰/۳۸	۰/۴۴	۱/۱۷	۱۶/۹

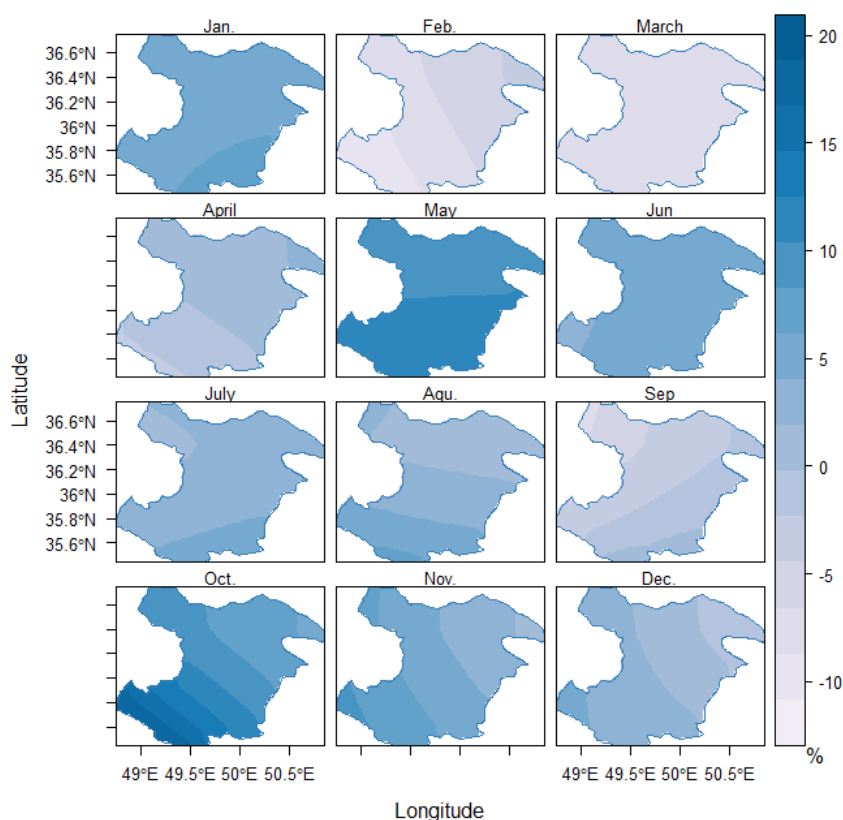
پیش‌نگری مقادیر رطوبت سطحی

به منظور پیش‌نگری مقادیر رطوبت سطحی مدل MPI برای دوره آتی ۲۰۲۱-۲۰۴۰، داده‌های مربوط به رطوبت خاک سطحی در مقیاس ماهانه تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 برای دو مدل منتخب بارگذاری و برای محدوده استان برش داده شد. سپس با استفاده از داده‌های ERA5-land و با انجام resample قدرت تفکیک مدل افزایش یافت. در ادامه، عمل ریزمقیاس‌گردانی با روش LS و با استفاده از داده‌های تاریخی ERA5-land و مدل MPI برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت دو سناریو انجام شد. در شکل ۹، درصد تفاوت میانگین ماهانه سطحی تحت سناریوی SSP1-2.6 این متغیر برای دوره آینده نزدیک ۲۰۲۱-۲۰۴۰ برای مدل MPI نسبت به دوره پایه مدل آورده شده است.



شکل ۹. توزیع مکانی درصد تفاوت میانگین مقادیر رطوبت خاک سطحی مدل MPI برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریوی SSP1-2.6 نسبت به مقادیر دوره پایه مدل

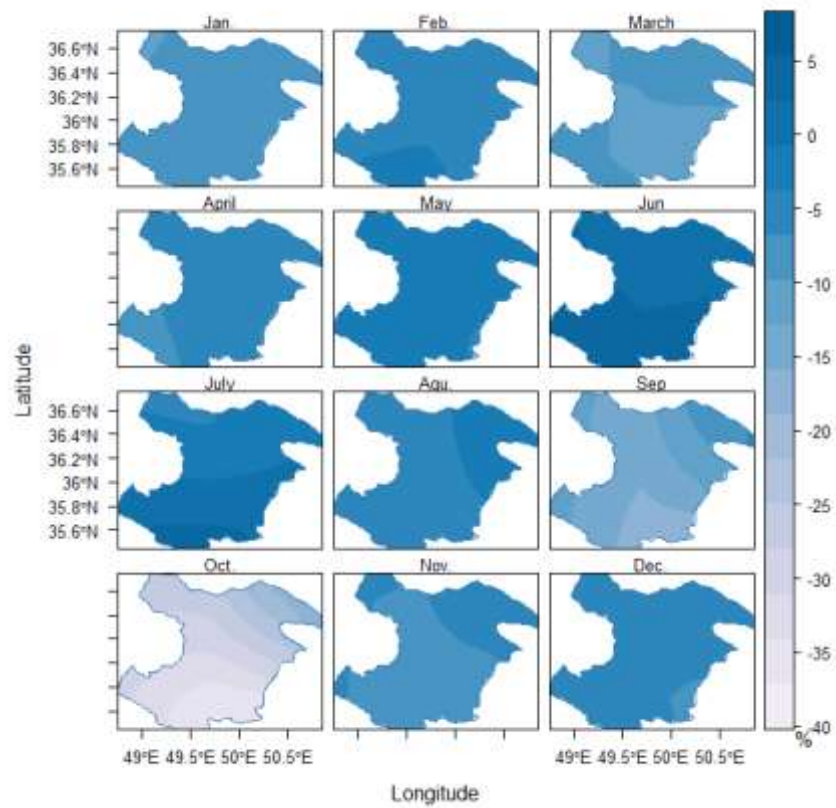
بر اساس نتایج و شکل مدل MPI، تحت سناریوی SSP1-2.6، افزایش میانگین رطوبت خاک سطحی را دوره آتی برای ماه‌های فصل زمستان و ماه مارس و ماه جولای نیمه غربی استان، پیش‌نگری کرده است. مقدار افزایش و مساحت مربوطه به آن بر حسب ماه متفاوت است. در ماه‌های ژانویه و فوریه بیشترین افزایش و در کل استان بدست آمد. بیشترین درصد کاهش در ماه سپتامبر و برای مناطق غربی استان بدست آمده است (تا ۱۵ درصد). از ماه آگوست تا نوامبر، کاهش بیشتر در مناطق شمال غربی و جنوب غربی برآورده شده است. در ماه آوریل نیز این استان شاهد کاهش رطوبت خاک خواهد بود.



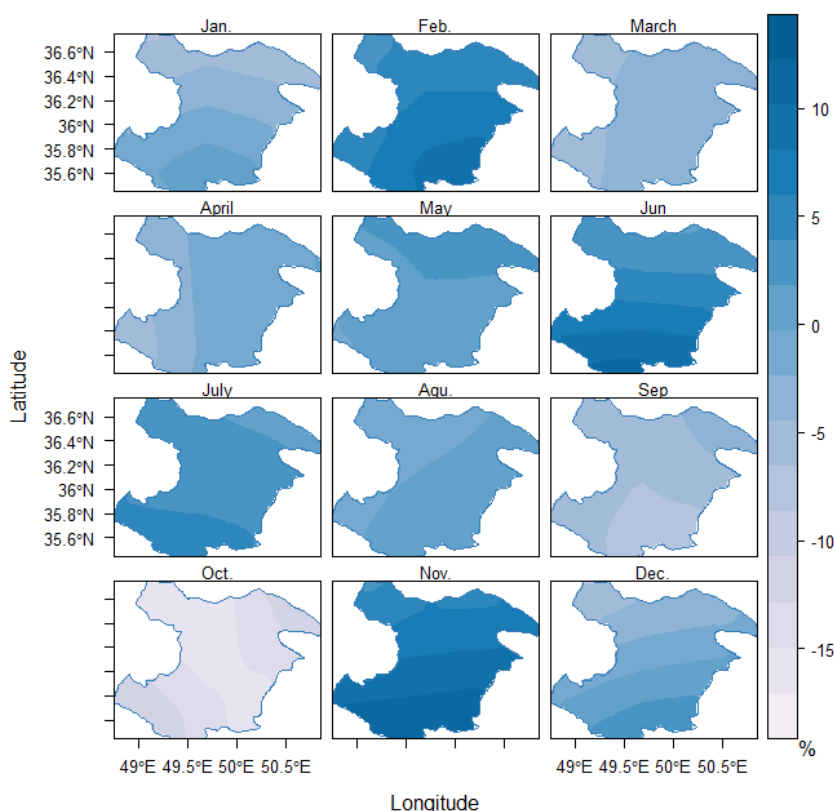
شکل ۱۰. توزیع مکانی درصد تفاوت میانگین مقادیر رطوبت خاک سطحی مدل MPI برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریوی SSP5-8.5 نسبت به مقادیر دوره پایه مدل

در شکل، توزیع مکانی درصد تفاوت میانگین مقادیر رطوبت خاک سطحی مدل MPI برای دوره آینده نزدیک تحت سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5) نسبت به دوره پایه مدل آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین درصد تفاوت برای ماه‌های فوریه (۳/۷٪ -) و مارس (۶/۶٪ - تا ۸/۵٪ -) و ماه سپتامبر (۰/۴٪ - تا ۷/۲٪ -) بدست آمد. از نظر توزیع مکانی، کاهش بیشتر در مناطق جنوب غربی و در ماه سپتامبر در شمال غرب و جنوب غرب استان مشاهده شد. تحت این سناریو، افزایش در این متغیر در ماه‌های اکتبر تا ژانویه و آوریل تا اگوست بدست آمد. در ماه می و دسامبر افزایش رطوبت سطحی خاک پیش‌نگری شده است در حالیکه در ماه فوریه تا آوریل، رطوبت سطحی کاهش نشان می‌دهد.

برای مدل ACCESS نیز پس از ریزمقیاس‌نمایی آماری برون‌داد مدل تحت دو سناریو، درصد تفاوت میانگین ماهانه این متغیر نسبت به دوره پایه محاسبه و توزیع مکانی آن بررسی شد. در **Error! Reference source not found.** میانگین ماهانه اقلیمی رطوبت سطح خاک برای دوره آینده نزدیک تحت سناریوی بدبینانه‌ی SSP1-2.6 محاسبه شده است. درصد تغییر رطوبت خاک نسبت به دوره پایه در بازه ی ۳۵٪ - تا ۵٪ + قرار دارد. همانطور که این شکل نشان می‌دهد ماه اکتبر بیشترین کاهش را در میانگین دوره آتی نشان می‌دهد. کمترین کاهش در مناطق شمال شرقی و جنوب غربی بدست آمده است. ماه‌های فوریه، جون و جولای (افزایش در نواحی جنوبی استان) و اکتبر (بالاترین کاهش) را نشان می‌دهند.



شکل ۱۱. درصد تغییر میانگین ماهانه رطوبت سطحی خاک ($m^3.m^{-3}$) برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ برای مدل ACCESS تحت سناریوی SSP1-2.6 نسبت به دوره پایه



شکل ۱۲. درصد تغییر میانگین ماهانه رطوبت سطحی خاک ($m^3.m^{-3}$) برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ برای مدل ACCESS تحت سناریوی SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه

در شکل ۱۱، تغییرات درصد رطوبت خاک سطحی برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریوی خوشبینانه SSP5-8.5 با استفاده از برونداد مدل ACCESS نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود در تمامی ماه‌ها (به جز ماه جون، فوریه و نوامبر برای مناطق جنوبی استان) کاهش در مقدار این متغیر بدست آمد. میانگین ماه اکتبر دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ بیشترین شدت کاهش را در بین ماه‌ها نشان می‌دهد که در نیمه جنوبی استان پیش‌نگری شده است. در مقایسه با سناریوی خوشبینانه، در این سناریو درصد کاهش کمتری در این متغیر نسبت به دوره پایه بدست آمد.

در کل، نتایج نشان داد مدل MPI تحت سناریوی خوشبینانه SSP1-2.6 افزایش رطوبت خاک را عمدتاً در ماه‌های زمستانی (ژانویه، فوریه) و مناطقی از نیمه غربی استان پیش‌نگری کرده، در حالی که بیشترین کاهش‌ها در فصل تابستان به‌ویژه ماه سپتامبر و در مناطق غربی و جنوب‌غربی استان قابل انتظار است. در مقابل، تحت سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 نیز کاهش قابل توجهی برای ماه‌های فوریه، مارس و سپتامبر در نواحی جنوبی و شمال‌غربی برآورد شد، اما در برخی ماه‌های زمستانی مانند دسامبر و ژانویه افزایش‌های محلی نیز پیش‌نگری شد. مدل ACCESS نیز تحت هر دو سناریو، بیشترین کاهش رطوبت سطحی خاک را در ماه اکتبر و بیشتر در نیمه جنوبی استان پیش‌نگری کرد. با این حال، افزایش نسبی در برخی ماه‌ها و نواحی خاص (جون، فوریه، نوامبر در جنوب استان) نیز قابل مشاهده بود. به‌طور کلی، نتایج حاکی از آن است که با تداوم روندهای اقلیمی فعلی، کاهش فصلی رطوبت خاک به‌ویژه در ماه‌های گرم سال و اوایل پاییز تشدید خواهد شد، که می‌تواند تبعات مهمی در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی کشاورزی منطقه به همراه داشته باشد. در پژوهش‌های مشابه نیز Feng و همکاران (۲۰۲۲) بر اساس داده‌های رطوبت خاک مدل‌های CMIP6 نشان دادند شمال شرقی چین مرطوب‌تر و جنوب چین خشک‌تر خواهد شد. Sang et al. (2020) نشان دادند توصیف بهتر رابطه بین رطوبت خاک و بارش و بازتولید بهتر میانگین بارندگی اقلیم توسط مدل‌های CMIP6 نسبت به CMIP5 منجر به بهبود عملکرد شبیه‌سازی رطوبت خاک شده است.

نتیجه گیری

کمیاب و فقدان داده‌های رطوبت خاک در اغلب مناطق کشور همواره از مشکلات مهم در مدل سازی های هیدرولوژیکی، پیش‌بینی‌های هواشناسی و مدیریت و برنامه ریزی منابع آب بوده است (اسکویی و همکاران، ۱۴۰۱). توزیع مکانی میانگین ماهانه داده‌های رطوبت سطحی خاک ERA5-land طی دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) نشان داد که بیشترین برآورد مقدار رطوبت در سال برای استان قزوین از نظر زمانی طی ماه‌های ژانویه تا آوریل و اکتبر تا دسامبر و از نظر مکانی، کمترین مقادیر این متغیر متعلق به مناطق مرکزی و جنوب شرقی استان می باشد.

نتایج این مطالعه نشان داد که اعمال روش ریزمقیاس‌نمایی آماری LS در بهبود برآوردهای مدل‌های اقلیمی MPI و ACCESS در شبیه‌سازی رطوبت خاک سطحی مؤثر بود. به طوری که پس از اعمال این روش، مقادیر خطای RMSE و MAE به‌ویژه در مدل ACCESS کاهش محسوسی یافت و توزیع مکانی نقاط پرخطا در مناطق شمالی استان بهبود مطلوبی پیدا کرد.

در بخش پیش‌نگری رطوبت خاک استان طی دوره های آتی، خروجی مدل‌ها تحت دو سناریوی مختلف SSP، الگوهای مکانی-زمانی متفاوتی را برای تغییرات رطوبت خاک سطحی در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ نشان داد. به‌طور کلی، مدل MPI تحت سناریوی SSP1-2.6 افزایش رطوبت را در ماه‌های سرد سال (زمستان و مارس) و کاهش را در ماه‌های گرم (به‌ویژه سپتامبر) پیش‌نگری کرد. در مقابل، تحت سناریوی SSP5-8.5، این مدل کاهش قابل توجهی را در ماه‌های فوریه، مارس و سپتامبر نشان داد. مدل ACCESS نیز تحت هر دو سناریو، کاهش میانگین رطوبت خاک را در اکثر ماه‌ها پیش‌نگری نمود، به‌گونه‌ای که ماه اکتبر به‌عنوان ماه با شدیدترین کاهش در مقدار رطوبت خاک در سطح استان قزوین شناسایی شد. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده تحت سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5)، درصد کاهش رطوبت در مدل ACCESS در مقایسه با سناریوی خوشبینانه (SSP1-2.6) کمتر بود که نشان از رفتار متفاوت و وابسته به سناریوی مدل‌ها دارد.

پیش‌نگری رطوبت خاک با مدل‌های CMIP6 ابزاری ضروری برای درک تأثیر تغییر اقلیم بر چرخه آب و سامانه‌های کشاورزی است. استفاده از داده‌های ریزمقیاس شده رطوبت خاک و پیش‌نگری آن، امکان مدیریت بهتر آبیاری و افزایش عملکرد محصول را فراهم می‌سازد و برای پایش مخاطراتی چون خشکسالی و سیل ضروری است (Rathore et al., 2023). در مجموع، یافته‌ها حاکی از آن است که استان قزوین طی دوره آینده نزدیک با تغییرات محسوسی در رژیم رطوبت خاک سطحی روبرو خواهد شد که این تغییرات دارای توزیع مکانی و زمانی ناهمگن بوده و شدت و توزیع مکانی آن به میزان زیادی به مدل اقلیمی و سناریوی SSP منتخب وابسته است. این نتایج می‌تواند به عنوان پایه‌ای علمی برای برنامه‌ریزی‌های بلندمدت در بخش‌های کشاورزی و مدیریت منابع آب در منطقه مورد مطالعه مورد بهره‌برداری قرار گیرد. مهمترین محدودیت این پژوهش عدم دسترسی به داده‌های ایستگاه‌های رطوبت خاک بود. جهت بهبود نتایج استفاده از مدل‌های بیشتر و ارزیابی این مدل‌ها با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای (مانند SMAP و SMOS) و روش‌های یادگیری ماشین پیشنهاد می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج

نویسنده دوم: طراحی پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: تهیه پیشنویس مقاله

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر بخشی از طرح پژوهشی با عنوان "پهنه بندی تنش آبی مراحل رشد گیاه گندم با استفاده از رطوبت خاک محدوده عمق ریشه سامانه SMAP در سال‌های ۱۳۹۴-۱۴۰۲ در سطح استان قزوین" است که با حمایت مالی سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان قزوین انجام شده است.

از سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان قزوین و اداره کل هواشناسی این استان سپاسگزاری می شود.

منابع

- اسعدی اسکویی، ا.، گودرزی، ل.، هلالی، ج. ۱۴۰۱. بررسی تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک سطحی در ایران با استفاده از محصول، SMAP L4 نیوار، ۴۶(۱۱۷-۱۱۶)، ۲۷-۲۴. doi: 10.30467/nivar.2022.315991.1206.
- اسعدی اسکویی، ا.، محمد بیگی سلخوری، م.، کوهی، م.، نوروزی، ح.، عباسی، ف.، محمدیان، آ. ۱۴۰۴. برآورد تنش رطوبتی خاک طی دوره رشد گندم دیم بر مبنای داده‌های ماهواره SMAP، نیوار، ۵۳(۷)، ۱۵۷۵-۱۵۹۱. doi: 10.30467/nivar.2025.502222.1320.
- شکری، ش.، فرخیان فیروزی، ا.، بابائیان، ا. ۱۴۰۱. برآورد رطوبت خاک به کمک تلفیق ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک با داده‌های نوری سنجش‌ازدور با استفاده از روش یادگیری ماشین، تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۷)، ۱۵۷۵-۱۵۹۱.
- فخار، م.، نظری، ب. ۱۴۰۳. برآورد رطوبت خاک با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی، دمای سطح خاک در اراضی کشاورزی و شوره زار دشت قزوین، مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۱۴(۱۶)، ۹۵-۱۱۰. doi: 10.22098/mmws.2024.14569.1416.
- وزیری، م.، قهرمان، ن. ۱۴۰۲. کاربست مدل WEAP در پیش‌نگری تبخیرتعرق پتانسیل تحت سناریوهای SSP تغییر اقلیم، پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۴(۱۶)، ۹۵-۱۱۰. doi: 10.30488/ccr.2024.427943.1183.
- Almazroui, M., Saeed, S., Saeed, F., Islam, M. N., Ismail, M. 2020. Projections of precipitation and temperature over the South Asian countries in CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 4, 297-320.
- 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(116-117), 14-27. doi: 10.30467/nivar.2022.315991.1206
- Asadi Oskouei, E., Mohamad Bygi Salkhori, M., Kouhi, M., Nourozi, H., Abbasi, F., Mohammadian, A. 2025. 'Estimation of Soil Water Stress During the Growth Period of Rainfed Wheat Based on SMAP Satellite Data', *Nivar*, (), e221883. doi: 10.30467/nivar.2025.502222.1320. in Persian
- Baghdadi, N., Aubert, M., Zribi, M. 2011. Use of TerraSAR-X data to retrieve soil moisture over bare soil agricultural fields. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(3), 512-516.
- Beck, H.E., Pan, M., Miralles, D.G., Reichle, R.H., Dorigo, W.A., Hahn, S., Sheffield, J., Karthikeyan, L., Balsamo, G., Parinussa, R.M. and van Dijk, A.I., 2021. Evaluation of 18 satellite-and model-based soil moisture products using in situ measurements from 826 sensors. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(1), pp.17-40.
- Cheng, M., Zhong, L., Ma, Y., Zou, M., Ge, N., Wang, X., Hu, Y. 2019. A study on the assessment of multi-source satellite soil moisture products and reanalysis data for the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 11(10), p.1196.
- Collins, M., K., AchutaRao, K., Ashok, S., Bhandari, A., Mitra, S., Prakash, R., Srivastava, A. 2013: Observational challenges in evaluating climate models. *Nat. Climate Change*, 3, 940-941, <https://doi.org/10.1038/nclimate2012>.
- Deng, M., Meng, X., Li, Z., Lyv, Y., Lei, H., Zhao, L., Zhao, S., Ge, J., Jing, H. 2020. Responses of soil moisture to regional climate change over the three rivers source region on the Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*, 40(4), pp.2403-2417.
- El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, M., Rodríguez-Fernández, N., Wigneron, J. P., Al-Yaari, A., Calvet, J. C. 2018. Evaluation of SMOS, SMAP, ASCAT and Sentinel-1 soil moisture products at sites in Southwestern France. *Remote Sensing*, 10(4), 569.
- Elmi, A., Anwar, S.A. Al-Dashti, H. 2024. Measurements and Regional Climate Modeling of Soil Temperature With and Without Bias Correction Method Under Arid Environment: Can Soil Temperature Outperform Air Temperature as a Climate Change Indicator?. *Environmental Modeling & Assessment*, 29(2), pp.279-289.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E. 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), pp.1937-1958.

- Fakhar, M. S., Nazari, B. 2025. Estimating soil moisture using vegetation cover indices and soil surface temperature in agricultural and saline fields of Qazvin plain, *Water and Soil Management and Modelling*, 5(2):182-198. doi: 10.22098/mmws.2024.14569.1416. in Persian
- Feng, D., Wang, G., Wei, X., Amankwah, S.O.Y., Hu, Y., Luo, Z., Hagan, D.F.T., Ullah, W. 2022. Merging and downscaling soil moisture data from CMIP6 projections using deep learning method. *Frontiers in Environmental Science*, 10, p.847475.
- Gambill, D.R., Wall, W.A., Howard, H.R. 2020. Validation of the GeoWATCH soil moisture model and proposed bias correction method. *Journal of Terramechanics*, 91, pp.1-9.
- Giardina, F., Padrón, R.S., Stocker, B.D., Schumacher, D.L., Seneviratne, S.I., 2024. Dry biases in land water storage and excessive soil moisture limitation in CMIP6 models.
- Grose, M.R., Narsey, S., Delage, F.P., Dowdy, A.J., Bador, M., Boschat, G., Chung, C., Kajtar, J.B., Rauniyar, S., Freund, M.B. and Lyu, K. 2020. Insights from CMIP6 for Australia's future climate. *Earth's Future*, 8(5): EF001469.
- Jiang, J., Zhou, T., Chen, X., Zhang, L. 2020. Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections. *Environmental Research Letters*, 15(5): 054009.
- Kendall M.G. 1975. Rank Correlation Methods. Griffin, London, UK.
- Li, Z., Liu, W., Ye, T., Chen, S., Shan, H. 2022. Observed and CMIP6 simulated occurrence and intensity of compound agroclimatic extremes over maize harvested areas in China. *Weather and Climate Extremes*, 38, 100503. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100503>
- Mann H.B. 1945. Nonparametric tests against trend, *Econometrica*. 13:245-259
- Maraun, D. 2016. Bias correction, quantile mapping, and downscaling: Revisiting the inflation issue. *Journal of Climate*, 29(11), 3447-3462.
- Mekonnen, D. F. 2009. Satellite remote sensing for soil moisture estimation: Gumara catchment. Ethiopia Satellite remote sensing for soil moisture estimation: Gumara catchment, Ethiopia
- Mekonnen, D.F. 2009. *Satellite remote sensing for soil moisture estimation: Gumara catchment, Ethiopia* (Master's thesis, University of Twente).
- Modabber-Azizi, S., Salarijazi, M., Ghorbani, K. 2023. A novel approach to recognize the long-term spatial-temporal pattern of dry and wet years over Iran. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 131, 103426.
- Nasri, B., Bouezmarni, T., St-Hilaire, A., Ouarda, T. B. 2017. Non-stationary hydrologic frequency analysis using B-spline quantile regression. *Journal of Hydrology*, 554, 532-544.
- Qiao, L., Zuo, Z., Xiao, D. 2022. Evaluation of soil moisture in CMIP6 simulations. *Journal of Climate*, 35(2), 779-800.
- Qiao, L., Zuo, Z., Xiao, D. 2022. Evaluation of soil moisture in CMIP6 simulations. *Journal of Climate*, 35(2), 779-800.
- Rathore, P., Prajapati, R., Roy, D., Das, B. Chakraborty, D. 2023. Perspective Chapter: Downscaling of Satellite Soil Moisture Estimates. *New Insights in Soil-Water Relationship*.
- Salarijazi, M., Ghorbani, K., Mohammadi, M., Ahmadianfar, I., Mohammadrezapour, O., Naser, M. H., Yaseen, Z. M. 2023. Spatial-temporal estimation of maximum temperature high returns periods for annual time series considering stationary/nonstationary approaches in Iran urban area. *Urban Climate*, 49, 101504.
- Sang, Y., Ren, H.-L., Shi, X., Xu, X., Chen, H. 2020. Improvement of Soil Moisture Simulation in Eurasia by the Beijing Climate Center Climate System Model from CMIP5 to CMIP6. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(2), 237-252. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-0167-7>
- Sen, P.K., 1966. Estimates of the regression coefficients based on Kendalls tau, *Journal of Amer*, 63: 1379-1389.
- Senanayake, I.P., Yeo, I.Y., Walker, J.P., Willgoose, G.R. 2021. Estimating catchment scale soil moisture at a high spatial resolution: Integrating remote sensing and machine learning. *Science of The Total Environment*, 776, p.145924.
- Serrano, A., Mateos, V.L., Garcia, J.A. 1999. Trend Analysis of Monthly Precipitation Over the Iberian Peninsula for the Period 1921-1995. *phys. Chem EARTH(B)*, vol:24, no. 1-2:pp.85-90.

- Shokri, S., Farrokhian Firouzi, A., Babaeian, E. 2022. Estimating Soil Moisture from Fusion of Soil Physical/Hydraulic Properties and Optical Remote Sensing Observations Using Machine Learning', *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(7), pp. 1575-1591. doi: 10.22059/ijswr.2022.339616.669240. in Persian
- Shokri, S., Farrokhian Firouzi, A., Babaeian, E. 2022. Estimating Soil Moisture from Fusion of Soil Physical/Hydraulic Properties and Optical Remote Sensing Observations Using Machine Learning, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(7), pp. 1575-1591. doi: 10.22059/ijswr.2022.339616.669240. in Persian
- Theil, H. 1950. A rank invariant method of linear and Polynomial regression analysis. Netherlands Akad, Wetensch. Proc, Vol 53: 1379-1412.
- Tumsa, B. 2021. Performance assessment of six bias correction methods using observed and RCM data at upper Awash basin, Oromia, Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change*. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.181>.
- Vaziri, M., Ghahreman, N. 2024. Application of WEAP model in predicting potential evapotranspiration under climate change SSP scenarios, *Climate Change Research*, 4(16), pp. 95-110. doi: 10.30488/ccr.2024.427943.1183. in Persian
- Wu, Z., Feng, H., He, H., Zhou, J., Zhang, Y. 2021. Evaluation of soil moisture climatology and anomaly components derived from ERA5-land and GLDAS-2.1 in China. *Water Resources Management*, 35(2), pp.629-643.
- Zhu, C., Li, S., Hagan, D. F. T., Wei, X., Feng, D., Lu, J., Wang, G. 2023. Long-Term Characteristics of Surface Soil Moisture over the Tibetan Plateau and Its Response to Climate Change. *Remote Sensing*, 15(18), 4414.
- Zhu, P., Saadati, H., Khayatnezhad, M. 2021. Application of probability decision system and particle swarm optimization for improving soil moisture content. *Water Supply*, 21(8), 4145-4152.
- Zhu, Z., Shi, C. X. 2014. Simulation and Evaluation of CLDAS and GLDAS Soil Moisture Data in China. *Sci. Technol. Eng.* 14 (32), 138–144. doi:10.3969/j. issn.1671-1815.2014.32.028
- Zou, X., Wang, G., Hagan, D. F. T., Li, S., Wei, J., Lu, J., Yeboah, E. 2023. Precipitation Sensitivity to Soil Moisture Changes in Multiple Global Climate Models. *Atmosphere*, 14(10), 1531.