

Research Paper

Uncertainty Estimation Due to the Use of Gridded Climate Datasets in Crop Modeling

Yaghoub Radmanesh¹, Mahdi Sarai-Tabrizi^{2*}, Hadi Ramezani-Etedali³, Asghar Azizian⁴, Hossein Babazadeh⁵

1. Ph.D. student of Water Resources, Department of Water Engineering and Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Associate Professor, Department of Water Engineering and Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3. Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

4. Associate Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

5. Professor, Department of Water Engineering and Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 2024.10.16

Revised: 2024.11.13

Accepted: 2025.01.06

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.71632/wej.2025.1186889](https://doi.org/10.71632/wej.2025.1186889)

Keywords:

AquaCrop model, uncertainty analysis, climate data, Bootstrap method, gridded climate datasets

Abstract

Introduction: Accurate climatic data are essential for crop modeling and yield prediction, particularly under climate change. In developing countries, access to reliable data is constrained by the low density of meteorological stations and limited historical records. Gridded climate datasets can mitigate this limitation; however, as they are not directly measured, uncertainty analysis is necessary.

Methods: This study evaluated uncertainty from gridded climate datasets—including CPC Global, CRU TS, ERA-Interim, ERA5, and MERRA-2—in simulating wheat and maize using the AquaCrop model across diverse Iranian climates over 30 years (1989–2019). AquaCrop, developed for water management and agricultural productivity, requires inputs such as precipitation and temperature. Bootstrap method quantified uncertainty in simulated biomass, evapotranspiration, crop water requirement, and yield. P-factor and d-factor indices were also calculated to assess dataset accuracy.

Findings: ERA5 consistently showed the lowest uncertainty in AquaCrop simulations. For maize biomass at Ahvaz, p-factor and d-factor were 23.33% and 0.5, respectively. Overall, ERA5 and ERA-Interim exhibited minimal uncertainty across most climates, whereas MERRA-2, with the highest uncertainty, performed worst.

Conclusion: Selecting appropriate high-resolution datasets and applying rigorous uncertainty analyses can directly improve AquaCrop prediction accuracy. ERA5 emerged as the most reliable option. These practices enhance modeling precision and support informed decision-making in agricultural and water resource management.

Citation: Radmanesh Y, Sarai-Tabrizi M, Ramezani-Etedali H, Azizian A, Babazadeh H. Uncertainty Estimation Due to the Use of Gridded Climate Datasets in Crop Modeling. Water Resources Engineering Journal. 2025; 18(65): 79-95.

***Corresponding author:** Mahdi Sarai-Tabrizi

Address: Dept. of Water Engineering and Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Tell: +989125900747

Email: m.sarai@iau.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Accurate climate data are essential for reliable crop modeling and predicting agricultural yields, particularly in the context of climate change. Climate data, including temperature and precipitation, are pivotal for models like AquaCrop, which are widely used for water management and agricultural productivity simulations. However, climate databases often rely on gridded datasets, which may introduce uncertainties due to spatial and temporal resolutions. This study focuses on evaluating the uncertainty associated with using various gridded climate datasets in the AquaCrop model for simulating the growth of wheat and maize in Iran. The aim is to identify how different climate databases influence the accuracy of key variables such as biomass, evapotranspiration, and water requirements, thus offering insights into the best dataset for improving simulation reliability.

Materials and Methods

This study utilized the AquaCrop model, a crop simulation tool developed by the Food and Agriculture Organization (FAO) to assess water productivity and crop performance under varying climatic conditions. The model requires climate inputs such as daily precipitation, maximum and minimum temperatures, and reference evapotranspiration (ET₀). Data from five gridded climate databases—ERA5, ERA-Interim, MERRA-2, CRU TS4.05, and CPC Global—were employed. These datasets vary in temporal and spatial resolution, making it essential to evaluate their impact on the model's output. The study area included eight synoptic stations in Iran, representing different climate zones ranging from hyper-arid to humid regions. Thirty years of climate data (1989-2019) were collected from these databases.

The Bootstrap method, a non-parametric statistical technique, was employed to quantify the uncertainty of the AquaCrop simulations. This method involved generating 1000 resamples of the model outputs for variables such as biomass,

evapotranspiration, and water requirements. Confidence intervals were calculated using the bias-corrected and accelerated (BCa) approach. To assess model accuracy, two key metrics were used: the p-factor, which represents the percentage of observed data within the 95% prediction uncertainty range, and the d-factor, which measures the thickness of the uncertainty bands relative to the standard deviation of the observed data.

Results

The results of the uncertainty analysis revealed significant differences between the climate datasets in terms of their impact on the AquaCrop model's predictions. The ERA5 dataset showed the lowest overall uncertainty for both wheat and maize simulations, with p-factors ranging from 20% to 40% and d-factors consistently below 0.8 across all climate zones. ERA-Interim performed similarly, albeit with slightly higher uncertainty levels, particularly in the arid and semi-arid regions. The CRU TS4.05 dataset demonstrated moderate uncertainty, with p-factors averaging around 30% and d-factors close to 0.9, especially in more temperate climates.

In contrast, the MERRA-2 dataset exhibited the highest uncertainty across all variables and climate zones. For example, the biomass simulations for maize in the hyper-arid region of Ahvaz showed p-factors as low as 10% and d-factors exceeding 1.0, indicating a poor fit between observed and predicted values. The CPC Global dataset, while generally more reliable than MERRA-2, still produced relatively wide uncertainty bands, particularly for evapotranspiration and water requirement estimates in more humid regions.

For wheat, similar trends were observed. ERA5 consistently provided the most accurate yield and water requirement predictions, with p-factors exceeding 30% in five out of the eight study regions. MERRA-2, on the other hand, performed poorly, particularly in the cooler and more humid regions, where the d-factor frequently exceeded 1.0.

These findings highlight the importance of selecting the most suitable climate dataset for crop modeling, as the choice of dataset can significantly affect the precision of the simulations. The use of higher-resolution datasets like ERA5, which incorporate advanced reanalysis techniques, was shown to reduce uncertainty and improve model reliability.

Conclusion

This study underscores the critical role of climate data selection in reducing uncertainty in crop modeling using the AquaCrop model. Among the gridded climate databases analyzed, ERA5 consistently demonstrated the lowest levels of uncertainty across all variables and climate zones, making it the most reliable dataset for crop simulations in Iran. ERA-Interim also performed well, though with slightly higher uncertainty in arid regions. In contrast, the MERRA-2 dataset showed the highest uncertainty, particularly in biomass and evapotranspiration simulations, and is therefore not recommended for such applications. These findings suggest that employing high-resolution, high-accuracy climate datasets can significantly improve the accuracy of crop modeling and support better decision-making in agricultural water management. Future studies should focus on further refining uncertainty analysis techniques and exploring other datasets to ensure even more precise crop simulations.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design and conceptualization: Yaghoub Radmanesh, Mahdi Sarai-Tabrizi, Hadi Ramezani-Etedali.

Methodology and data analysis: Yaghoub Radmanesh, Mahdi Sarai-Tabrizi, Hadi

Ramezani-Etedali, Asghar Azizian, Hossein Babazadeh.

Supervision and final writing: Yaghoub Radmanesh.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

برآورد عدم قطعیت ناشی از کاربرد پایگاه‌های اقلیمی شبکه‌بندی شده در مدل‌سازی گیاهی

یعقوب رادمنش^۱، مهدی سرائی تبریزی^{۲*}، هادی رمضانی اعتدالی^۳، اصغر عزیزیان^۴، حسین بابازاده^۵

۱. دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳. استاد، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

۴. دانشیار، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

۵. استاد، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

مقدمه: مدل‌سازی گیاهی و پیش‌بینی عملکرد محصولات زراعی، به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم، نیازمند داده‌های اقلیمی دقیق است. در کشورهای در حال توسعه، به‌دلیل تراکم کم ایستگاه‌های هواشناسی و دوره‌های آماری کوتاه، دسترسی به داده‌های قابل‌اعتماد با چالش‌هایی مواجه است. پایگاه‌های اقلیمی شبکه‌بندی شده می‌توانند این کمبود را جبران کنند. اما به‌دلیل عدم اندازه‌گیری مستقیم این داده‌ها، تحلیل عدم قطعیت ضروری است.

روش‌شناسی: در این پژوهش، عدم قطعیت ناشی از داده‌های اقلیمی پایگاه‌های شبکه‌بندی شده شامل MERRA-2، ERA5، ERA-Interim، CRU TS، CPC Global و ZRT با مدل AquaCrop در اقلیم‌های مختلف ایران طی دوره ۳۰ ساله (۱۹۸۹-۲۰۱۹) بررسی شد. AquaCrop برای مدیریت آب و بهره‌وری کشاورزی طراحی و به داده‌های اقلیمی مانند بارش و دما نیاز دارد. از روش Bootstrap برای ارزیابی عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های متغیرهای زیست‌توده، تبخیر و تعرق، نیاز آبی و عملکرد محصولات استفاده شد. همچنین، شاخص‌های p-factor و d-factor برای ارزیابی دقت پایگاه‌های اقلیمی محاسبه گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که پایگاه ERA5 میزان عدم قطعیت کمتری در شبیه‌سازی متغیرهای مدل AquaCrop ارائه داد. به‌ویژه در شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت در ایستگاه اهواز، مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۲۳/۳۳ درصد و ۰/۵ بود. به‌طور کلی، پایگاه‌های ERA5 و ERA-Interim کمترین عدم قطعیت را در اکثر اقلیم‌ها داشتند، درحالی‌که MERRA-2 به‌دلیل بیشترین عدم قطعیت، ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داد.

نتیجه‌گیری: این تحقیق نشان می‌دهد که انتخاب پایگاه مناسب برای مدل AquaCrop می‌تواند به‌طور مستقیم بر دقت پیش‌بینی‌ها تأثیر بگذارد. پایگاه ERA5 به‌عنوان گزینه برتر با میزان عدم قطعیت کمتر شناخته شد. استفاده از پایگاه‌های با دقت بالا و تحلیل‌های معتبر می‌تواند به بهبود کیفیت مدل‌سازی و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در حوزه کشاورزی و مدیریت منابع آب کمک کند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

تاریخ داوری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.71632/wej.2025.1186889](https://doi.org/10.71632/wej.2025.1186889)

واژه‌های کلیدی:

مدل AquaCrop، تحلیل عدم قطعیت، داده‌های اقلیمی، روش Bootstrap، پایگاه‌های اقلیمی شبکه‌بندی شده.

* نویسنده مسئول: مهدی سرائی تبریزی

نشانی: گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تلفن: ۰۹۱۲۵۹۰۰۷۴۷

پست الکترونیکی: m.sarai@iau.ac.ir

مقدمه

در دو دهه اخیر، مدل‌سازی گیاهی در مطالعات تغییر اقلیم، امنیت غذایی و پایداری منابع آب اهمیت زیادی پیدا کرده است. این مدل‌ها به ما کمک می‌کنند تا پتانسیل اقلیمی و تاثیر تغییرات اقلیمی و عوامل مدیریتی بر عملکرد گیاهان را بررسی کنیم. برای پیش‌بینی و مدل‌سازی عملکرد گیاهان، دسترسی به اطلاعات اقلیمی همچون بارش و دما ضروری است. یکی از مدل‌های مهم در این زمینه، مدل AquaCrop است که توسط سازمان خواروبار جهانی (FAO) توسعه یافته است. این مدل به طور خاص برای مدیریت آب در مزارع طراحی شده و به دلیل سادگی، نیاز به داده‌های کم و دقت مناسب، در سطح وسیعی استفاده می‌شود (۱). AquaCrop به عنوان ابزاری برای تحلیل تاثیر اقلیم، خاک، آب و مدیریت زراعی بر رشد گیاه و بهره‌وری آب کاربرد دارد (۱،۳). تحقیقات مختلف نشان داده‌اند که این مدل می‌تواند تاثیر مدیریت‌های مختلف آبیاری را بر محصولات گوناگون شبیه‌سازی کند. به عنوان مثال، تحقیقات درباره گندم (۴)، ذرت (۵)، جو (۶)، سیب‌زمینی (۷) و کلزا (۸)، همگی این موضوع را تایید کرده‌اند. ورودی‌های مدل AquaCrop شامل داده‌های اقلیمی، اطلاعات گیاهی، مدیریتی و خاک است که در این بین، داده‌های اقلیمی از اهمیت زیادی برخوردارند. تراکم پایین ایستگاه‌های هواشناسی یا طول کوتاه دوره آماری آن‌ها یکی از موانع استفاده از مدل‌هایی مانند AquaCrop است. پایگاه‌های اقلیمی شبکه‌بندی شده می‌توانند این کمبود را جبران کنند، اما قبل از استفاده از آن‌ها، ارزیابی کیفیت داده‌ها ضروری است. عدم قطعیت در داده‌های ورودی مانند بارش و دما به دلیل متغیر بودن این داده‌ها در زمان و مکان و احتمال خطا در اندازه‌گیری یا پیش‌بینی، وجود دارد. از این رو، بررسی عدم قطعیت در نتایج شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های اقلیمی شبکه‌بندی شده ضروری است. داده‌های اقلیمی پایگاه‌های شبکه‌بندی شده که مستقیماً اندازه‌گیری نشده‌اند، با عدم قطعیت همراه هستند. پس از واسنجی پارامترهای مدل، باید این عدم قطعیت‌ها ارزیابی شود. در سال‌های اخیر، تحلیل عدم قطعیت در مدل‌های کشاورزی و هیدرولوژیکی اهمیت بیشتری یافته است (۹). منابع عدم قطعیت به سه دسته تقسیم می‌شوند: الف) عدم قطعیت در ساختار مدل به دلیل ساده‌سازی فرایندهای فیزیکی؛ ب) عدم قطعیت در داده‌های ورودی مانند بارش و دما؛ و پ) عدم قطعیت در پارامترهای مدل که معمولاً از طریق واسنجی یا اندازه‌گیری تعیین می‌شوند (۱۰،۱۱). تحلیل عدم قطعیت، مربوط به تعیین عدم قطعیت در خروجی‌های مدل می‌باشد که از عدم قطعیت ورودی‌های مدل و پارامترها نشأت می‌گیرد (۱۲). بنابراین تحلیل عدم قطعیت باید به منظور توسعه و تضمین کیفیت مدل انجام شوند (۱۳). روش‌های مختلفی برای تحلیل عدم قطعیت وجود دارد که یکی از آن‌ها، روش Bootstrap است. Bootstrap یک تکنیک آماری قدرتمند است که توسط Bradley Efron در سال ۱۹۷۹ معرفی شد و برای ارزیابی عدم قطعیت در مدل‌ها در شرایط پیچیدگی توزیع یا دشواری تحلیل‌ها استفاده می‌شود (۱۴). در این روش، از داده‌های اصلی به طور تصادفی و با جایگذاری نمونه‌برداری می‌شود. این فرآیند معمولاً هزاران بار تکرار شده و برای هر نمونه آماره‌های مختلف مانند میانگین و واریانس

محاسبه می‌شود. توزیع این آماره‌ها به ما امکان تحلیل عدم قطعیت را می‌دهد (۱۵). این روش مزایای زیادی دارد، از جمله اینکه نیاز به فرضیات خاص ندارد و می‌تواند با داده‌های غیرنرمال یا نمونه‌های کوچک هم به خوبی کار کند (۱۶). همچنین، در انواع مدل‌های آماری و تحلیل‌های پیچیده کاربرد دارد و به سادگی قابل پیاده‌سازی است (۱۶). پژوهش‌های متعددی از این تکنیک برای تحلیل عدم قطعیت در مدل‌های مختلف استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال، کریمی و همکاران در سال ۲۰۲۲، چارچوبی برای ارزیابی تاثیر عدم قطعیت‌های پارامتریک بر پیش‌بینی عملکرد محصولات ارائه دادند که نشان داد تکنیک Bootstrap به تحلیل دقیق‌تر این عدم قطعیت‌ها کمک می‌کند (۱۷). گلوی و همکاران نیز در سال ۲۰۲۳ نشان دادند که این تکنیک در ترکیب با میانگین‌گیری از مدل‌های ترکیبی می‌تواند دقت پیش‌بینی جریان‌های آب را افزایش دهد (۱۸). همچنین، پارک و همکاران در سال ۲۰۲۰، در مطالعه‌ای از این روش برای تخمین بازه سیل طراحی در مخازن کشاورزی استفاده کردند که نتایج بهبود یافته‌ای در شرایط تغییرات اقلیمی به دست آمد (۱۹). علاوه بر این، آلتوف و همکاران در سال ۲۰۲۱، از تکنیک‌های درآب‌اوت و Bootstrap برای تحلیل عدم قطعیت در مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده کردند و نشان دادند که این روش به کاهش عدم قطعیت کمک می‌کند (۲۰). میرزاعلی‌پور و همکاران نیز در سال ۲۰۲۲، در مقایسه روش‌های Bootstrap و مونت کارلو به این نتیجه رسیدند که Bootstrap به دلیل سادگی و کارایی بالا گزینه مناسبی است (۲۱). تان و همکاران نیز در سال ۲۰۲۳ از این تکنیک برای تحلیل عدم قطعیت داده‌های اقلیمی در شبه‌جزیره مالزی استفاده کردند و نتایج دقیق‌تری در ارزیابی‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی به دست آوردند (۲۲). در نهایت، نگری و همکاران در سال ۲۰۲۴، قابلیت انتقال شبکه‌های باور بیزی (BBN) را با استفاده از داده‌های هیدروشمی و مدیریت اراضی در حوضه‌های مختلف کشاورزی بررسی کردند و نشان دادند که Bootstrap می‌تواند به بهبود ساختار مدل‌ها کمک کند (۲۳). در این مطالعه، عدم قطعیت نتایج شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop شامل زیست‌توده، تبخیر و تعرق، نیاز آبی و عملکرد گندم و ذرت با استفاده از داده‌های هواشناسی پایگاه‌های اقلیمی شبکه‌ای و در اقلیم‌های مختلف کشور، با روش Bootstrap محاسبه و ارزیابی خواهد شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

ایران با مساحت ۱/۶ میلیون کیلومتر مربع در نیمکره شمالی و بین عرض‌های ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول‌های ۴۴ تا ۶۳ درجه شرقی قرار دارد. این کشور از شمال به دریای خزر و از جنوب به خلیج فارس و دریای عمان متصل است. میانگین دمای سالانه ۱۸/۳۴ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی ۲۱۹ میلی‌متر است (۲۴). طبق طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن گسترش داده شده، ایران دارای هشت اقلیم از فراخشک تا بسیار مرطوب است (۲۵).

محصولات مختلفی مانند علوفه، سبزیجات و دانه‌ها کاربرد دارد. مدل از معادله دورنبوس و کسام که در سال ۱۹۷۹ ارائه شده (۳۱)، با اصلاحاتی برای تفکیک تبخیر و تعرق واقعی به تبخیر از سطح خاک و تعرق و تفکیک عملکرد به ماده خشک و شاخص برداشت استفاده می‌کند (۳۲). ورودی‌های مدل شامل داده‌های اقلیمی (بارش، دما، ET_0 و غلظت CO_2)، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه است. غلظت CO_2 بر اساس داده‌های پیش‌فرض مدل، اندازه‌گیری شده در رصدخانه Mauna Loa از سال ۱۹۰۲ تا ۲۰۹۹، استفاده شد (۳۲). در این تحقیق، آبیاری گندم و ذرت با تخلیه مجاز ۵۰ درصد رطوبت خاک تنظیم شد. داده‌های اقلیمی برای دوره ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹ جمع‌آوری و به مقیاس ماهانه تبدیل و تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) با معادله پنمن-مانتیت-فانو و نرم‌افزار EToCalculator (۳۳) محاسبه شد. سپس داده‌های اقلیمی وارد نرم افزار Aquacrop شدند.

روش Bootstrap در تحلیل عدم قطعیت

برای تحلیل عدم قطعیت داده‌های شبیه‌سازی مدل AquaCrop از روش Bootstrap با نرم‌افزار SPSS استفاده شد. این روش آماری غیرپارامتریک با نمونه‌گیری مکرر، عدم قطعیت پارامترها و پیش‌بینی‌ها را برآورد می‌کند. در این تحقیق، ۱۰۰۰ تکرار انجام و باند‌های اطمینان ۹۵ درصدی محاسبه شد. همچنین، از روش BCa برای تصحیح اریبی و تغییرپذیری استفاده شد. سپس، شاخص‌های p-factor و d-factor برای ارزیابی دقت پیش‌بینی‌ها محاسبه شدند.

معیارهای ارزیابی عدم قطعیت

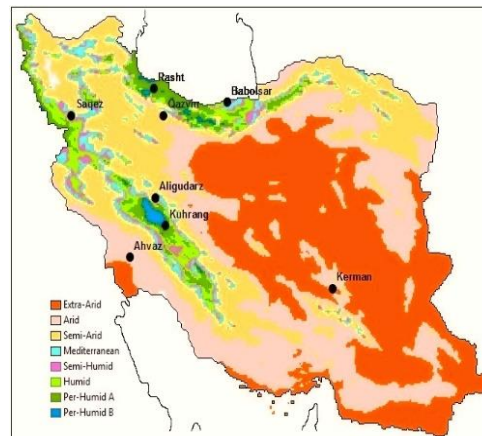
در این تحقیق، برای ارزیابی عدم قطعیت مدل AquaCrop از دو شاخص p-factor و d-factor استفاده شد. شاخص p-factor درصد داده‌های مشاهده‌ای در باند پیش‌بینی عدم قطعیت ۹۵ درصدی را نشان می‌دهد و شاخص d-factor نسبت میانگین ضخامت باند عدم قطعیت به انحراف استاندارد داده‌های مشاهده‌ای را ارزیابی می‌کند. مقادیر p-factor بین صفر تا ۱۰۰ درصد و d-factor بین صفر و بینهایت متغیر است. شبیه‌سازی بهتر زمانی است که p-factor نزدیک به ۱۰۰ و d-factor نزدیک به صفر باشد (۳۴).

روش رتبه‌بندی Ranking Based Method

این تحقیق از روش Ranking Based Method برای رتبه‌بندی پایگاه‌های داده بر اساس شاخص‌های p-factor و d-factor استفاده کرده است. پایگاه‌هایی با p-factor بالاتر (پوشش بیشتر داده‌های مشاهده‌ای) و d-factor کمتر (باند عدم قطعیت باریک‌تر) در رتبه بالاتری قرار گرفتند. این روش به شناسایی پایگاه‌های داده با عملکرد بهینه کمک کرده و آن‌ها را به‌عنوان منابع داده‌ای معتبر برای پیش‌بینی‌های مدل معرفی می‌کند.

ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب

برای بررسی عدم قطعیت ناشی از داده‌های اقلیمی شبکه‌بندی شده در شبیه‌سازی عملکرد محصولات با مدل AquaCrop، ۸ ایستگاه سینوپتیک با دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۹-۲۰۱۹) انتخاب شدند. این ایستگاه‌ها شامل کرمان (فراخشک)، اهواز (خشک)، قزوین (نیمه‌خشک)، الیگودرز (مدیترانه‌ای)، سقز (نیمه‌مرطوب)، بابلسر (مرطوب)، رشت (بسیار مرطوب نوع A) و کوهرنگ (بسیار مرطوب نوع B) هستند (شکل ۱). داده‌های بارش، دمای حداقل و حداکثر، دمای نقطه شبنم و تابش برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق از سازمان هواشناسی دریافت شد.



شکل ۱- توزیع مکانی ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب در اقلیم‌های مختلف ایران

پایگاه‌های اقلیمی شبکه‌بندی شده

این مطالعه از پایگاه‌هایی مانند CRU TS4.05، CPC Global، ERA5، ERA-Interim، Unified، MERRA-2 استفاده می‌کند که داده‌های اقلیمی برای شبیه‌سازی متغیرهای آگروهیدرولوژیک با مدل AquaCrop را فراهم می‌کنند. هر پایگاه داده‌های اقلیمی نظیر بارش، دما، رطوبت و سرعت باد را با تفکیک مکانی و زمانی مختلف ارائه می‌دهد. پایگاه CRU TS4.05 که یک پایگاه مبتنی بر اندازه‌گیری زمینی است، داده‌های ماهانه اقلیمی از سال ۱۹۰۱ تا ۲۰۲۰ را با تفکیک $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ درجه، پایگاه CPC Global، داده‌های بارش و دمای روزانه جهانی از سال ۱۹۷۹ تاکنون را با تفکیک مشابه (۲۶)، پایگاه ERA-Interim، داده‌های اقلیمی بازتحلیل شده از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۹ را با تفکیک $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ تا $3^\circ \times 3^\circ$ درجه (۲۷)، پایگاه ERA5، نسل پنجم بازتحلیل داده‌های اقلیمی ECMWF، داده‌های اقلیمی از سال ۱۹۵۰ تاکنون با دقت $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ درجه (۲۸) و MERRA-2، داده‌های بازتحلیل شده از سال ۱۹۸۰ تاکنون را با تفکیک $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ درجه ارائه می‌دهند (۲۹).

مدل Aquacrop

مدل Aquacrop که توسط سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) توسعه یافته، ابزاری جامع برای شبیه‌سازی رشد گیاهان با استفاده از داده‌های اقلیمی طولانی‌مدت است (۳۰). این مدل برای

نتایج و بحث

تحلیل عدم قطعیت مدل AquaCrop با روش Bootstrap

در این پژوهش، باند عدم قطعیت ۹۵ درصدی برای ارزیابی داده‌های شبیه‌سازی شده مدل AquaCrop با روش Bootstrap و نرم‌افزار SPSS محاسبه شد. تنظیمات شامل ۱۰۰۰ تکرار و فاصله اطمینان ۹۵ درصدی با روش BCa بود که تصحیحات اریبی و شتاب را در نظر گرفت. این تنظیمات دقت فاصله اطمینان را افزایش داده و محدوده‌ای با احتمال ۹۵ درصد برای میانگین واقعی داده‌ها ارائه می‌دهند. سپس، نتایج Bootstrap برای خروجی‌های مدل به‌صورت تفکیک‌شده ارائه و

رتبه‌بندی پایگاه‌ها با شاخص‌های p-factor و d-factor و روش Ranking Based Method انجام شد.

تحلیل عدم قطعیت با روش Bootstrap به صورت جزء به جزء (عدم قطعیت هر پایگاه در هر ایستگاه به تفکیک)

این بخش به تحلیل عدم قطعیت خروجی‌های مدل AquaCrop با روش Bootstrap به تفکیک پایگاه‌ها و ایستگاه‌های مختلف اقلیمی می‌پردازد. نتایج برای متغیرهای زیست‌توده ذرت و گندم در پایگاه‌ها و ایستگاه‌های مختلف در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- نتایج عدم قطعیت زیست‌توده ذرت و گندم پایگاه‌ها در ایستگاه‌های مختلف با روش Bootstrap

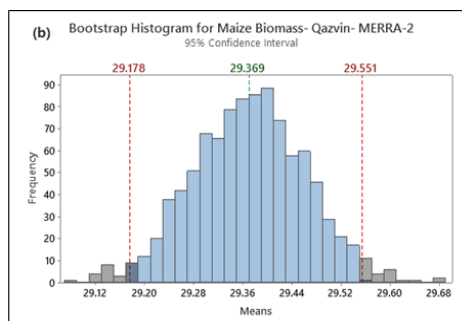
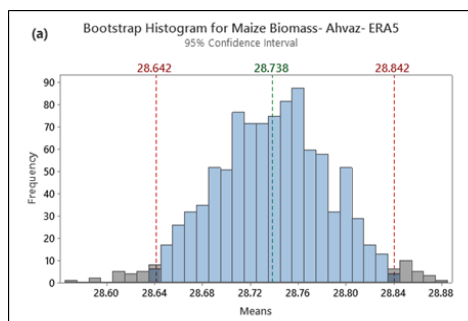
ایستگاه	پایگاه	ذرت				گندم			
		Upper bound	Lower bound	p-factor %	d-factor	Upper bound	Lower bound	p-factor %	d-factor
اهواز	CPC GLOBAL	29/198	29/431	13/33	0/58	16/891	17/381	40/00	0/83
	CRU	29/063	29/251	13/33	0/47	17/115	17/557	30/00	0/75
	ERA-INTERIM	28/635	28/841	23/33	0/52	17/452	17/909	23/33	0/78
	ERA5	28/642	28/842	23/33	0/50	17/082	17/529	33/33	0/76
	MERRA-2	28/708	28/924	23/33	0/54	17/249	17/770	26/67	0/89
الیگودرز	CPC GLOBAL	29/750	29/932	13/33	0/61	16/367	16/998	20/00	0/59
	CRU	29/744	29/977	13/33	0/78	16/338	16/899	20/00	0/53
	ERA-INTERIM	29/620	29/842	23/33	0/74	15/992	16/557	20/00	0/53
	ERA5	29/538	29/755	36/67	0/73	16/203	16/939	23/33	0/69
	MERRA-2	28/929	29/238	16/67	1/03	16/242	16/874	23/33	0/59
بابلسر	CPC GLOBAL	30/071	30/262	23/33	0/71	18/032	19/075	20/00	0/79
	CRU	29/772	30/003	30/00	0/86	17/301	18/107	16/67	0/61
	ERA-INTERIM	29/978	30/208	20/00	0/85	16/576	17/468	20/00	0/68
	ERA5	29/961	30/151	20/00	0/70	18/541	19/443	23/33	0/69
	MERRA-2	29/511	29/737	10/00	0/84	17/448	18/564	23/33	0/85
کرمان	CPC GLOBAL	29/396	29/703	36/67	0/80	15/913	16/624	26/67	0/80
	CRU	28/818	29/219	30/00	1/04	15/617	16/178	23/33	0/63
	ERA-INTERIM	28/926	29/155	10/00	0/59	15/224	15/917	26/67	0/78
	ERA5	28/996	29/278	23/33	0/73	15/507	16/273	33/33	0/86
	MERRA-2	28/592	28/875	16/67	0/74	15/573	16/202	26/67	0/71
کوهرنگ	CPC GLOBAL	29/540	29/748	23/33	0/50	16/455	17/086	30/00	0/61
	CRU	29/602	29/850	23/33	0/60	16/225	16/743	20/00	0/50
	ERA-INTERIM	29/662	29/864	13/33	0/49	16/128	16/765	23/33	0/62
	ERA5	28/863	29/317	23/33	1/09	15/306	15/735	3/33	0/42
	MERRA-2	29/116	29/465	23/33	0/84	16/155	16/704	16/67	0/53
قزوین	CPC GLOBAL	29/876	30/062	23/33	0/64	15/802	16/571	23/33	0/71
	CRU	29/899	30/114	23/33	0/74	15/297	15/920	20/00	0/57
	ERA-INTERIM	29/741	30/050	40/00	1/06	15/770	16/500	20/00	0/67
	ERA5	29/774	30/003	30/00	0/78	15/370	16/100	13/33	0/67
	MERRA-2	29/178	29/551	10/00	1/28	15/611	16/104	13/33	0/45
رشت	CPC GLOBAL	30/089	30/265	20/00	0/71	17/939	19/234	16/67	0/76
	CRU	29/734	29/944	16/67	0/84	17/382	18/370	16/67	0/58
	ERA-INTERIM	29/931	30/150	20/00	0/88	16/889	18/023	23/33	0/66
	ERA5	30/061	30/265	23/33	0/82	17/519	18/885	26/67	0/80
	MERRA-2	29/730	29/929	16/67	0/80	18/437	19/632	16/67	0/70
سقز	CPC GLOBAL	29/711	29/938	23/33	0/52	16/446	17/213	33/33	0/90
	CRU	29/772	30/039	33/33	0/61	16/062	16/603	23/33	0/63
	ERA-INTERIM	29/614	29/874	13/33	0/59	15/740	16/317	6/67	0/67
	ERA5	29/587	29/814	10/00	0/52	15/953	16/634	33/33	0/80
	MERRA-2	29/086	29/396	30/00	0/71	15/804	16/401	6/67	0/70

همه خروجی‌های شبیه‌سازی شده مدل Aquacrop، باند اطمینان باریک بوده و درصد کمی از داده‌های مشاهده‌ای در محدوده باند عدم

نتایج جدول ۱ حاکی از این است که به طور کلی روش Bootstrap، مقادیر p-factor و d-factor کمتری دارد. در روش Bootstrap

CPC Global با عدم قطعیت کمتر در ۶ از ۸ ایستگاه و پس از آن پایگاه ERA5 با عدم قطعیت کمتر در ۴ از ۸ ایستگاه، عملکرد بهتری نسبت به سایر پایگاه‌ها نشان داده‌اند. در مقابل، پایگاه MERRA-2 بیشترین عدم قطعیت در ۵ از ۸ ایستگاه، ضعیف‌ترین عملکرد را در شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت در مقایسه با سایر پایگاه‌ها داشته است. پایگاه‌های ERA5 و CPC Global به دلیل کیفیت و دقت بالایی داده‌ها، عدم قطعیت کمتری نسبت به سایر پایگاه‌ها دارند و شبیه‌سازی‌های دقیق‌تری ارائه می‌دهند. ERA5 به‌ویژه با بهبود وضوح مکانی و زمانی، عملکرد بهتری نسبت به ERA-Interim دارد. در مقابل، پایگاه MERRA-2 به دلیل کیفیت پایین داده‌ها، عدم قطعیت بیشتری نشان می‌دهد که بر نتایج مدل AquaCrop تأثیر منفی می‌گذارد. این نتایج با یافته‌های مطالعه‌ی تارک و همکاران که در سال ۲۰۲۰ انجام دادند، همخوانی دارد (۳۵).

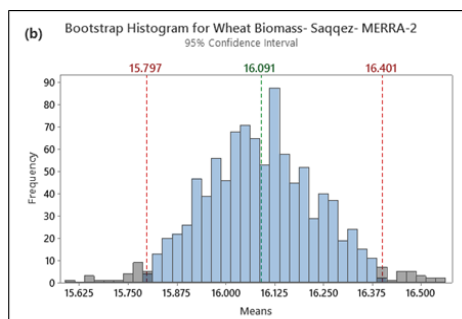
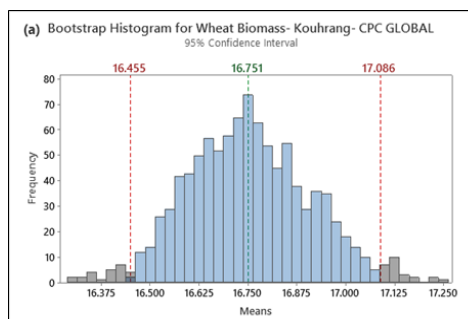
قطعیت ۹۵ درصد قرار می‌گیرند. مقادیر کمتر p-factor و d-factor در روش Bootstrap به چند دلیل اصلی مرتبط است. اولاً، روش Bootstrap بر نمونه‌گیری مکرر از داده‌های مشاهده‌ای تمرکز دارد و به همین دلیل باندهای عدم قطعیت تنگ‌تری ارائه می‌دهد. این روش تنها عدم قطعیت آماری داده‌های ورودی را در نظر می‌گیرد، که می‌تواند منجر به مقادیر کمتر p-factor و d-factor کمتری شود. همچنین، Bootstrap به دلیل تمرکز بر داده‌های واقعی ممکن است باندهای عدم قطعیت کوچک‌تری را نشان دهد. با مقایسه پایگاه‌ها در ایستگاه‌های مختلف مشخص می‌شود که بالاترین رتبه و کمترین عدم قطعیت برای متغیر زیست‌توده ذرت به پایگاه ERA5 در ایستگاه اهواز با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۲۳/۳۳ درصد و ۰/۵ مربوط می‌شود، در حالی که پایین‌ترین رتبه و بیشترین عدم قطعیت به پایگاه MERRA-2 در ایستگاه قزوین با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۱۰ درصد و ۱/۲۸ اختصاص دارد (شکل ۱). به‌طور کلی، پایگاه



شکل ۱- نمودار توزیع فراوانی داده‌های زیست‌توده ذرت با روش بوت‌استرپ؛ مقایسه کمترین (a) و بیشترین (b) عدم قطعیت در پایگاه‌ها و ایستگاه‌های مختلف

از ۸ ایستگاه و پس از آن پایگاه ERA5 در ۲ از ۸ ایستگاه، عملکرد بهتری نسبت به سایر پایگاه‌ها داشته‌اند. در مقابل، پایگاه CPC Global در ۴ از ۸ ایستگاه و پایگاه MERRA-2 در ۳ از ۸ ایستگاه، عدم قطعیت بیشتر و عملکرد ضعیف‌تری در مقایسه با دیگر پایگاه‌ها نشان داده‌اند.

در مورد متغیر زیست‌توده گندم، بالاترین رتبه و کمترین عدم قطعیت مربوط به پایگاه CPC Global در ایستگاه کوه‌رنگ با مقادیر p-factor و d-factor برابر با ۳۰ و ۰/۶۱ است، در حالی که بیشترین عدم قطعیت برای این متغیر در پایگاه MERRA-2 در ایستگاه سقز با مقادیر p-factor و d-factor برابر با ۶/۶۷ و ۰/۷ مشاهده شده است (شکل ۲). برای زیست‌توده گندم، پایگاه CRU TS با عدم قطعیت کمتر در ۶



شکل ۲- نمودار توزیع فراوانی داده‌های زیست‌توده گندم با روش بوت‌استرپ؛ مقایسه کمترین (a) و بیشترین (b) عدم قطعیت در پایگاه‌ها و ایستگاه‌های مختلف

در تحلیل عدم قطعیت زیست‌توده برای محصولات ذرت و گندم، نتایج نشان می‌دهد که پایگاه‌های مختلف داده تأثیر متفاوتی بر شبیه‌سازی این متغیرها دارند. با این که پایگاه CPC Global در شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت و پایگاه CRU TS در شبیه‌سازی زیست‌توده گندم به‌طور نسبی عدم قطعیت کمتری نسبت به سایر پایگاه‌ها دارند، به‌طور کلی نتایج روش Bootstrap نشان می‌دهد که پایگاه ERA5 کمترین عدم قطعیت و پایدارترین عملکرد را در شبیه‌سازی زیست‌توده هر دو محصول ذرت و گندم ارائه داده است. این یافته‌ها تأکید می‌کند که انتخاب مناسب پایگاه داده برای شبیه‌سازی‌های اقلیمی می‌تواند تأثیر

قابل توجهی بر دقت نتایج مدل‌سازی داشته باشد و بنابراین، پایگاه‌های داده با عملکرد پایدارتر باید در مطالعات آینده ترجیح داده شوند. Navidi Nassaj و همکاران (۲۰۲۲) نیز با تأیید این موضوع، دقت ERA5 را به کیفیت داده‌ها و الگوریتم‌های محاسباتی پیشرفته مرتبط دانسته‌اند؛ داده‌های دقیق‌تر ERA5 موجب ارتقاء دقت پیش‌بینی‌های مدل AquaCrop می‌شود (۳۶).

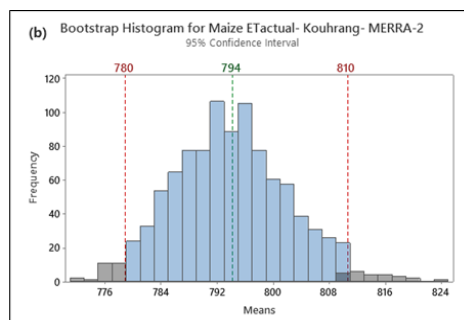
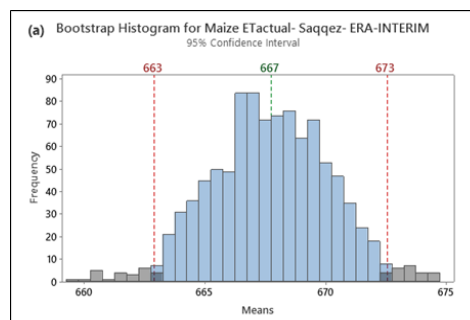
نتایج به‌دست‌آمده از روش Bootstrap برای متغیرهای تبخیر و تعرق واقعی ذرت و گندم از پایگاه‌های مختلف در ایستگاه‌های منتخب، در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج عدم قطعیت تبخیر و تعرق واقعی ذرت و گندم پایگاه‌ها در ایستگاه‌های مختلف با روش Bootstrap

ایستگاه	پایگاه	ذرت				گندم			
		d-factor	p-factor %	Upper bound	Lower bound	d-factor	p-factor %	Upper bound	Lower bound
اهواز	CPC GLOBAL	0/69	26/67	364	344	0/68	20/00	615	572
	CRU	0/38	20/00	360	349	0/10	10/00	553	547
	ERA-INTERIM	0/77	6/67	443	421	0/50	0/00	827	795
	ERA5	0/95	6/67	443	416	0/44	0/00	854	826
	MERRA-2	0/87	0/00	598	572	0/67	0/00	1132	1089
الیگودرز	CPC GLOBAL	0/64	13/33	620	577	0/27	0/00	623	603
	CRU	0/41	23/33	710	682	0/21	0/00	597	581
	ERA-INTERIM	0/46	16/67	665	634	0/16	0/00	670	659
	ERA5	0/46	30/00	695	664	0/20	0/00	668	653
	MERRA-2	0/59	6/67	823	784	0/77	3/33	996	940
بابلسر	CPC GLOBAL	0/55	16/67	344	332	0/73	23/33	456	435
	CRU	0/61	20/00	346	332	0/24	0/00	551	543
	ERA-INTERIM	0/78	0/00	464	447	0/58	23/33	472	455
	ERA5	0/41	16/67	351	342	0/49	16/67	497	482
	MERRA-2	0/80	0/00	534	517	0/78	0/00	672	649
کرمان	CPC GLOBAL	1/36	0/00	618	572	0/42	6/67	619	590
	CRU	1/11	16/67	794	756	0/69	26/67	743	695
	ERA-INTERIM	0/86	10/00	697	667	0/63	3/33	794	751
	ERA5	0/88	20/00	714	684	0/73	30/00	707	657
	MERRA-2	1/39	0/00	944	896	0/85	0/00	983	925
کوهرنگ	CPC GLOBAL	1/21	50/00	697	627	0/72	3/33	595	571
	CRU	0/55	0/00	804	772	0/58	0/00	624	605
	ERA-INTERIM	0/39	10/00	577	554	0/25	0/00	639	631
	ERA5	0/66	0/00	833	795	0/42	3/33	579	565
	MERRA-2	0/67	0/00	830	791	0/90	0/00	810	780
قزوین	CPC GLOBAL	0/90	50/00	625	581	0/96	26/67	629	601
	CRU	0/58	10/00	660	632	0/27	10/00	599	591
	ERA-INTERIM	0/72	40/00	619	584	0/61	0/00	574	557
	ERA5	0/69	0/00	724	690	0/50	6/67	677	662
	MERRA-2	0/68	0/00	948	914	0/76	0/00	753	731
رشت	CPC GLOBAL	0/87	13/33	336	318	0/80	33/33	450	425
	CRU	0/62	10/00	331	319	0/24	0/00	535	528
	ERA-INTERIM	0/80	0/00	430	413	0/46	6/67	491	476
	ERA5	0/79	0/00	365	348	0/60	16/67	471	453
	MERRA-2	0/78	0/00	446	430	0/53	0/00	593	576
سقز	CPC GLOBAL	1/24	16/67	649	554	0/84	3/33	622	572
	CRU	0/45	16/67	697	663	0/16	0/00	615	606
	ERA-INTERIM	0/50	16/67	746	707	0/17	16/67	673	663
	ERA5	0/55	23/33	728	686	0/20	6/67	691	679
	MERRA-2	0/70	0/00	948	895	0/70	0/00	973	932

نتایج بررسی عدم قطعیت با استفاده از روش Bootstrap برای متغیرهای تبخیر و تعرق ذرت و گندم نشان می‌دهد که عملکرد

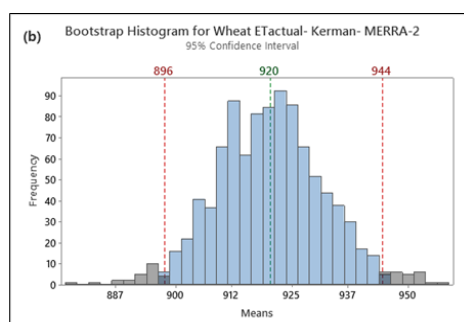
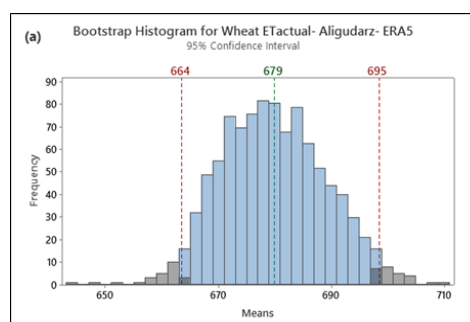
درصد و ۰/۹، پایین‌ترین رتبه و بیشترین عدم قطعیت را نشان داده است (شکل ۳). به‌طور کلی، پایگاه ERA-Interim با عدم قطعیت کمتر در ۴ ایستگاه از مجموع ۸ ایستگاه و پایگاه CRU TS با عدم قطعیت کمتر در ۳ ایستگاه از ۸ ایستگاه، عملکرد بهتری نسبت به سایر پایگاه‌ها در شبیه‌سازی تبخیر و تعرق ذرت نشان داده‌اند. در مقابل، پایگاه MERRA-2 با عدم قطعیت بالا در هر ۸ ایستگاه، ضعیف‌ترین عملکرد را ارائه داده است.



شکل ۳- نمودار توزیع فراوانی داده‌های تبخیر و تعرق ذرت با روش بوت‌استرپ؛ مقایسه کمترین (a) و بیشترین (b) عدم قطعیت در پایگاه‌ها و ایستگاه‌های مختلف

پایگاه CRU TS با عدم قطعیت کمتر در ۵ ایستگاه از مجموع ۸ ایستگاه و پایگاه ERA5 با عدم قطعیت کمتر در ۳ ایستگاه از ۸ ایستگاه، بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی تبخیر و تعرق گندم داشته‌اند. در مقابل، پایگاه MERRA-2 با بالاترین میزان عدم قطعیت در ۶ ایستگاه، عملکرد ضعیف‌تری داشته است.

برای تبخیر و تعرق گندم، پایگاه ERA5 در ایستگاه الیگودرز با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۳۰ درصد و ۰/۴۶، بالاترین رتبه و کمترین عدم قطعیت را داشته است، در حالی که پایگاه MERRA-2 در ایستگاه کرمان با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۰ درصد و ۱/۳۹، پایین‌ترین رتبه و بیشترین عدم قطعیت را به نمایش گذاشته است (شکل ۴). به‌طور کلی،



شکل ۴- نمودار توزیع فراوانی داده‌های تبخیر و تعرق گندم با روش بوت‌استرپ؛ مقایسه کمترین (a) و بیشترین (b) عدم قطعیت در پایگاه‌ها و ایستگاه‌های مختلف

ERA5 و CRU TS به‌عنوان گزینه‌های معتبرتر برای مدل‌سازی تبخیر و تعرق ذرت و گندم پیشنهاد می‌شوند، زیرا توانسته‌اند عدم قطعیت کمتری را در شبیه‌سازی این متغیرها ارائه دهند و در بیشتر ایستگاه‌ها عملکرد بهتری داشته‌اند. این یافته‌ها با نتایج مطالعه‌ی مو و همکاران که در سال ۲۰۱۱ انجام داده‌اند، مطابقت دارد، که نشان داده‌اند انتخاب داده‌های مناسب می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر دقت مدل‌سازی تبخیر و تعرق داشته باشد (۳۷). به‌طور کلی، نتایج این مطالعه اهمیت انتخاب

نتایج تحلیل با استفاده از روش Bootstrap نشان می‌دهد که پایگاه‌های ERA-Interim، ERA5 و CRU TS نسبت به سایر پایگاه‌ها به‌طور کلی عدم قطعیت کمتری برای تبخیر و تعرق ذرت و گندم دارند. در مقابل، پایگاه MERRA-2 به‌دلیل بالاترین میزان عدم قطعیت در اکثر ایستگاه‌ها، عملکرد ضعیف‌تری دارد. این نتایج تأکید می‌کنند که انتخاب پایگاه داده مناسب می‌تواند تأثیر زیادی بر دقت شبیه‌سازی‌های تبخیر و تعرق داشته باشد. پایگاه‌های ERA-Interim،

مختلف در ایستگاه‌های منتخب با استفاده از روش Bootstrap ارائه شده است.

دقیق پایگاه داده را به‌خوبی نشان می‌دهند و بر لزوم استفاده از داده‌های دقیق و روش‌های مدرن تحلیل عدم قطعیت تأکید می‌کنند. در جدول ۳، نتایج مربوط به عدم قطعیت نیاز آبی ذرت و گندم از پایگاه‌های

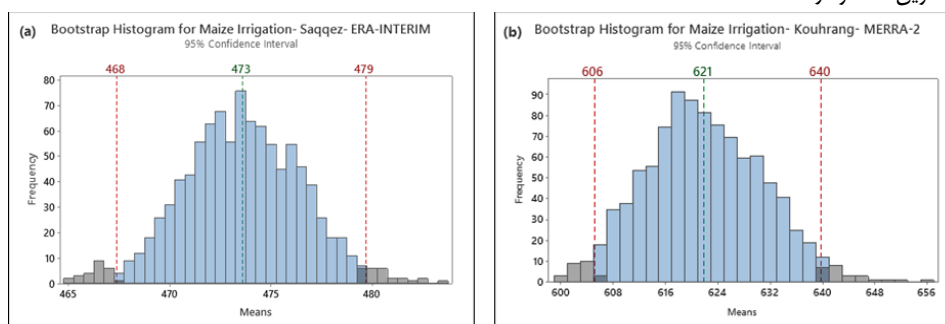
جدول ۳- نتایج عدم قطعیت نیاز آبی ذرت و گندم پایگاه‌ها در ایستگاه‌های مختلف با روش Bootstrap

ایستگاه	پایگاه	ذرت				گندم			
		Upper bound	Lower bound	p-factor %	d-factor	Upper bound	Lower bound	p-factor %	d-factor
اهواز	CPC GLOBAL	368	415	26/67	0/70	368	138	13/33	0/52
	CRU	349	361	3/33	0/18	122	91	36/67	0/58
	ERA-INTERIM	598	635	0/00	0/55	192	136	33/33	1/05
	ERA5	622	653	0/00	0/47	194	131	40/00	1/18
	MERRA-2	894	943	0/00	0/73	395	350	0/00	0/85
الیگودرز	CPC GLOBAL	421	438	0/00	0/23	356	314	36/67	0/56
	CRU	353	373	0/00	0/26	356	318	33/33	0/51
	ERA-INTERIM	471	483	3/33	0/15	367	332	30/00	0/47
	ERA5	474	490	3/33	0/20	419	383	6/67	0/48
	MERRA-2	766	827	3/33	0/80	582	526	3/33	0/76
بابلسر	CPC GLOBAL	150	187	36/67	0/67	91	62	33/33	0/77
	CRU	368	375	0/00	0/14	175	161	0/00	0/38
	ERA-INTERIM	181	208	10/00	0/49	146	114	6/67	0/89
	ERA5	201	229	6/67	0/48	78	53	23/33	0/67
	MERRA-2	368	412	0/00	0/79	258	216	0/00	1/14
کرمان	CPC GLOBAL	416	443	6/67	0/39	443	399	3/33	0/89
	CRU	522	569	26/67	0/68	586	552	10/00	0/70
	ERA-INTERIM	571	616	6/67	0/65	496	462	0/00	0/68
	ERA5	483	533	26/67	0/72	530	502	23/33	0/57
	MERRA-2	760	817	0/00	0/82	779	735	0/00	0/91
کوهرنگ	CPC GLOBAL	391	416	0/00	0/75	437	384	10/00	0/83
	CRU	365	391	13/33	0/78	436	387	6/67	0/77
	ERA-INTERIM	451	459	0/00	0/26	297	261	13/33	0/56
	ERA5	365	381	3/33	0/48	472	446	0/00	0/40
	MERRA-2	606	640	0/00	1/02	590	543	0/00	0/74
قزوین	CPC GLOBAL	389	416	23/33	0/78	346	302	20/00	0/68
	CRU	382	394	6/67	0/36	376	351	6/67	0/40
	ERA-INTERIM	291	321	0/00	0/84	273	227	20/00	0/71
	ERA5	453	471	20/00	0/50	387	345	10/00	0/64
	MERRA-2	485	526	6/67	1/19	622	583	0/00	0/61
رشت	CPC GLOBAL	96	130	16/67	0/60	64	36	13/33	0/87
	CRU	351	359	0/00	0/14	125	108	0/00	0/51
	ERA-INTERIM	173	197	3/33	0/43	114	84	3/33	0/94
	ERA5	34	69	20/00	0/61	25	11	10/00	0/44
	MERRA-2	234	282	0/00	0/86	129	89	3/33	1/25
سقز	CPC GLOBAL	377	429	10/00	0/82	353	276	16/67	0/83
	CRU	394	407	3/33	0/20	365	329	10/00	0/38
	ERA-INTERIM	468	479	26/67	0/17	411	370	16/67	0/44
	ERA5	488	500	3/33	0/20	397	345	20/00	0/55
	MERRA-2	752	798	0/00	0/73	669	605	0/00	0/68

مقابل، بالاترین عدم قطعیت نیاز آبی ذرت، در ایستگاه کوهرنگ و مربوط به پایگاه MERRA-2 است که مقادیر p-factor و d-factor آن به ترتیب صفر درصد و ۱/۰۲ می‌باشد (شکل ۵- ب). این نشان می‌دهد که پایگاه MERRA-2 در این ایستگاه دقت کمتری در پیش‌بینی نیاز آبی ذرت داشته و عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان داده است. در مجموع برای نیاز آبی ذرت، همه پایگاه‌های داده به جز پایگاه MERRA-2 عملکرد مشابهی از نظر عدم قطعیت، رتبه و عملکرد داشته‌اند و هر کدام در چند ایستگاه حائز رتبه برتر شده بودند ولی پایگاه

با مشاهده‌ی جدول ۳، که نتایج عدم قطعیت نیاز آبی ذرت و گندم با روش Bootstrap را نشان می‌دهد، مشخص می‌شود که بالاترین رتبه و کمترین میزان عدم قطعیت برای نیاز آبی ذرت، مربوط به پایگاه ERA-Interim در ایستگاه سقز با p-factor و d-factor به ترتیب ۲۶/۶۷ درصد و ۰/۱۷ می‌باشد (شکل ۵- الف). این به این معنی است که پیش‌بینی نیاز آبی ذرت با استفاده از پایگاه ERA-Interim در این ایستگاه از دقت بالایی برخوردار است. به عبارت دیگر، این پایگاه در این ایستگاه عملکرد بهتری در پیش‌بینی نیاز آبی ذرت داشته است. در

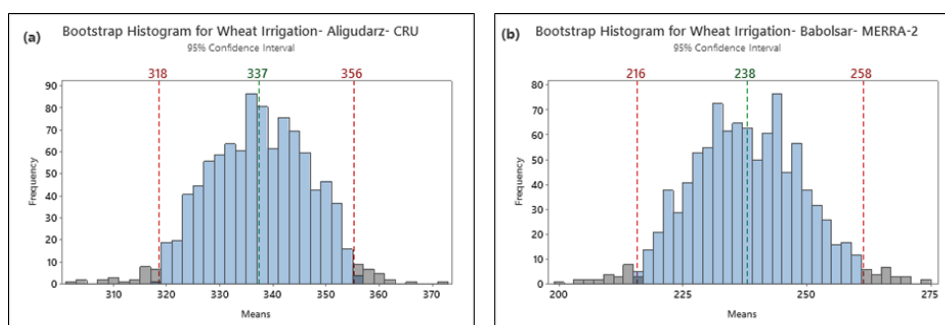
MERRA-2 در ۶ ایستگاه پایین‌ترین رتبه و بیشترین عدم قطعیت را نشان داده و ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است.



شکل ۵- نمودار توزیع فراوانی داده‌های نیاز آبی ذرت با روش بوت‌استرپ؛ مقایسه کمترین (a) و بیشترین (b) عدم قطعیت در پایگاه‌ها و ایستگاه‌های مختلف

گندم، پایگاه ERA5 با داشتن بالاترین رتبه و کمترین عدم قطعیت در ۴ ایستگاه از ۸ ایستگاه، نسبت به سایر پایگاه‌ها عملکرد بهتری داشته است، در حالی که پایگاه MERRA-2 در همه‌ی ۸ ایستگاه مورد بررسی، بیشترین عدم قطعیت و ضعیف‌ترین عملکرد را از خود نشان داده است. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعه‌ی Ogunsola و همکاران (۲۰۲۴) همخوانی داشته و بیانگر آن است که کیفیت داده‌های ورودی نقش چشمگیری در میزان دقت برآورد نیاز آبی ایفا می‌کند (۳۸).

در مورد نیاز آبی گندم، پایگاه CRU TS در ایستگاه الیگودرز با p-factor و d-factor به ترتیب ۳۳/۳۳ و ۰/۵۱، بهترین رتبه و کمترین میزان عدم قطعیت را به خود اختصاص داده است (شکل ۶- الف). این پایگاه توانسته است پیش‌بینی‌های دقیقی برای نیاز آبی گندم ارائه دهد. در مقابل، بالاترین میزان عدم قطعیت برای نیاز آبی گندم در ایستگاه بابلسر و مربوط به پایگاه MERRA-2 است که مقادیر p-factor و d-factor آن به ترتیب صفر و ۱/۱۴ است (شکل ۶- ب). این نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های پایگاه MERRA-2 برای نیاز آبی گندم در این ایستگاه از دقت پایین‌تری برخوردار است. در کل برای نیاز آبی



شکل ۶- نمودار توزیع فراوانی داده‌های نیاز آبی گندم با روش بوت‌استرپ؛ مقایسه کمترین (a) و بیشترین (b) عدم قطعیت در پایگاه‌ها و ایستگاه‌های مختلف

شرایط محلی و مدل‌سازی به‌روز باشد. داده‌های این پایگاه‌ها با روش‌های دقیق تولید می‌شوند که خطا و عدم قطعیت را کاهش می‌دهد. همچنین، به‌روزرسانی داده‌ها برای دوره‌های طولانی و با وضوح مکانی مناسب به بهبود دقت مدل‌ها کمک می‌کند. تصحیحات پیشرفته در داده‌ها و تطابق بهتر با ویژگی‌های اقلیمی محلی نیز به افزایش دقت پیش‌بینی‌های مدل کمک می‌کند. به‌طور کلی، استفاده از داده‌های با کیفیت بالا به مدل آکواراپ امکان می‌دهد پیش‌بینی‌های دقیق‌تری ارائه دهد و عدم قطعیت را کاهش دهد. در بخش بعدی،

نتایج حاصل از روش Bootstrap در این تحقیق به وضوح نشان می‌دهد که پایگاه‌های داده ERA-Interim و ERA5 به طور کلی بهترین عملکرد را در مدل‌سازی نیاز آبی گندم و ذرت از خود نشان داده‌اند. این پایگاه‌ها به طور کلی قادر بوده‌اند پیش‌بینی‌های دقیقی ارائه دهند و به عنوان منابع معتبرتری برای تحلیل نیاز آبی در نظر گرفته شوند. عدم قطعیت پایین در پیش‌بینی نیاز آبی گندم و ذرت با استفاده از داده‌های اقلیمی پایگاه‌های ERA-Interim و ERA5 می‌تواند به دلیل دقت بالا، پوشش گسترده، تصحیحات پیشرفته، همخوانی بهتر با

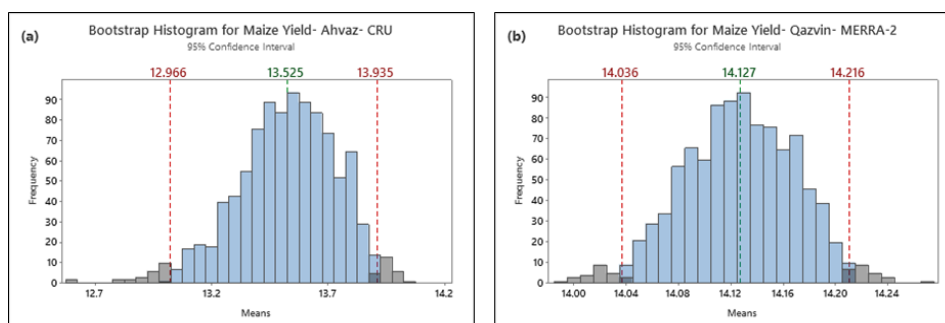
نتایج مربوط به عدم قطعیت متغیر عملکرد ذرت و گندم پایگاه‌های داده در ایستگاه‌های مختلف، با استفاده از روش Bootstrap بررسی خواهند شد. نتایج به دست آمده در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

جدول ۴- نتایج عدم قطعیت عملکرد ذرت و گندم پایگاه‌ها در ایستگاه‌های مختلف با روش Bootstrap

ایستگاه	پایگاه	ذرت				گندم			
		Lower bound	Upper bound	%	p-factor	d-factor	Lower bound	Upper bound	p-factor %
اهواز	CPC GLOBAL	10/935	13/550	13/33	0/83	8/110	8/346	40/00	0/83
	CRU	12/966	13/935	46/67	0/31	8/217	8/430	30/00	0/75
	ERA-INTERIM	10/764	13/284	13/33	0/80	8/380	8/599	23/33	0/77
	ERA5	9/801	12/701	16/67	0/92	8/202	8/416	33/33	0/76
	MERRA-2	6/291	9/217	6/67	0/93	8/284	8/535	26/67	0/89
الیگودرز	CPC GLOBAL	14/306	14/393	13/33	0/61	7/860	8/163	20/00	0/59
	CRU	14/301	14/414	16/67	0/78	7/847	8/115	20/00	0/52
	ERA-INTERIM	14/246	14/352	26/67	0/73	7/680	7/951	20/00	0/53
	ERA5	14/206	14/311	36/67	0/72	7/782	8/135	23/33	0/69
	MERRA-2	13/919	14/067	16/67	1/03	7/474	8/057	43/33	1/14
بابلسر	CPC GLOBAL	14/454	14/545	23/33	0/70	8/658	9/158	20/00	0/79
	CRU	14/315	14/426	23/33	0/85	8/307	8/694	16/67	0/61
	ERA-INTERIM	14/409	14/520	20/00	0/85	7/960	8/387	20/00	0/68
	ERA5	14/402	14/494	20/00	0/70	8/901	9/336	23/33	0/69
	MERRA-2	14/192	14/301	10/00	0/84	8/378	8/914	23/33	0/85
کرمان	CPC GLOBAL	14/136	14/283	36/67	0/79	7/643	7/982	26/67	0/79
	CRU	13/862	14/053	30/00	1/03	7/503	7/772	23/33	0/63
	ERA-INTERIM	13/913	14/023	10/00	0/59	7/312	7/645	26/67	0/78
	ERA5	13/945	14/079	23/33	0/72	7/449	7/816	33/33	0/86
	MERRA-2	13/757	13/893	13/33	0/73	7/484	7/786	26/67	0/71
کوهرنگ	CPC GLOBAL	14/203	14/304	20/00	0/51	7/902	8/205	30/00	0/61
	CRU	14/234	14/354	23/33	0/60	7/793	8/040	20/00	0/50
	ERA-INTERIM	14/264	14/362	13/33	0/49	7/745	8/050	23/33	0/62
	ERA5	13/878	14/096	23/33	1/10	7/352	7/557	3/33	0/42
	MERRA-2	14/008	14/176	20/00	0/84	7/759	8/024	16/67	0/53
قزوین	CPC GLOBAL	14/366	14/456	23/33	0/64	7/589	7/958	23/33	0/70
	CRU	14/376	14/480	23/33	0/73	7/346	7/646	23/33	0/57
	ERA-INTERIM	14/298	14/448	36/67	1/06	7/573	7/923	20/00	0/67
	ERA5	14/318	14/429	30/00	0/78	7/382	7/732	13/33	0/67
	MERRA-2	14/036	14/216	10/00	1/27	7/501	7/736	13/33	0/45
رشت	CPC GLOBAL	14/461	14/545	20/00	0/70	8/613	9/234	16/67	0/76
	CRU	14/295	14/396	20/00	0/84	8/346	8/819	16/67	0/58
	ERA-INTERIM	14/388	14/493	16/67	0/87	8/109	8/654	23/33	0/66
	ERA5	14/445	14/543	23/33	0/81	8/411	9/067	26/67	0/80
	MERRA-2	14/295	14/390	16/67	0/79	8/852	9/426	16/67	0/70
سقز	CPC GLOBAL	14/287	14/396	23/33	0/52	7/898	8/266	33/33	0/90
	CRU	14/316	14/445	33/33	0/61	7/714	7/973	23/33	0/63
	ERA-INTERIM	14/242	14/367	13/33	0/59	7/560	7/836	6/67	0/67
	ERA5	14/230	14/339	10/00	0/52	7/662	7/989	33/33	0/80
	MERRA-2	13/994	14/143	26/67	0/70	7/592	7/879	6/67	0/70

بر اساس نتایج جدول ۴، مشاهده می‌شود که پایگاه CRU TS در ایستگاه اهواز با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۴۶/۶۷ درصد و ۰/۳۱، بالاترین رتبه و کمترین عدم قطعیت را برای متغیر عملکرد ذرت داشته است (شکل ۷-الف). این امر نشان‌دهنده دقت بالای این پایگاه در پیش‌بینی عملکرد ذرت در این ایستگاه است، که به دلیل میزان عدم قطعیت کمتر، آن را به منبع قابل اتکاتری تبدیل می‌کند. در مقابل، پایین‌ترین رتبه و بیشترین عدم قطعیت مربوط به پایگاه MERRA-2 در ایستگاه قزوین با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۱۰ درصد و ۱/۲۷ بوده است که به معنای ضعف در دقت پیش‌بینی این پایگاه برای این ایستگاه خاص است (شکل ۷-ب). به طور کلی برای عملکرد ذرت، پایگاه CPC Global با کمترین عدم قطعیت در ۵ ایستگاه از ۸ ایستگاه، عملکرد بهتری نسبت به سایر پایگاه‌ها داشته است. این موضوع اهمیت زیادی دارد، زیرا کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های بهتر در مدیریت منابع کشاورزی کمک کند. پس از CPC Global، پایگاه‌های CRU TS و ERA5 به ترتیب در رتبه‌های بعدی

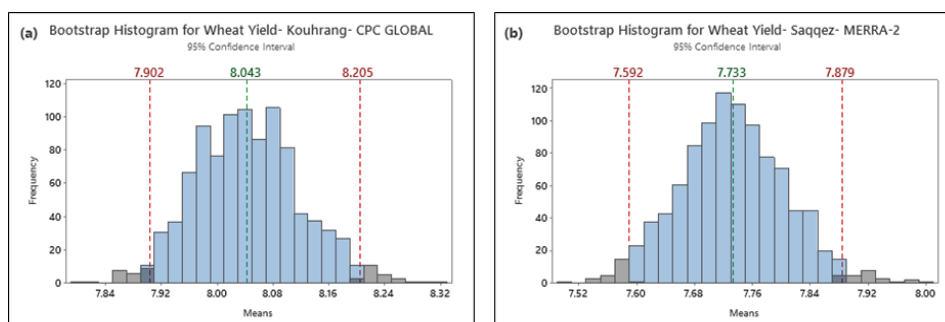
قرار می‌گیرند. در مقابل، پایگاه MERRA-2 بیشترین عدم قطعیت را در ۷ ایستگاه نشان داده است که نشان‌دهنده ضعف این پایگاه در مدل‌سازی عملکرد ذرت می‌باشد.



شکل ۷- نمودار توزیع فراوانی داده‌های عملکرد ذرت با روش بوت‌استرپ؛ مقایسه کمترین (a) و بیشترین (b) عدم قطعیت در پایگاه‌ها و ایستگاه‌های مختلف

می‌تواند به دلیل تفاوت در روش‌های جمع‌آوری داده‌ها، زمان‌بندی مشاهده‌ها، یا محدودیت‌های مکانی و زمانی داده‌های این پایگاه باشد. به طور کلی برای عملکرد گندم، پایگاه CRU TS با داشتن کمترین عدم قطعیت در ۶ ایستگاه از ۸ ایستگاه عملکرد بهتری نسبت به دیگر پایگاه‌ها دارد، در حالی که پایگاه MERRA-2 با بیشترین عدم قطعیت در ۴ ایستگاه ضعیف‌تر عمل کرده است.

برای متغیر عملکرد گندم، بالاترین رتبه و کمترین عدم قطعیت مربوط به پایگاه CPC Global در ایستگاه کوه‌رنگ با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۳۰ و ۰/۶۱ است (شکل ۸-الف)، این موضوع نشان می‌دهد که این پایگاه در پیش‌بینی عملکرد گندم در این ایستگاه خاص، دقت بالاتری داشته است. در مقابل، پایین‌ترین رتبه و بیشترین عدم قطعیت به پایگاه MERRA-2 در ایستگاه سقز با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۶/۶۷ و ۰/۷ تعلق دارد (شکل ۸-ب). این تفاوت



شکل ۸- نمودار توزیع فراوانی داده‌های عملکرد گندم با روش بوت‌استرپ؛ مقایسه کمترین (a) و بیشترین (b) عدم قطعیت در پایگاه‌ها و ایستگاه‌های مختلف

مدل Aquacrop برجسته می‌کند و نشان می‌دهد که چگونه استفاده از پایگاه‌های داده با دقت بالاتر می‌تواند بهبود قابل توجهی در مدیریت منابع کشاورزی و برنامه‌ریزی‌های مرتبط ایجاد کند.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق به‌وضوح نشان می‌دهند که عملکرد پایگاه‌های داده اقلیمی مختلف در شبیه‌سازی‌های مدل AquaCrop متفاوت است و این تفاوت‌ها به‌طور مستقیم بر دقت پیش‌بینی‌ها و تحلیل‌های انجام شده تأثیر می‌گذارد. پایگاه داده ERA5 به‌طور کلی برتری قابل توجهی از نظر کاهش عدم قطعیت نسبت به دیگر پایگاه‌ها داشته است. برای مثال، در شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت در ایستگاه اهواز، ERA5 میزان عدم قطعیت کمتری را با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۲۳/۳۳ درصد و ۰/۵ نسبت به سایر پایگاه‌ها نشان داده است. این پایگاه داده

در مجموع، نتایج حاصل از روش Bootstrap، اهمیت انتخاب صحیح پایگاه داده برای مدل‌سازی‌های کشاورزی را برجسته می‌کنند و نشان می‌دهند که پایگاه‌های CPC Global، CRU TS و سپس ERA5 به طور کلی عدم قطعیت کمتری را برای عملکرد گندم و ذرت دارند و در بیشتر ایستگاه‌ها عملکرد بهتری نسبت به سایر پایگاه‌ها از خود نشان داده‌اند. به این ترتیب، استفاده از پایگاه‌های داده با دقت بالاتر، می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و در نتیجه مدیریت بهتر منابع کشاورزی کمک کند. در مقابل، پایگاه MERRA-2 عدم قطعیت بیشتری را در اکثر ایستگاه‌ها نشان داده و ضعیف‌ترین عملکرد را دارد. بنابراین، پایگاه‌های CPC Global، CRU TS و ERA5 به عنوان گزینه‌های قابل اعتمادتر برای مدل‌سازی عملکرد گندم و ذرت شناخته می‌شوند. این یافته‌ها اهمیت انتخاب صحیح پایگاه داده‌ها را برای شبیه‌سازی‌های

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی: یعقوب رادمش، مهدی سرائی تبریزی، هادی رمضانی اعتدالی؛
روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها: یعقوب رادمش، مهدی سرائی تبریزی، هادی رمضانی اعتدالی، اصغر عزیزیان و حسین بابازاده؛
نظارت و نگارش نهایی: یعقوب رادمش.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

1. Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. AquaCrop — The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal*. 2009;101(3): 438–447. doi:10.2134/agronj2008.0140s
2. Foster T, Brozović N, Butler AP, Neale CMU, Raes D, Steduto P, et al. AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. *Agricultural Water Management*. 2017;181: 18–22. doi:10.1016/J.AGWAT.2016.11.015
3. Izadi Z, Nasrolahi AH, Haghghati Borujeni, B. Simulation of climate change effects on potato crop yield using AquaCrop plant growth model. *Irrigation and Water Engineering*. 2019;9(3): 143–158. doi:10.22125/IWE.2019.88679
4. Wang G, Mehmood F, Zain M, Hamani AKM, Xue J, Gao Y, et al. AquaCrop Model Evaluation for Winter Wheat under Different Irrigation Management Strategies: A Case Study on the North China Plain. *Agronomy*. 2022;12(12). doi:10.3390/agronomy12123184
5. Panek-Chwastyk E, Ozbilge CN, Dąbrowska-Zielińska K, Gurdak R. Advancing Crop Yield Predictions: AQUACROP Model Application in Poland's JECAM Fields. *Agronomy*. 2024;14(4): 854. doi:10.3390/agronomy14040854
6. Ramezani M, Babazadeh H, Sarai Tabrizi M. Simulating Barley Yield under Different Irrigation Levels by using AquaCrop Model. *Irrigation Sciences and Engineering*. 2018;41(4): 161–172. doi:10.22055/JISE.2017.20215.1452
7. Wale A, Dessie M, Kendie H. Evaluating the Performance of AquaCrop Model for Potato Production Under Deficit Irrigation. *Air, Soil and Water Research*. 2022;15. doi:10.1177/11786221221108216
8. Khorsand A, Dehghanisanij H, Heris AM, Asgarzadeh H, Rezaverdinejad V. Calibration and evaluation of the FAO AquaCrop model for canola (*Brassicanapus*) under full and deficit irrigation in a semi-arid region. *Applied*

- Water Science. 2024;14(3). doi:10.1007/S13201-024-02108-3
9. Juston J, Seibert J, Johansson PO. Temporal sampling strategies and uncertainty in calibrating a conceptual hydrological model for a small boreal catchment. *Hydrological Processes*. 2009;23(21): 3093–3109. doi:10.1002/hyp.7421
10. Shafiei M, Ghahraman B, Saghaian B, Davary K, Vazifedust M. Uncertainty Analysis in Prediction of Soil Water Balance Components in two Irrigated Field in Arid Region. *Water and Soil*. 2015;28(5): 909–917. doi:10.22067/JSW.V0I0.29617
11. Tung YK, Yen BC. *Hydrosystems Engineering Uncertainty Analysis*. American Society of Civil Engineers. McGraw-Hill; 2006.
12. Song X, Zhang J, Zhan C, Xuan Y, Ye M, Xu C. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of Hydrology*. 2015. p. 739–757. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.02.013
13. Shafiei M, Bazrafshan J, Irannejad P. Uncertainty analysis of parameters for river flow simulation using Glue method. *Geography*. 2018;16(58): 82–99.
14. Efron B, Tibshirani RJ. *An Introduction to the Bootstrap*. Chapman and Hall/CRC; 1994. doi:10.1201/9780429246593
15. Davison AC, Hinkley D V. *Bootstrap Methods and their Application*. Cambridge University Press; 1997. doi:10.1017/cbo9780511802843
16. Fox J. *Applied Regressions Analysis and Linear Models* (3rd ed.). 2016; 817.
17. Karimi T, Reed P, Malek K, Adam J. Diagnostic Framework for Evaluating How Parametric Uncertainty Influences Agro-Hydrologic Model Projections of Crop Yields Under Climate Change. *Water Resources Research*. 2022;58(6). doi:10.1029/2021WR031249
18. Galavi H, Mirzaei M, Yu B, Lee J. Bootstrapped ensemble and reliability ensemble averaging approaches for integrated uncertainty analysis of streamflow projections. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2023;37(4): 1213–1227. doi:10.1007/S00477-022-02337-5
19. Park J, Hwang S, Song JH, Kang MS. An Alternative for Estimating the Design Flood Interval of Agricultural Reservoirs under Climate Change Using a Non-Parametric Resampling Technique. *Water*. 2020;12(7): 1894. doi:10.3390/w12071894
20. Althoff D, Rodrigues LN, Bazame HC. Uncertainty quantification for hydrological models based on neural networks: the dropout ensemble. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2021;35(5): 1051–1067. doi:10.1007/s00477-021-01980-8
21. Mirza Alipour S, Engeland K, Leal J. Uncertainty Assessment of Flood Maps: A Comparison of Bootstrap and Monte Carlo Methods. In: *Proceedings of the IAHR World Congress*. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research; 2022. p. 6422–6430. doi:10.3850/IAHR-39WC2521716X2022651
22. Tan YX, Ng JL, Huang YF. Quantitative analysis of input data uncertainty for SPI and SPEI in Peninsular Malaysia based on the bootstrap method. *Hydrological Sciences Journal*. 2023;68(12): 1724–1737. doi:10.1080/02626667.2023.2232348
23. Negri C, Schurch N, Wade AJ, Mellander PE, Stutter M, Bowes MJ, et al. Transferability of a Bayesian Belief Network across diverse agricultural catchments using high-frequency hydrochemistry and land management data. *Science of the Total Environment*. 2024;949. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.174926
24. Iran, Islamic Rep. - *Climatology | Climate Change Knowledge Portal*.
25. Khalili A, Bazrafshan J, Cheraghalizadeh M. A Comparative study on climate maps of Iran in extended de Martonne classification and application of the method for world climate zoning. *Journal*

- of Agricultural Meteorology. 2022;10(1): 3–16. doi:10.22125/AGMJ.2022.156309
26. Chen M, Xie P, Co-authors. CPC Unified Gauge-based Analysis of Global Daily Precipitation. In: Western Pacific Geophysics Meeting, Cairns, Australia, 29 July - 1 August, 2008. 2008. p. 179–184.
27. Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011;137(656): 553–597. doi:10.1002/QJ.828
28. Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Biavati G, Horányi A, Muñoz Sabater J, et al. ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. 2023. doi:10.24381/cds.f17050d7
29. Gelaro R, McCarty W, Suárez MJ, Todling R, Molod A, Takacs L, et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). Journal of Climate. 2017;30(14): 5419–5454. doi:10.1175/JCLI-D-16-0758.1
30. Singh R. Simulations on direct and cyclic use of saline waters for sustaining cotton-wheat in a semi-arid area of north-west India. Agricultural Water Management. 2004;66(2): 153–162. doi:10.1016/J.AGWAT.2003.10.007
31. Doorenbos J, Kassam AH. Yield response to water. FAO irrigation and drainage paper no. 33. UN-FAO, Rome, Italy. FAO 33. 1979;(33).
32. Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. Reference manual AquaCrop (Version 7.1), Chapter 1, FAO crop-water productivity model to simulate yield response to water. 2023.
33. FAO. ETo calculator version 3.1. 2012.
34. Abbaspour KC, Johnson CA, van Genuchten MT. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. Vadose Zone Journal. 2004;3(4): 1340–1352. doi:10.2113/3.4.1340
35. Tarek M, Brissette FP, Arsenault R. Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America. Hydrology and Earth System Sciences. 2020;24(5): 2527–2544. doi:10.5194/hess-24-2527-2020
36. Navidi Nassaj B, Zohrabi N, Nikbakht Shahbazi A, Fathian H. Evaluating the performance of eight global gridded precipitation datasets across Iran. Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2022;98: 101297. doi:10.1016/J.DYNATMOCE.2022.101297
37. Mu Q, Zhao M, Running SW. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. Remote Sensing of Environment. 2011;115(8): 1781–1800. doi:10.1016/j.rse.2011.02.019
38. Ogunsola OQ, Bankole AO, Soboyejo LA, Adejuwon JO, Makinde AA. Modeling deficit irrigation water demand of maize and potato in Eastern Germany using ERA5-Land reanalysis climate time series. Irrigation Science 2024 43:5. 2024;43(5): 1127–1145. doi:10.1007/S00271-024-00939-1