

مقاله علمی - پژوهشی

## تحلیل مقایسه‌ای روش‌های *GLUE* و *Bootstrap* برای ارزیابی عدم قطعیت پایگاه‌های اقلیمی در شبیه‌سازی‌های مدل *AquaCrop*

یعقوب رادمش<sup>۱</sup>، مهدی سرائی تبریزی<sup>۲\*</sup>، هادی رضائی اعتدالی<sup>۳</sup>، اصغر عزیزیان<sup>۴</sup> و حسین بابازاده<sup>۵</sup>

### چکیده

مدل *AquaCrop*، توسعه‌یافته توسط سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)، ابزاری مهم برای شبیه‌سازی رشد گیاه و بهره‌وری آب زراعی است که داده‌های اقلیمی از ورودی‌های اساسی آن محسوب می‌شوند. پایگاه‌های اقلیمی شبکه‌بندی شده جهانی، ابزارهای مفیدی برای جبران محدودیت‌های ایستگاه‌های زمینی (تراکم کم، سابقه کوتاه و نقص داده‌ها) بشمار می‌روند. هدف این مطالعه، مقایسه روش‌های *GLUE* و *Bootstrap* در ارزیابی عدم قطعیت داده‌های اقلیمی پایگاه‌های جهانی است. بدین منظور، داده‌های اقلیمی شامل دما، بارش و داده‌های لازم برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل از پایگاه‌های *CPC Global*، *ERA5*، *CRU TS*، *ERA-Interim*، *MERRA-2* و *MERRA-2* در مقیاس ماهانه برای دوره ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹ استخراج شده و برای شبیه‌سازی زیست‌توده، تبخیر و تعرق واقعی، نیاز آبی و عملکرد گندم و ذرت با استفاده از مدل *AquaCrop* در هشت ایستگاه سینوپتیک ایران که هر کدام نماینده اقلیم‌های مختلف بر اساس طبقه‌بندی دومارتن گسترش‌یافته بودند، استفاده گردید. نتایج نشان داد که روش *GLUE* باندهای عدم قطعیت گسترده‌تری ارائه داده و شاخص‌های *p-factor* و *d-factor* بالاتری دارد. کمترین عدم قطعیت در زیست‌توده ذرت در پایگاه *CPC Global* و ایستگاه بابلسر ( $p\text{-factor}=96/67\%$ ،  $d\text{-factor}=3/30$ ) و بیشترین آن در پایگاه *MERRA-2* و ایستگاه قزوین ( $p\text{-factor}=63/33\%$ ،  $d\text{-factor}=5/98$ ) مشاهده شد. روش *Bootstrap* نیز کمترین عدم قطعیت را برای پایگاه *CPC Global* نشان داد. پایگاه‌های *ERA5* و *CPC Global* به دلیل دقت بالای داده‌ها گزینه‌های بهتری برای مدل‌سازی گیاهی هستند، در حالی که *MERRA-2* بیشترین عدم قطعیت را دارد. به‌طور کلی، روش *GLUE* برای تحلیل‌های جامع‌تر و روش *Bootstrap* به دلیل سادگی و باندهای باریک‌تر، برای مطالعات با محدودیت زمانی یا داده‌ای مناسب‌تر است.

**واژه‌های کلیدی:** برآورد عدم قطعیت، روش *GLUE*، روش *Bootstrap*، مدل *AquaCrop*، پایگاه‌های اقلیمی

### مقدمه

در دنیای امروز، تغییرات اقلیمی و کمبود منابع آبی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌هایی هستند که کشورهای مختلف به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک با آن مواجه‌اند. در این راستا، بهبود بهره‌وری آب در کشاورزی به‌عنوان یک ضرورت شناخته شده است. مدل‌سازی گیاهی، به‌ویژه با استفاده از مدل *AquaCrop*، ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد محصولات کشاورزی است. این مدل با در نظر گرفتن متغیرهای اقلیمی مانند دما و بارش، می‌تواند عملکرد گیاهان را تحت شرایط مختلف شبیه‌سازی کند. از سوی دیگر، به دلیل کمبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری و داده‌های تاریخی محدود، دسترسی به داده‌های اقلیمی دقیق چالش‌برانگیز است. در این شرایط، پایگاه‌های داده اقلیمی شبکه‌ای مانند *CRU*، *CPC Global*،

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (\* نویسنده مسئول: m.sarai@iau.ac.ir)  
<sup>۳</sup> استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران  
<sup>۴</sup> دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران  
<sup>۵</sup> استاد، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴

نتایج مشابهی می‌تواند از حالت‌های اولیه مختلف به دست آید (Beven and Binley, 1992). همچنین، با در نظر گرفتن ترکیبات مختلف پارامترها و برهم‌کنش آن‌ها، تحلیل حساسیت مدل به صورت جامع انجام می‌شود (همراز و همکاران، ۱۳۹۴). GLUE با محاسبه مقادیر درست‌نمایی، عملکرد مدل را تحت تأثیر ترکیب‌های مختلف پارامترها بررسی می‌کند (Vazquez et al., 2009). روش Bootstrap که در سال ۱۹۷۹ توسط Bradley Efron معرفی شد، یکی از تکنیک‌های آماری قدرتمند برای برآورد عدم قطعیت و ارزیابی مدل‌های آماری است (Efron and Tibshirani, 1993). این روش با نمونه‌برداری تصادفی از داده‌های اصلی و با جایگذاری، امکان ایجاد مجموعه‌های مختلفی از داده‌ها را فراهم می‌کند. هر نمونه‌برداری چندین بار تکرار شده و آماره‌های مورد نظر، مانند میانگین یا واریانس، محاسبه می‌شود (Davison and Hinkley, 1997). توزیع آماره‌های حاصل از این نمونه‌ها به ما اجازه می‌دهد تا عدم قطعیت‌ها و فواصل اطمینان را برآورد کنیم. Bootstrap به دلیل عدم نیاز به فرضیات خاص توزیعی و عملکرد خوب با داده‌های غیرنرمال یا کوچک، کاربرد گسترده‌ای دارد و برای انواع مدل‌های آماری، از جمله مدل‌های رگرسیونی، مناسب است (Efron and Tibshirani, 1993; Fox, 2016). مطالعات زیادی در مورد برآورد و ارزیابی عدم قطعیت نتایج شبیه‌سازی شده با مدل‌های آگروهیدرولوژیکی، مدل‌های اقلیمی و یا مدل‌های دیگر با استفاده از روش‌های GLUE و Bootstrap انجام شده است. رضانی اعتدالی و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی رفتار احتمالاتی پارامترهای مدل AquaCrop با استفاده از روش مونت‌کارلو و تحلیل حساسیت جهانی پرداختند. نتایج نشان داد که توزیع احتمالاتی پارامترهای کالیبره شده می‌تواند برای خروجی‌های مختلف متفاوت باشد و بهینه‌سازی مدل چند خروجی با استفاده از GLUE می‌تواند عدم قطعیت را کاهش دهد (Ramezani Etedali et al., 2023). اکبری و همکاران (۱۴۰۳) با استفاده از روش GLUE به بررسی عدم قطعیت پارامترهای مدل DSSAT برای پیش‌بینی عملکرد پنبه پرداختند. پارامترهای اکوتایپی مدل با داده‌های مشاهده‌ای در چهار تیمار

TS، ERA-interim، ERA5 و MERRA-2 به‌عنوان منابع مهم داده‌های اقلیمی شناخته می‌شوند. این پایگاه‌ها از ترکیب داده‌های اندازه‌گیری، سنجش‌ازدور و مدل‌های عددی برای تولید داده‌های اقلیمی استفاده می‌کنند. با این حال، استفاده از این داده‌ها بدون ارزیابی دقت و کیفیت آن‌ها ممکن است منجر به نتایج نادرست در مدل‌سازی گیاهی شود؛ بنابراین، ارزیابی عدم قطعیت ناشی از این داده‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تحلیل عدم قطعیت، مربوط به تعیین عدم قطعیت در خروجی‌های مدل است که از عدم قطعیت ورودی‌های مدل و پارامترها نشأت می‌گیرد (Song et al., 2015)؛ بنابراین تحلیل عدم قطعیت باید به‌منظور توسعه و تضمین کیفیت مدل انجام شوند (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۷). هدف اصلی تحلیل عدم قطعیت، تعیین ویژگی‌های آماری خروجی یک مدل به‌عنوان تابعی از پارامترهای ورودی احتمالی است. این تحلیل تلاش دارد تا ساختاری اصولی برای شناسایی عدم قطعیت مرتبط با خروجی مدل فراهم کند. همچنین، تحلیل عدم قطعیت به طراحان دیدگاهی می‌دهد تا سهم هر یک از پارامترهای ورودی احتمالی را در عدم قطعیت کلی خروجی مدل مشخص کنند (همراز و همکاران، ۱۳۹۳). در این مطالعه، به مقایسه دو روش رایج برای برآورد عدم قطعیت، یعنی روش GLUE و Bootstrap پرداخته خواهد شد.

روش GLUE، به‌عنوان یک تکنیک مبتنی بر شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو، به‌خوبی قادر است عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای مدل را ارزیابی کند. از سوی دیگر، روش Bootstrap، به‌دلیل سادگی و عدم نیاز به فرضیات پیچیده، به‌ویژه در مطالعاتی که داده‌های کمی در دسترس است، کاربرد زیادی دارد. این مقاله به بررسی این دو روش و مقایسه‌ی آن‌ها در ارزیابی عدم قطعیت در مدل AquaCrop می‌پردازد.

روش GLUE یکی از تحلیل‌های احتمالاتی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو است که با فرض عدم وجود یک سری پارامتر بهینه منحصر به فرد و با تأکید بر همسانی نتایج سری‌های مختلف پارامترها، مجموعه‌ای از پارامترهای بهینه مدل و توزیع‌های احتمالاتی آن‌ها را تعیین می‌کند (Beven, 2006). این روش بر مفهوم "نتایج یکسان" استوار است، به این معنا که

روش‌های GLUE و Bootstrap در تحلیل عدم قطعیت داده‌های اقلیمی پایگاه‌های جهانی و بررسی تأثیر آن‌ها بر نتایج شبیه‌سازی محصولات گندم و ذرت با مدل AquaCrop است. وجه تمایز این تحقیق در استفاده از داده‌های اقلیمی پایگاه‌های جهانی در مدل‌سازی گیاهی و مقایسه روش‌های پیشرفته در تحلیل عدم قطعیت نهفته است. برخلاف تحقیقات گذشته که عمدتاً به داده‌های ایستگاه‌های زمینی متمرکز بودند یا از داده‌های پایگاه‌های اقلیمی برای مطالعات اقلیمی، هیدرولوژیکی و شبیه‌سازی رخدادهای حدی جوی مانند سیلاب و خشکسالی استفاده کرده‌اند، این مطالعه به تحلیل داده‌های پایگاه‌های CPC، MERRA-2، ERA-Interim، ERA5، CRU TS، Global و پرداخته و نتایج آن می‌تواند به انتخاب دقیق‌تر داده‌های اقلیمی برای مدل‌سازی گیاهی کمک کند.

### مواد و روش‌ها

این تحقیق به منظور ارزیابی عدم قطعیت در مدل AquaCrop با استفاده از داده‌های پایگاه‌های اقلیمی مختلف طراحی شده است.

### منطقه مورد مطالعه

ایران بین عرض‌های جغرافیایی  $25^{\circ}04'$  تا  $39^{\circ}46'$  شمالی و طول‌های  $44^{\circ}02'$  تا  $63^{\circ}19'$  شرقی واقع شده و از شمال و جنوب به دریا دسترسی دارد. میانگین بارش سالانه کشور ۲۱۹ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه  $18/4$  درجه سانتی‌گراد است (World Bank, 2024). منطقه مطالعه شامل هشت ایستگاه سینوپتیک در ایران شامل کرمان، اهواز، قزوین، الیگودرز، سقز، بابلسر، رشت و کوه‌رنگ است که به ترتیب نماینده‌ی اقلیم‌های فراهشک، خشک، نیمه‌خشک، مدیترانه‌ای، نیمه‌مرطوب، مرطوب، خیلی مرطوب نوع A و خیلی مرطوب نوع B بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن گسترش‌یافته (Khalili et al., 1992) می‌باشند (شکل ۱).

آبیاری و الگوریتم مونت‌کارلو بهینه شدند. نتایج نشان داد GLUE نسبت به روش‌های سنتی دقت بیشتری دارد و به بهبود شبیه‌سازی‌های کشاورزی کمک می‌کند. ژانگ و همکاران با مدل CROPGRO-Soybean و روش GLUE تأثیر داده‌های مشاهده‌شده بر کالیبراسیون مدل را بررسی کردند. نتایج نشان داد افزایش مراحل فنولوژیکی دقت مدل را بهبود می‌بخشد و خطاهای RMSE و MAE کاهش می‌یابد. همچنین استفاده از حداقل دو مرحله فنولوژیکی برای تعادل بین دقت و هزینه محاسباتی پیشنهاد شد (Zhang et al., 2024). فریرا و همکاران با روش GLUE و پردازش موازی به بهبود تخمین ضرایب ژنتیکی در مدل DSSAT-CSM پرداختند. سیستم GLUEP معرفی‌شده، زمان کالیبراسیون را تا  $4/95\%$  کاهش داده و دقت و سرعت پیش‌بینی مدل‌های رشد گیاه را بهبود می‌بخشد (Ferreira et al., 2024). کریمی و همکاران در مطالعه‌ی چارچوبی برای ارزیابی تأثیر عدم قطعیت‌های پارامتریک بر پیش‌بینی‌های عملکرد محصولات در مدل‌های آگرو-هیدرولوژیکی تحت تغییرات اقلیمی ارائه دادند و نشان دادند که این عدم قطعیت‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر پیش‌بینی‌ها دارند و تکنیک Bootstrap به تحلیل دقیق‌تر این عدم قطعیت‌ها کمک کرده است (Karimi et al., 2022). میرزا علی پور و همکاران در مطالعه‌ی به مقایسه روش‌های Bootstrap و مونت‌کارلو برای ارزیابی عدم قطعیت در نقشه‌های سیل پرداختند و نتایج نشان می‌دهد که هر دو روش می‌توانند برای ارزیابی عدم قطعیت مفید باشند، اما بوت‌استرپ به دلیل سادگی و کارایی بالا ممکن است در برخی موارد انتخاب بهتری باشد (Mirza Alipour et al., 2022). نیجری و همکاران قابلیت انتقال شبکه‌های باور بیزی (BBN) را با داده‌های هیدروشمی و مدیریت اراضی بررسی کردند. نتایج نشان داد تکنیک Bootstrap به بهبود ساختار مدل، ارزیابی عدم قطعیت و سازگاری مدل‌های هیدرولوژیکی در حوضه‌های کشاورزی کمک می‌کند (Negri et al., 2024). هدف این تحقیق مقایسه



### روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (GLUE)

روش GLUE (Generalised Likelihood Uncertainty Estimation) یک تکنیک مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو است که برای تحلیل عدم قطعیت مدل‌ها استفاده می‌شود. در این روش، مجموعه‌ای از پارامترهای تصادفی تولید شده و عملکرد آن‌ها با شاخص درست‌نمایی نش-ساتکلیف (NSE) ارزیابی می‌شود. پارامترهای دارای عملکرد مطلوب به‌عنوان مجموعه‌های رفتاری انتخاب شده و بر اساس آن‌ها توزیع احتمالاتی پیش‌بینی مدل تعیین می‌شود (Beven, 2006). در این مطالعه، روش GLUE برای ارزیابی عدم قطعیت مدل AquaCrop و بررسی تأثیر داده‌های اقلیمی بر زیست‌توده، تبخیر و تعرق، عملکرد و نیاز آبی گندم و ذرت استفاده شده است. در نهایت، فاصله اطمینان ۹۵ درصدی به‌عنوان محدوده عدم قطعیت محاسبه شده و میزان عدم قطعیت با استفاده از شاخص‌های P-factor و R-factor ارزیابی می‌شود.

در این تحقیق، دو روش Bootstrap و GLUE به‌طور موازی برای تحلیل عدم قطعیت داده‌ها به‌کار گرفته شده‌اند. مقایسه نتایج این روش‌ها امکان ارزیابی دقت پیش‌بینی‌های مدل AquaCrop را فراهم کرده و همچنین، تأثیر انتخاب پایگاه داده‌های اقلیمی بر نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

### معیارهای ارزیابی عدم قطعیت

برای ارزیابی عملکرد هر یک از روش‌ها، از دو معیار زیر استفاده شده است:

p-factor: درصدی از داده‌های مشاهداتی که در باند عدم قطعیت ۹۵ درصدی قرار می‌گیرند.

d-factor: نسبت میانگین ضخامت باند عدم قطعیت ۹۵ درصدی به انحراف استاندارد داده‌های مشاهداتی که عرض متوسط باند عدم قطعیت را ارزیابی می‌کند.

هر چه p-factor به ۱۰۰ درصد و d-factor به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده شبیه‌سازی دقیق‌تر و مناسب‌تر است (Abbaspour et al., 2004).

برای شبیه‌سازی رشد ذرت (رقم سینگل کراس ۷۰۴) و گندم استفاده شد. مدل بر اساس GDD (درجه روز رشد) و با استفاده از داده‌های اقلیمی مشاهده‌ای ایستگاه‌های سینوپتیک و داده‌های پایگاه‌های اقلیمی مختلف به‌صورت مجزا اجرا شد. از میان خروجی‌های مدل، زیست‌توده، تبخیر و تعرق واقعی، نیاز آبی و عملکرد در گندم و ذرت برای ارزیابی عدم قطعیت پایگاه‌های اقلیمی انتخاب شده و با روش‌های GLUE و Bootstrap مورد تحلیل قرار گرفتند.

### ارزیابی عدم قطعیت

برای ارزیابی عدم قطعیت خروجی‌های مدل AquaCrop، از دو روش Bootstrap و GLUE استفاده شد. در این راستا، مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی خروجی‌های مرتبط با رشد محصولات گندم و ذرت با استفاده از داده‌های اقلیمی مشاهده‌ای و پایگاه‌های اقلیمی مختلف اجرا گردید. سپس، روش GLUE برای تحلیل عدم قطعیت ناشی از تغییرات متغیرهای اقلیمی مدل به‌کار گرفته شد. علاوه بر این، روش Bootstrap به‌منظور تخمین توزیع آماری و برآورد عدم قطعیت استفاده گردید.

### روش بوت استرپ (Bootstrap)

Bootstrap یک روش آماری غیرپارامتریک است که از طریق بازنمونه‌گیری مکرر از داده‌های مشاهده‌ای، عدم قطعیت مدل را ارزیابی می‌کند (Efron and Tibshirani, 1993). در این تحقیق، این روش در نرم‌افزار SPSS با ۱۰۰۰ تکرار و تنظیم عدد اولیه تصادفی برای حفظ تکرارپذیری نتایج اجرا شده است. برای افزایش دقت، روش BCa (Bias-Corrected and Accelerated) جهت تصحیح اریبی و تغییرپذیری داده‌ها به‌کار رفته است. این روش امکان برآورد فاصله اطمینان ۹۵ درصدی و تحلیل تغییرپذیری داده‌ها را فراهم می‌کند. همچنین، شاخص‌های p-factor و d-factor برای ارزیابی دقت پیش‌بینی‌های مدل و سنجش میزان عدم قطعیت داده‌های ورودی استفاده شده‌اند.

## نتایج و بحث

خروجی‌های مدل AquaCrop (زیست‌توده، تبخیر و تعرق واقعی، نیاز آبی و عملکرد) به همراه معیارهای  $p$ -factor و  $d$ -factor است. در جدول ۱، نتایج عدم قطعیت زیست‌توده ذرت و گندم با استفاده از روش‌های GLUE و Bootstrap آمده است.

در این بخش، نتایج حاصل از اجرای دو روش بوت استرپ و GLUE با استفاده از پایگاه‌های اقلیمی مختلف برای محصولات گندم و ذرت ارائه شده است. این نتایج شامل جداول مقایسه‌ای از

جدول ۱- مقایسه نتایج عدم قطعیت زیست‌توده ذرت و گندم با استفاده از روش‌های GLUE و Bootstrap

نتایج عدم قطعیت زیست‌توده ذرت با روش Bootstrap		نتایج عدم قطعیت زیست‌توده ذرت با روش GLUE	
کمتربین عدم قطعیت	CPC-Global (بابلسر) - ۹۶٪/۶۷ و ۳٪/۳*	ERA5 (اهواز) ۲۳٪/۲۳ و ۰٪/۵	
بیشترین عدم قطعیت	MERRA-2 (قزوین) ۶۳٪/۳۳ و ۵٪/۹۸*	MERRA-2 (قزوین) ۱۰٪/۱ و ۱٪/۲۸	
پایگاه با بهترین عملکرد	CPC Global (۳ ایستگاه) - ERA5 و ERA-interim (هر کدام ۳ ایستگاه)	CPC Global (۶ ایستگاه)، ERA5 (۴ ایستگاه)	
پایگاه با ضعیف‌ترین عملکرد	MERRA-2 (۵ ایستگاه)	MERRA-2 (۵ ایستگاه)	
کمتربین عدم قطعیت	CPC Global (الیگودرز) ۹۳٪/۳۳ و ۳٪/۰۱*	نتایج عدم قطعیت زیست‌توده گندم با روش Bootstrap	
بیشترین عدم قطعیت	MERRA-2 (سقز) ۶۶٪/۶۷ و ۳٪/۵۴*	CPC Global (کوهرنگ) ۳۰٪/۳ و ۰٪/۶۱	
پایگاه با بهترین عملکرد	CPC Global و CRU TS (هر کدام ۳ ایستگاه) - ERA5 (۲ ایستگاه)	CRU TS (۶ ایستگاه) - ERA5 (۲ ایستگاه)	
پایگاه با ضعیف‌ترین عملکرد	ERA-interim (۴ ایستگاه)	CPC Global (۴ ایستگاه) - MERRA-2 (۳ ایستگاه)	

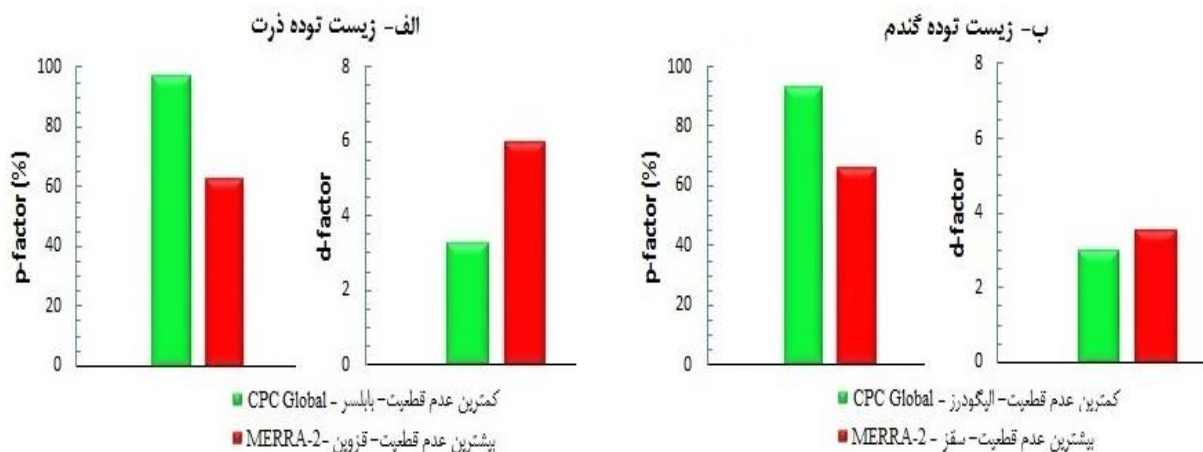
\* اعداد به ترتیب مربوط به شاخص‌های  $p$ -factor و  $d$ -factor است

در پنج ایستگاه از هشت ایستگاه بررسی‌شده نشان داد. در مورد زیست‌توده گندم نیز کمترین عدم قطعیت در پایگاه CPC Global و ایستگاه الیگودرز با مقادیر  $p$ -factor و  $d$ -factor معادل ۹۳/۳۳ درصد و ۳/۰۱ مشاهده شد و بیشترین عدم قطعیت این متغیر در پایگاه MERRA-2 و ایستگاه سقز مشاهده شد که مقادیر  $p$ -factor و  $d$ -factor آن به ترتیب ۶۶/۶۷ درصد و ۳/۵۴ بود (شکل ۱-ب). در این متغیر نیز، پایگاه‌های CPC Global و CRU TS عملکرد بهتری نسبت به سایر پایگاه‌ها داشتند و عدم قطعیت کمتری را نشان دادند، درحالی‌که پایگاه ERA-Interim بیشترین عدم قطعیت را در چهار از هشت ایستگاه بررسی‌شده داشت. در روش Bootstrap، باندهای عدم قطعیت باریک‌تر از روش GLUE مشاهده شد و مقادیر  $p$ -factor و  $d$ -factor در تمامی ایستگاه‌ها کمتر بود. نتایج این روش نشان داد که درصد کمی از داده‌های مشاهده‌ای در محدوده باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار می‌گیرند. در زیست‌توده ذرت، کمترین عدم قطعیت در پایگاه ERA5 و ایستگاه اهواز با مقادیر  $d$ - $p$ -factor

نتایج تحلیل عدم قطعیت زیست‌توده ذرت و گندم با استفاده از دو روش GLUE و Bootstrap در پایگاه‌های داده مختلف و ایستگاه‌های گوناگون بررسی شده است. به‌طورکلی، روش GLUE مقادیر بالاتری از شاخص‌های  $p$ -factor و  $d$ -factor را در مقایسه با روش Bootstrap نشان می‌دهد که این امر نشان‌دهنده پوشش گسترده‌تر داده‌های مشاهده‌ای و باندهای عدم قطعیت وسیع‌تر در این روش است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، کمترین عدم قطعیت زیست‌توده ذرت در روش GLUE مربوط به پایگاه CPC Global در ایستگاه بابلسر با مقادیر  $p$ -factor و  $d$ -factor معادل ۹۶/۶۷ درصد و ۳/۳ است و در مقابل، بیشترین عدم قطعیت برای این متغیر در پایگاه MERRA-2 و ایستگاه قزوین مشاهده شد که مقادیر  $p$ -factor و  $d$ -factor آن به ترتیب ۶۳/۳۳ درصد و ۵/۹۸ بود (شکل ۱-الف). به‌طورکلی، پایگاه‌های CPC Global، ERA5 و ERA-Interim عملکرد بهتری در کاهش عدم قطعیت زیست‌توده ذرت داشتند، درحالی‌که پایگاه MERRA-2 بیشترین عدم قطعیت را

ایستگاه کوه‌رنگ با مقادیر p-factor و d-factor معادل ۳۰ درصد و ۰/۶۱ و بیشترین عدم قطعیت در پایگاه MERRA-2 و ایستگاه سقز با مقادیر ۶/۶۷ درصد و ۰/۷ مشاهده شد.

factor معادل ۲۳/۳۳ درصد و ۰/۵ مشاهده شد، درحالی‌که بیشترین عدم قطعیت این متغیر در پایگاه MERRA-2 و ایستگاه قزوین با مقادیر ۱۰ درصد و ۱/۲۸ بود. برای زیست‌توده گندم نیز کمترین عدم قطعیت در پایگاه CPC Global و



شکل ۱- مقایسه کمترین و بیشترین عدم قطعیت زیست توده ذرت و گندم با روش GLUE در ایستگاه‌ها و پایگاه‌ها

داد و در روش Bootstrap نیز عملکرد ضعیفی در برخی ایستگاه‌ها داشت. این نتایج با یافته‌های مطالعات پیشین از جمله پژوهش تارک و همکاران همخوانی دارد که بیان می‌کند پایگاه‌های داده‌ای با دقت و وضوح مکانی و زمانی بالاتر، شبیه‌سازی‌های دقیق‌تری ارائه داده و باندهای عدم قطعیت باریک‌تری ایجاد می‌کنند (Tarek et al., 2020).

نتایج مقایسه دو روش GLUE و Bootstrap در تحلیل عدم قطعیت تبخیر و تعرق واقعی ذرت و گندم نشان می‌دهد که عملکرد پایگاه‌های داده در شبیه‌سازی این متغیرها متفاوت است. روش GLUE به‌طور کلی پهنای باند بیشتری نسبت به روش Bootstrap دارد، به‌طوری‌که مقادیر p-factor و d-factor در روش GLUE بالاتر از مقادیر مشابه در روش Bootstrap هستند. این موضوع نشان‌دهنده عدم قطعیت بیشتر در نتایج روش GLUE است.

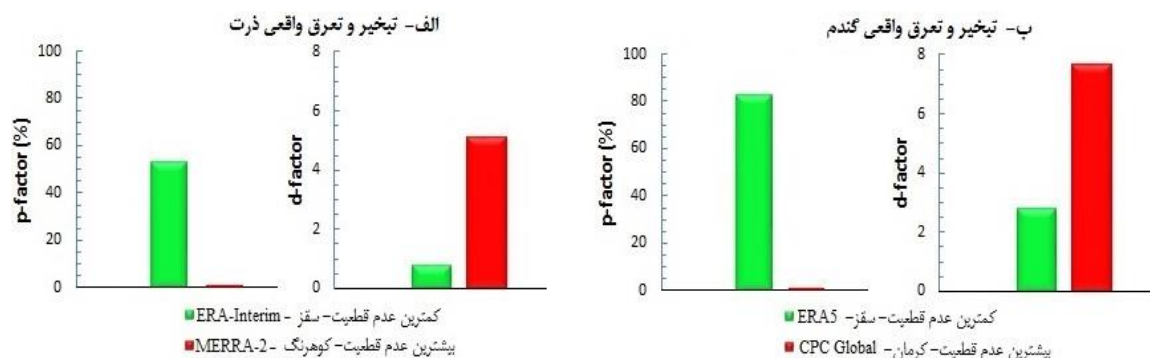
به‌طور کلی، روش GLUE به دلیل در نظر گرفتن منابع مختلف عدم قطعیت شامل پارامترهای مدل، خطاهای ساختاری و داده‌های ورودی، باندهای عدم قطعیت وسیع‌تری ارائه می‌دهد. در مقابل، روش Bootstrap که بر نمونه‌گیری مکرر از داده‌های مشاهده‌ای تمرکز دارد، باندهای باریک‌تری ایجاد می‌کند و عمدتاً عدم قطعیت آماری داده‌های ورودی را در نظر می‌گیرد. این امر موجب می‌شود که روش GLUE در بسیاری از ایستگاه‌ها و پایگاه‌های داده مقادیر بالاتری از p-factor و d-factor داشته باشد، درحالی‌که روش Bootstrap مقادیر کمتری از این شاخص‌ها را ارائه می‌دهد. در مقایسه عملکرد پایگاه‌های داده، می‌توان نتیجه گرفت که پایگاه‌های CPC Global و ERA5 در هر دو روش GLUE و Bootstrap عملکرد بهتری نسبت به سایر پایگاه‌ها نشان داده و عدم قطعیت کمتری در نتایج شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت و گندم داشتند. در مقابل، پایگاه MERRA-2 در روش GLUE بیشترین عدم قطعیت را نشان

جدول ۲- مقایسه نتایج عدم قطعیت تبخیر و تعرق واقعی ذرت و گندم با استفاده از روش‌های GLUE و Bootstrap		
نتایج عدم قطعیت تبخیر و تعرق واقعی ذرت با روش Bootstrap	نتایج عدم قطعیت تبخیر و تعرق واقعی ذرت با روش GLUE	
کمتربین عدم قطعیت	ERA-Interim (سقر) ۵۳٪/۳۳ و ۰/۸۱ *	ERA-Interim (سقر) ۱۶٪/۶۷ و ۰/۱۷ *
بیشترین عدم قطعیت	MERRA-2 (کوه‌رنگ) صفر٪ و ۵/۱۴ *	MERRA-2 (کوه‌رنگ) ۰٪ و ۰/۹ *
پایگاه با بهترین عملکرد	ERA-Interim (۴ ایستگاه)-ERA5 و CRU TS (هر کدام ۳ ایستگاه)	ERA-Interim (۴ ایستگاه)-CRU (۳ ایستگاه)
	MERRA-2 (۷ ایستگاه)	MERRA-2 (۸ ایستگاه)
پایگاه با ضعیف‌ترین عملکرد	نتایج عدم قطعیت تبخیر و تعرق واقعی گندم با روش GLUE	نتایج عدم قطعیت تبخیر و تعرق واقعی گندم با روش Bootstrap
کمتربین عدم قطعیت	ERA5 (سقر) ۸۳٪/۳۳ و ۲/۸۱ *	ERA5 (الیگودرز) ۳۰٪ و ۰/۴۶ *
بیشترین عدم قطعیت	CPC Global (کرمان) صفر٪ و ۷/۶۳ *	MERRA-2 (کرمان) ۰٪ و ۱/۳۹ *
پایگاه با بهترین عملکرد	CRU TS (۶ ایستگاه)	CRU TS (۵ ایستگاه)-ERA5 (۳ ایستگاه)
پایگاه با ضعیف‌ترین عملکرد	MERRA-2 (۵ ایستگاه)	MERRA-2 در ۶ ایستگاه

\* اعداد به ترتیب مربوط به شاخص‌های p-factor و d-factor است

برای تبخیر و تعرق گندم، پایگاه ERA5 با روش GLUE در ایستگاه سقر با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۸۳/۳۳ درصد و ۲/۸۱، کمترین عدم قطعیت و بهترین عملکرد را داشته است، در حالی که پایگاه CPC Global در ایستگاه کرمان با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب صفر درصد و ۷/۶۳ بیشترین عدم قطعیت را داشته است (شکل ۲- ب). در روش Bootstrap برای تبخیر و تعرق گندم، پایگاه ERA5 در ایستگاه الیگودرز با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۳۰ درصد و ۰/۴۶، کمترین عدم قطعیت را داشته است، ولی به صورت کلی پایگاه CRU TS در ایستگاه‌های بیشتری (پنج از هشت ایستگاه) کمترین عدم قطعیت را نشان داده و بهترین عملکرد را داشته است. با این حال، پایگاه MERRA-2 در هر دو روش، بیشترین عدم قطعیت را در بیشتر ایستگاه‌ها نشان داده و ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است.

برای تبخیر و تعرق ذرت، پایگاه ERA-Interim با روش GLUE در ایستگاه سقر با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۵۳/۳۳ درصد و ۰/۸۱، کمترین عدم قطعیت و بهترین عملکرد را نشان داده است، در حالی که پایگاه MERRA-2 در ایستگاه کوه‌رنگ با مقادیر صفر درصد و ۵/۱۴ بیشترین عدم قطعیت را داشته است (شکل ۲- الف). پایگاه ERA-Interim با عدم قطعیت کمتر در چهار ایستگاه از هشت ایستگاه، نسبت به سایر پایگاه‌ها عملکرد بهتری داشته است. در روش Bootstrap نیز پایگاه ERA-Interim در ایستگاه سقر با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۱۶/۶۷ درصد و ۰/۱۷، بهترین عملکرد را داشته است، در حالی که پایگاه MERRA-2 در ایستگاه کوه‌رنگ با مقادیر صفر درصد و ۰/۹۰، بیشترین عدم قطعیت را نشان داده است. این نتایج نشان می‌دهند که روش Bootstrap عدم قطعیت کمتری نسبت به روش GLUE ارائه می‌دهد و در برخی ایستگاه‌ها، عملکرد بهتری دارد.



شکل ۲- مقایسه کمترین و بیشترین عدم قطعیت تبخیر و تعرق واقعی ذرت و گندم با روش GLUE در ایستگاه‌ها و پایگاه‌ها

بازده محصولات و مدیریت کشاورزی تأکید کردند (Appiah et al., 2024). به همین ترتیب، عالی‌مقام و همکاران به این نتیجه رسیدند که داده‌های ورودی باکیفیت می‌توانند پیش‌بینی عملکرد محصولات را بهبود بخشیده و به تصمیم‌گیری‌های بهتر در کشاورزی کمک کنند (Alimagham et al., 2024). روش Bootstrap نیز به دلیل کاهش پهنای باند عدم قطعیت و افزایش دقت در مقایسه با روش GLUE، گزینه مناسبی برای تحلیل عدم قطعیت به شمار می‌رود. در جدول ۳، نتایج عدم قطعیت نیاز آبی ذرت و گندم با استفاده از روش‌های GLUE و Bootstrap آمده است.

به‌طور کلی، نتایج هر دو روش نشان می‌دهند که پایگاه‌های ERA-Interim، CRU TS و ERA5 در شبیه‌سازی تبخیر و تعرق ذرت و گندم عملکرد بهتری نسبت به سایر پایگاه‌ها دارند و می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های معتبرتری در مدل‌سازی استفاده شوند. انتخاب داده‌های مناسب و با کیفیت بالا می‌تواند تأثیر بسزایی بر دقت و کیفیت شبیه‌سازی‌ها داشته باشد و نتایج این مطالعه بر اهمیت این موضوع تأکید می‌کند و مطالعات مختلفی نیز این موضوع را تأیید کرده‌اند. به‌عنوان مثال، آندراوس نشان داد که کیفیت داده‌های ورودی نقش کلیدی در کاهش عدم قطعیت مدل‌سازی و بهبود پیش‌بینی‌ها دارد (Andraos, 2024). همچنین، آپیاه و همکاران بر تأثیر داده‌های دقیق‌تر بر شبیه‌سازی

جدول ۳- مقایسه نتایج عدم قطعیت نیاز آبی ذرت و گندم با استفاده از روش‌های GLUE و Bootstrap

نتایج عدم قطعیت نیاز آبی ذرت با روش Bootstrap	نتایج عدم قطعیت نیاز آبی ذرت با روش GLUE	
کمتترین عدم قطعیت ERA-Interim (سقر) ۲۶٪/۶۷ و ۰/۱۷ *	کمتترین عدم قطعیت ERA-Interim (سقر) ۵۳٪/۳۳ و ۰/۹۳ *	کمتترین عدم قطعیت
بیشترین عدم قطعیت MERRA-2 (کوهرنگ) ۱/۰۲ و ۰٪ *	بیشترین عدم قطعیت MERRA-2 (کوهرنگ) ۶/۰۸ و ۰٪ *	بیشترین عدم قطعیت
پایگاه با بهترین عملکرد همه پایگاه‌ها به‌جز پایگاه MERRA-2	پایگاه با بهترین عملکرد ERA-Interim و ERA5 (هر یک ۴ ایستگاه)	پایگاه با بهترین عملکرد
پایگاه با ضعیف‌ترین عملکرد MERRA-2 (۶ ایستگاه)	پایگاه با ضعیف‌ترین عملکرد MERRA-2 (۶ ایستگاه)	پایگاه با ضعیف‌ترین عملکرد
نتایج عدم قطعیت نیاز آبی گندم با روش Bootstrap	نتایج عدم قطعیت نیاز آبی گندم با روش GLUE	
کمتترین عدم قطعیت CRU TS (الیگودرز) ۳۳٪/۳۳ و ۰/۵۱ *	کمتترین عدم قطعیت ERA5 (رشت) ۸۶٪/۶۷ و ۱/۹۹ *	کمتترین عدم قطعیت
بیشترین عدم قطعیت MERRA-2 (بابلسر) ۱/۱۴ و ۰٪ *	بیشترین عدم قطعیت MERRA-2 (بابلسر) ۳٪/۳۳ و ۶/۰۴ *	بیشترین عدم قطعیت
پایگاه با بهترین عملکرد ERA5 (۴ ایستگاه)	پایگاه با بهترین عملکرد ERA5 (۶ ایستگاه)	پایگاه با بهترین عملکرد
پایگاه با ضعیف‌ترین عملکرد MERRA-2 در ۸ ایستگاه	پایگاه با ضعیف‌ترین عملکرد MERRA-2 (۸ ایستگاه)	پایگاه با ضعیف‌ترین عملکرد

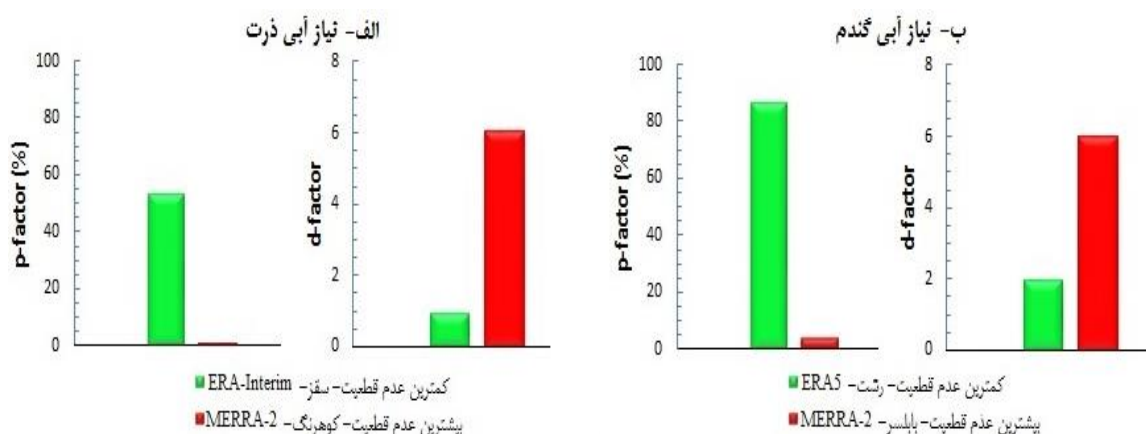
\* اعداد به ترتیب مربوط به شاخص‌های p-factor و d-factor است

قابل توجهی مشاهده می‌شود. در روش GLUE، نتایج نشان می‌دهد که پایگاه‌های ERA5 و ERA-Interim عملکرد بهتری

در مقایسه نتایج دو روش GLUE و Bootstrap برای بررسی عدم قطعیت نیاز آبی ذرت و گندم، تفاوت‌های

پایگاه MERRA-2 در بسیاری از ایستگاه‌ها نتایج ضعیفی ارائه داده و مقادیر d-factor بالایی (بین ۳/۷۱ تا ۶/۰۸) داشته است. در روش Bootstrap نیز نتایج مشابهی مشاهده می‌شود. برای نیاز آبی ذرت، پایگاه ERA-Interim در ایستگاه سقر دقیق‌ترین پیش‌بینی را با مقادیر p-factor برابر ۲۶/۶۷ درصد و d-factor برابر ۰/۱۷ ارائه داده است. بیشترین عدم قطعیت ذرت نیز در پایگاه MERRA-2 در ایستگاه کوه‌رنگ مشاهده شده که مقادیر p-factor برابر صفر درصد و d-factor برابر ۱/۰۲ را نشان می‌دهد. در مورد گندم، پایگاه CRU در ایستگاه الیگودرز بهترین عملکرد را داشته است و مقادیر p-factor برابر ۳۳/۳۳ درصد و d-factor برابر ۰/۵۱ ثبت شده است؛ اما بالاترین عدم قطعیت گندم در پایگاه MERRA-2 و ایستگاه بابلسر دیده می‌شود که مقادیر p-factor برابر صفر و d-factor برابر ۱/۱۴ را دارد.

داشته‌اند. برای نیاز آبی ذرت، بالاترین دقت مربوط به پایگاه ERA-Interim در ایستگاه سقر است که مقادیر p-factor برابر ۵۳/۳۳ درصد و d-factor برابر ۰/۹۳ را نشان می‌دهد و در مقابل، بالاترین عدم قطعیت در پایگاه MERRA-2 در ایستگاه کوه‌رنگ دیده می‌شود که مقادیر p-factor برابر صفر و d-factor برابر ۶/۰۸ است (شکل ۳- الف). برای نیاز آبی گندم نیز پایگاه ERA5 در ایستگاه رشت بهترین عملکرد را داشته است؛ مقادیر p-factor برابر ۸۶/۶۷ درصد و d-factor برابر ۱/۹۹ نشان‌دهنده کمترین عدم قطعیت است؛ اما بیشترین عدم قطعیت برای این متغیر در پایگاه MERRA-2 در ایستگاه بابلسر مشاهده می‌شود که مقادیر p-factor برابر ۳/۳۳ درصد و d-factor برابر ۶/۰۴ را ثبت کرده است (شکل ۳- ب). به‌طور کلی، پایگاه ERA5 در اکثر ایستگاه‌ها عملکرد بهتری نسبت به سایر پایگاه‌ها از نظر کاهش عدم قطعیت نشان داده است، درحالی‌که



شکل ۳- مقایسه کمترین و بیشترین عدم قطعیت نیاز آبی ذرت و گندم با روش GLUE در ایستگاه‌ها و پایگاه‌ها

در مجموع، در هر دو روش، پایگاه‌های ERA و ERA5 به دلیل داشتن مقادیر کم d-factor و مقادیر قابل قبول p-factor عملکرد بهتری در کاهش عدم قطعیت مدل‌سازی نیاز آبی ذرت و گندم داشته‌اند. به‌ویژه پایگاه ERA5 در روش Bootstrap و GLUE با ثبت مقادیر d-factor بین ۰/۴۷ تا ۲/۹۳ و p-factor بین ۶/۶۷ تا ۹۰ درصد، نشان‌دهنده برتری آن در تخمین دقیق نیاز آبی است. در مقابل، پایگاه MERRA-2 در هر دو روش با ثبت بالاترین مقادیر d-factor (تا ۶/۰۸) در روش

GLUE و Bootstrap (در روش Bootstrap) و کمترین p-factor (صفر درصد در چند ایستگاه) ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است. این نتایج اهمیت انتخاب پایگاه داده مناسب، مانند ERA5 و ERA-Interim را برای کاهش عدم قطعیت و بهبود پیش‌بینی‌های نیاز آبی محصولات کشاورزی نشان می‌دهد. در جدول ۴، نتایج عدم قطعیت متغیر عملکرد ذرت و گندم با استفاده از روش‌های GLUE و Bootstrap آمده است.

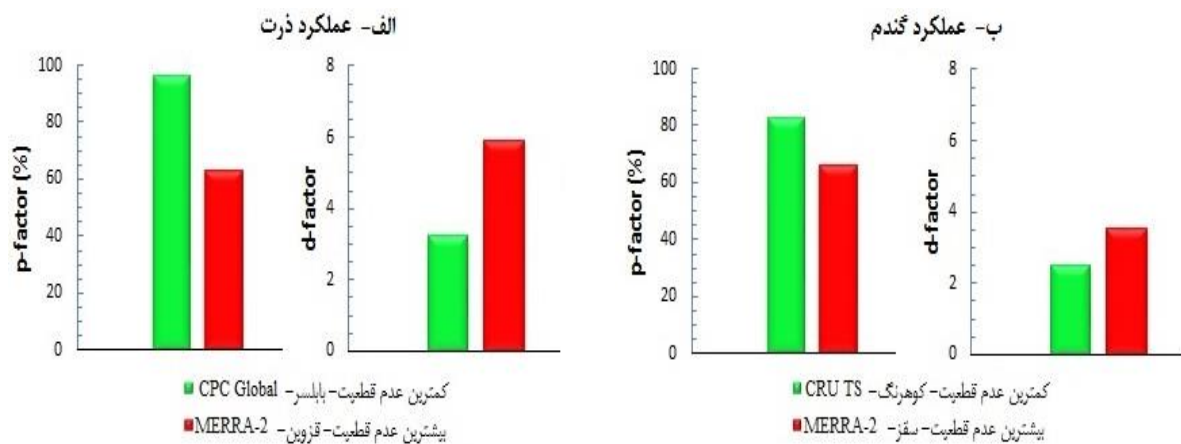
جدول ۴- مقایسه نتایج عدم قطعیت عملکرد ذرت و گندم با استفاده از روش‌های Bootstrap و GLUE

نتایج عدم قطعیت عملکرد ذرت با روش Bootstrap	نتایج عدم قطعیت عملکرد ذرت با روش GLUE	
CRU TS (اهواز) ۴۶٪/۶۷ و ۰/۳۱ *	CPC Global (بابلسر) ۹۶٪/۶۷ و ۳/۲۹ *	کمترین عدم قطعیت
MERRA-2 (قزوین) ۱۰٪ و ۱/۲۷ *	MERRA-2 (قزوین) ۶۳٪/۳۳ و ۵/۹۴ *	بیشترین عدم قطعیت
CPC Global (۵ ایستگاه) سپس ERA5 و CRU	CPC Global (۳ ایستگاه)-ERA5 و CRU TS (هرکدام ۲ ایستگاه)	پایگاه با بهترین عملکرد
MERRA-2 (۷ ایستگاه)	MERRA-2 (۶ ایستگاه)	پایگاه با ضعیف‌ترین عملکرد
نتایج عدم قطعیت عملکرد گندم با روش Bootstrap	نتایج عدم قطعیت عملکرد گندم با روش GLUE	
CPC Global (کوه‌رنگ) ۳۰٪ و ۰/۶۱ *	CRU TS (کوه‌رنگ) ۸۳٪/۳۳ و ۲/۵۵ *	کمترین عدم قطعیت
MERRA-2 (سقز) ۶٪/۶۷ و ۰/۷ *	MERRA-2 (سقز) ۶۶٪/۶۷ و ۳/۵۴ *	بیشترین عدم قطعیت
CRU TS (۶ ایستگاه)	CRU (۴ ایستگاه)-CPC Global (۳ ایستگاه)	پایگاه با بهترین عملکرد
MERRA-2 در ۴ ایستگاه	MERRA-2، CPC Global و ERA-Interim (هرکدام ۳ ایستگاه)	پایگاه با ضعیف‌ترین عملکرد

\* اعداد به ترتیب مربوط به شاخص‌های p-factor و d-factor است

factor به ترتیب ۶۶/۶۷ درصد و ۳/۵۴، ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داده است (شکل ۴-ب). همچنین، پایگاه CRU TS در چهار ایستگاه و پایگاه CPC Global در سه ایستگاه، عملکرد بهتری نسبت به دیگر پایگاه‌ها داشته‌اند. پایگاه MERRA-2 نیز در بیشتر ایستگاه‌ها بالاترین میزان عدم قطعیت را ثبت کرده است. در روش Bootstrap، نتایج نشان‌دهنده کاهش کلی مقادیر p-factor و d-factor نسبت به روش GLUE است. برای متغیر عملکرد ذرت، پایگاه CRU TS در ایستگاه اهواز با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۴۶/۶۷ درصد و ۰/۳۱، کمترین عدم قطعیت را داشته است. در حالی که پایگاه MERRA-2 در ایستگاه قزوین با مقادیر p-factor برابر ۱۰ درصد و d-factor برابر ۱/۲۷، بیشترین عدم قطعیت را نشان داده است. برای متغیر عملکرد گندم، پایگاه CPC Global در ایستگاه کوه‌رنگ با مقادیر p-factor برابر ۳۰ درصد و d-factor برابر ۰/۶۱، بهترین عملکرد را داشته است. همچنین، پایگاه MERRA-2 در ایستگاه سقز با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۶/۶۷ درصد و ۰/۷، بیشترین عدم قطعیت را ثبت کرده است.

نتایج حاصل از روش‌های Bootstrap و GLUE نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجهی در میزان عدم قطعیت متغیر عملکرد ذرت و گندم در ایستگاه‌های مختلف است. در روش GLUE، پایگاه داده CPC Global در ایستگاه بابلسر برای متغیر عملکرد ذرت با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۹۶/۶۷ درصد و ۳/۲۹، کمترین عدم قطعیت را داشته و بهترین عملکرد را از خود نشان داده است و در مقابل، پایگاه MERRA-2 در ایستگاه قزوین با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۶۳/۳۳ درصد و ۵/۹۴، بالاترین میزان عدم قطعیت را ثبت کرده است (شکل ۴-الف). این نتایج حاکی از کیفیت پایین‌تر داده‌های پایگاه MERRA-2 برای مدل‌سازی عملکرد ذرت است. به‌طور کلی، پایگاه CPC Global در سه ایستگاه و پایگاه‌های ERA5 و CRU هرکدام در دو ایستگاه نتایج مناسبی ارائه داده‌اند، در حالی که MERRA-2 در شش ایستگاه از هشت ایستگاه بیشترین عدم قطعیت را نشان داده است. در مورد متغیر عملکرد گندم، پایگاه CRU TS در ایستگاه کوه‌رنگ با مقادیر p-factor و d-factor به ترتیب ۸۳/۳۳ درصد و ۲/۵۵، بهترین عملکرد را داشته است، در حالی که پایگاه MERRA-2 در ایستگاه سقز با مقادیر p-factor و d-



شکل ۴- مقایسه کمترین و بیشترین عدم قطعیت عملکرد ذرت و گندم با روش GLUE در ایستگاه‌ها و پایگاه‌ها

## نتیجه‌گیری

ذرت نشان داد که پایگاه‌های CPC Global و ERA5 بهترین عملکرد را از نظر دقت و کمترین عدم قطعیت در شبیه‌سازی‌ها داشتند. در مقابل، داده‌های اقلیمی پایگاه MERRA-2 بیشترین میزان عدم قطعیت را در شبیه‌سازی متغیرهای مورد بررسی نشان دادند و برای مدل‌سازی‌های دقیق توصیه نمی‌شوند. این نتایج بر اهمیت استفاده از داده‌های ورودی با کیفیت بالا برای افزایش دقت مدل‌سازی تأکید دارد. به‌طور کلی، روش GLUE برای تحلیل‌های جامع‌تر که نیازمند در نظر گرفتن منابع مختلف عدم قطعیت هستند، مناسب‌تر است، در حالی که روش Bootstrap به دلیل سادگی و باندهای اطمینان محدودتر، ابزاری کارآمد برای تحلیل‌های آماری دقیق‌تر و مطالعات با محدودیت زمانی یا داده‌ای به شمار می‌رود. از این رو، انتخاب روش مناسب باید متناسب با اهداف مطالعه و سطح پذیرش عدم قطعیت در نتایج شبیه‌سازی‌ها صورت گیرد. کاهش عدم قطعیت در نتایج می‌تواند به بهبود تصمیمات مدیریتی در حوزه کشاورزی و منابع آب کمک کند و امکان مدیریت بهینه‌تر منابع آبی و بهره‌وری کشاورزی را فراهم آورد. برای مطالعات آتی، پیشنهاد می‌شود که تأثیر داده‌های اقلیمی مختلف بر محصولات متنوع‌تر و در مناطق اقلیمی گوناگون بررسی شود. همچنین، توسعه روش‌های ترکیبی با بهره‌مندی از مزایای هر دو روش GLUE و Bootstrap می‌تواند به ارائه تحلیل‌های دقیق‌تر و بهبود پیش‌بینی‌ها در مدل‌های گیاهی، از جمله AquaCrop، کمک کند.

مدل AquaCrop یکی از ابزارهای کلیدی در شبیه‌سازی رشد محصولات کشاورزی و مدیریت منابع آبی است که به داده‌های اقلیمی با دقت بالا نیاز دارد. این مطالعه به مقایسه دو روش GLUE و Bootstrap در تحلیل عدم قطعیت داده‌های پایگاه‌های اقلیمی مورد استفاده در مدل AquaCrop پرداخت. هدف پژوهش، ارزیابی تأثیر دقت داده‌ها و روش‌های تحلیل عدم قطعیت بر پیش‌بینی متغیرهای کشاورزی مانند زیست‌توده، تبخیر و ترقق واقعی، نیاز آبی و عملکرد محصولات بود. نتایج نشان داد که روش GLUE، به دلیل پوشش طیف گسترده‌تری از منابع عدم قطعیت، باندهای اطمینان وسیع‌تری ارائه می‌دهد و مقادیر بالاتری برای شاخص‌های p-factor و d-factor تولید می‌کند. به‌طور خاص، کمترین عدم قطعیت زیست‌توده ذرت در پایگاه CPC Global و ایستگاه بابلسر با مقادیر p-factor و d-factor معادل ۹۶/۶۷ درصد و ۳/۳ مشاهده شد، در حالی که بیشترین عدم قطعیت در پایگاه MERRA-2 و ایستگاه قزوین با مقادیر ۶۳/۳۳ درصد و ۵/۹۸ ثبت گردید. در مقابل، روش Bootstrap با تمرکز بر عدم قطعیت آماری داده‌ها، باندهای اطمینان باریک‌تر و مقادیر کمتری از شاخص‌ها را ارائه می‌دهد. تحلیل داده‌های اقلیمی از پنج پایگاه جهانی (ERA-، ERA5، CPC Global) برای محصولات گندم و (MERRA-2 و CRU TS، Interim) برای محصولات گندم و

- Plants. 6(2): diae010.  
https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diae010
- Beven, K. J. and A. Binley. 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(3): 279-298.
- Beven, K. 2006. A manifesto for the equifinality thesis. *J. Hydrol.* 320: 18-36.
- Davison, A. C. and Hinkley, D. V. 1997. *Bootstrap methods and their application*. Cambridge University Press.
- Efron, B. and Tibshirani, R. J. 1993. *An introduction to the bootstrap*. Chapman & Hall.
- Ferreira, T. B., Shelia, V., Porter, C., Cadena, P. M., Cortasa, M. S., Khan, M. S., Pavan, W., & Hoogenboom, G. 2024. Enhancing crop model parameter estimation across computing environments: Utilizing the GLUE method and parallel computing for determining genetic coefficients. *Computers and Electronics in Agriculture*. 227(1): 109513. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109513
- Fox, J. 2016. *Applied regression analysis and generalized linear models* (3rd ed.). Sage Publications.
- Karimi, T., Reed, P., Malek, K. and Adam, J. 2022. Diagnostic framework for evaluating how parametric uncertainty influences agro-hydrologic model projections of crop yields under climate change. *Water Resources Research*, 58, e2021WR031249. https://doi.org/10.1029/2021WR031249
- Khalili, A., Hajam, S., Irannejad, P. 1992. *Climatological studies of Iran. Vol.4: Climatic divisions of Iran, Integrated water plan of Iran report series*, Jamab Consulting Engineering Co., The Ministry of Energy, Tehran, 295pp. (In Farsi)
- Mirza Alipour, S. M., Engeland, K. and Leal, J. 2022. Uncertainty assessment of flood maps: A comparison of bootstrap and Monte Carlo methods. *Journal of Hydrology*. https://doi.org/10.3850/IAHR39WC25217119202261
- Negri, C., Schurch, N., Wade, A. J., Mellander, P. E., Stutter, M., Bowes, M. J., Mzyece, C. C. and Glendell, M. 2024. Transferability of a Bayesian Belief Network across diverse agricultural catchments using high-frequency hydrochemistry and land management data. *The*
- منابع
- اکبری، ع.، پوررضا بیلندی، م.، خاشعی سیوکی، ع.، کلانکی، م. و میان‌آبادی، آ. ۱۴۰۳. بررسی عدم قطعیت پارامترهای مدل گیاهی DSSAT در برآورد عملکرد گیاه پنبه با استفاده از روش GLUE. فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۴(۴): ۳۴-۱۹. doi: 10.22126/atwe.2024.10960.1135
- شفیعی، م.، بذرافشان، ج. و ایران‌نژاد، پ. ۱۳۹۷. تحلیل عدم قطعیت پارامترها برای شبیه‌سازی جریان رودخانه با کاربرد روش GLUE. فصلنامه انجمن جغرافیای ایران، ۱۶(۵۸): ۹۹-۸۲.
- همراز، ب.، اکبرپور، ا. و پوررضا بیلندی، م. ۱۳۹۳. بررسی روش‌های مختلف تحلیل عدم قطعیت و کاربرد آن در مدل مفهومی آب‌های زیرزمینی. دومین همایش ملی بحران آب (تغییر اقلیم، آب و محیط زیست)، شهرکرد، دانشگاه شهرکرد.
- همراز، ب.، اکبرپور، ا. و پوررضا بیلندی، م. ۱۳۹۴. تحلیل عدم قطعیت پارامتری مدل MODFLOW توسط روش GLUE (مطالعه موردی: دشت بیرجند). مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۲(۶): ۶۱-۷۹.
- Abbaspour, K. C., Johnson C. A. and Van Genuchten, M. T. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone J*, 3(4),1340-1352.
- Alimaghani, S., van Loon, M. P., Ramirez-Villegas, J., Berghuijs, H. N. C. and van Ittersum, M. K. 2024. Daily bias-corrected weather data and daily simulated growth data of maize, millet, sorghum, and wheat in the changing climate of sub-Saharan Africa. *Data in brief*, 54, 110455. https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110455
- Andraos, C. 2024. Breaking Uncertainty Barriers: Approximate Bayesian Computation Advances in Rainfall-Runoff Modeling. *Water*, 16(23), 3499. https://doi.org/10.3390/w16233499
- Appiah, M., Bracho-Mujica, G., Svane, S., Styczen, M., Kersebaum, K.-C. and Rotter, R. P. 2024. Insights from utilizing data of different quality levels for simulating barley performance under Nordic conditions: The Agricultural Production Systems SIMulator model evaluation. *In silico*

- <https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/21/11/JHM-D-20-0100.1.xml>
- Vazquez, R.F., Beven, K. and Feyen, J. 2009. GLUE based assessment on the overall predictions of a MIKE SHE application, *Water Resour. Manage.* 23: 1325–1349.
- World Bank. 2024. Iran, Islamic Republic of: Climate data historical. Retrieved December 27, 2024, from <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/iran-islamic-rep/climate-data-historical>
- Zhang, Y., Zhang, Y., Jiang, H., Tang, L., Liu, X., Cao, W. and Zhu, Y. 2024. Effects of different observed datasets on the calibration of crop model parameters with GLUE: A case study using the CROPGRO-Soybean phenological model. *PLoS ONE.* 19(6): e0302098. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0302098>.
- Science of the total environment, 949, 174926. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174926>
- Ramezani Etedali, H., Adabi, V., Gorgin, F. and Azizian, A. 2023. The probabilistic behavior of AquaCrop parameters: a Monte-Carlo study. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(2), 717-734. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02309-9>
- Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M. and Xu, C. 2015, Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications, *Journal of hydrology*, 523, 739-757.
- Tarek, M., Brisette, F. P. and Arsenault, R. 2020. Large-Scale Analysis of Global Gridded Precipitation and Temperature Datasets for Climate Change Impact Studies, *Journal of Hydrometeorology*, 21(11), 2623-2640. Retrieved Nov 16, 2022, from

## Comparative Analysis of Bootstrap and GLUE Methods for Uncertainty Assessment of Climatic Databases in AquaCrop Model Simulations

Y. Radmanesh<sup>1</sup>, M. Sarai Tabrizi<sup>2\*</sup>, H. Ramezani Etedali<sup>3</sup>, A. Azizian<sup>4</sup> and H. Babazadeh<sup>5</sup>

### Abstract

The AquaCrop model, developed by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), is a crucial tool for simulating crop growth and agricultural water productivity, in which climatic data constitute essential inputs. Global gridded climate databases are useful tools for compensating for the limitations of ground-based meteorological stations, such as low spatial density, short historical records, and data gaps. This study aims to compare the GLUE and Bootstrap methods for assessing the uncertainty of climatic data derived from global databases. To achieve this, climatic variables including temperature, precipitation, and data required for estimating potential evapotranspiration were extracted at a monthly scale from CPC Global, CRU TS, ERA5, ERA-Interim, and MERRA-2 databases for the period 1989–2019. These data were used to simulate biomass, actual evapotranspiration, crop water requirement, and yield of wheat and maize using the AquaCrop model at eight synoptic stations across Iran, each representing different climate conditions based on the extended De Martonne classification. The results indicated that the GLUE method produced wider uncertainty bands and exhibited higher p-factor and d-factor values. The lowest uncertainty in maize biomass was observed for the CPC Global dataset at the Babolsar station (p-factor= 96.67%, d-factor= 3.30), while the highest uncertainty occurred for the MERRA-2 dataset at the Qazvin station (p-factor= 63.33%, d-factor= 5.98). The Bootstrap method also demonstrated the lowest uncertainty for the CPC Global dataset. Among the evaluated datasets, ERA5 and CPC Global, due to their higher data accuracy, were identified as more suitable options for crop modeling, whereas MERRA-2 exhibited the highest uncertainty. Overall, the GLUE method is more appropriate for comprehensive uncertainty analyses, while the Bootstrap method, due to its simplicity and narrower uncertainty bands, is better suited for studies with limited time or data availability.

**Keywords:** AquaCrop model, Bootstrap method, Climatic datasets, GLUE method, Uncertainty estimation

<sup>1</sup>Ph.D. student of Water Resources Engineering, Department of Water Engineering and Sciences, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Water Engineering and Sciences, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran (\*Corresponding Author Email: m.sarai@iau.ac.ir)

<sup>3</sup>Professor, Water Sciences and Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

<sup>4</sup>Associate Professor, Water Sciences and Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

<sup>5</sup>Professor, Department of Water Engineering and Sciences, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 23 Jan 2025

Accepted: 25 May 2024