Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Application of Bayesian Model Averaging (BMA) Approach to Estimating Wheat Yield in Golestan Province

AREZOO KAZEMI[1], ZAHRA AGHASHARIATMADARI[2]✉

1. Department of Irrigation & Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: arezookazemi71@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: zagha@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: June. 6, 2022

Revised: Sep. 13, 2022

Accepted: Oct. 1, 2022

Published online: Nov. 22, 2022

Keywords:
Machine Learning,
Maximum Likelihood Function,
Crop Modeling,
Expectation-Maximization Algorithm.

ABSTRACT

Wheat is a strategic crop for food security, so accurate forecasting of its performance is important for planning and adopting appropriate policies for import or export. Crop models use climatic, soil, cultivar type and crop management data to predict crop growth, development and yield. The purpose of this study was to improve the accuracy of estimating wheat yield using a combination of recommended crop models in Golestan province using Bayesian model averaging (BMA). In this study, first, the ability of DSSAT, CropSyst and SSM-Wheat models was evaluated to estimate wheat yield in Golestan province. According to the results, the DSSAT model with root mean square error (RMSE) equal to 290 kg ha-1, coefficient of determination (R2) equal to 96%, mean square root of normalized error (NRMSE) equal to 6.34 and the efficiency of the model (EF) equal to 0.9 has the most accurate estimation as compared to two other models. In the next step, using the BMA approach, binary and ternary combinations were taken from three crop models, which led to the production of four new models. Comparing the performance of BMA models with individual models, showed that the combination of models improves the accuracy of estimation. Thus, the amount of RMSE in the C23 model (which is the result of combining DSSAT and SSM-Wheat models (was reduced by 30% compared to the amount of yield calculated by the best single model (DSSAT) and reached 202 kg ha-1. Also, the value of R2 in the C23 model reached 97%. Therefore, the combination of models improves the accuracy, estimating wheat yield.

Cite this article: Kazemi, A., Aghashariatmadari, Z., (2022) Application of Bayesian model averaging (BMA) approach to estimating wheat yield in Golestan province, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, http//doi.org/ 10.22059/ijswr.2022.343977.669286, 53 (9), 2045-2059.

© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343977.669286

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۳، شماره ۹ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

کاربست رهیافت میانگین‌گیری مدل بیزی (BMA) برای تخمین عملکرد گندم در استان گلستان

آرزو کاظمی[۱]، زهرا آقاشریعتمداری[۲]✉
۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ایمیل: arezookazemi71@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ایمیل: zagha@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۳/۱۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۶/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۹
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۹/۱

واژه‌های کلیدی:
یادگیری ماشین،
حداکثر تابع درست‌نمایی،
مدل‌سازی گیاهی،
الگوریتم بیشینه‌سازی امیدریاضی.

چکیده

گندم محصولی استراتژیک در امنیت غذایی است لذا پیش‌بینی دقیق عملکرد آن جهت برنامه‌ریزی و اتخاذ سیاست‌های مناسب در جهت واردات یا صادرات امری مهم محسوب می‌شود. مدل‌های زراعی با استفاده از داده‌های اقلیمی، خاک، نوع ارقام و مدیریت زراعی، رشد، نمو و عملکرد گیاهان زراعی را پیش‌بینی می‌کنند. هدف از این پژوهش بهبود دقت برآورد عملکرد گندم با استفاده از ترکیب مدل‌های توصیه شده در استان گلستان و به‌کمک میانگین‌گیری مدل بیزی (BMA) است. در این مطالعه ابتدا، توانایی مدل‌های شبیه سازی DSSAT، CropSyst و SSM-Wheat در برآورد عملکرد گندم در استان گلستان مورد ارزیابی قرار گرفت. طبق نتایج، مدل DSSAT با داشتن مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با ۲۹۰ کیلوگرم در هکتار، ضریب تبیین (R^2) برابر با ۹۶٪، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) برابر با ۶/۳۴ و مقدار راندمان مدل (EF) برابر با ۰/۹، نسبت به دو مدل دیگر برآورد دقیق‌تری از عملکرد گندم می‌دهد. در مرحله بعد به‌کمک رهیافت BMA، ترکیب‌های دوتایی و سه تایی از سه مدل زراعی گرفته‌شد که منجر به تولید چهار مدل جدید شد. با مقایسه عملکرد حاصل از این مدل‌ها نسبت به مقدار عملکرد محاسبه شده توسط مدل‌های منفرد، مشاهده شد که ترکیب مدل‌ها موجب بهبود دقت در برآورد عملکرد می‌شود. به‌طوریکه مقدار جذر میانگین مربعات خطا در مدلC23 (حاصل ترکیب مدل‌های DSSAT و SSM-Wheat) نسبت به مقدار عملکرد محاسبه‌شده توسط بهترین مدل منفرد (DSSAT)، ۳۰٪ کاهش یافت و به مقدار ۲۰۲ کیلوگرم در هکتار رسید. همچنین مقدار ضریب تبیین در مدل C23 به ۹۷٪ رسید. بنابراین ترکیب مدل‌ها موجب بهبود دقت در برآورد عملکرد گندم می‌شود.

استناد: کاظمی؛ آرزو، آقا شریعتمداری؛ زهرا، (۱۴۰۱) کاربست رهیافت میانگین‌گیری مدل بیزی (BMA) برای تخمین عملکرد گندم در استان گلستان، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، http//doi.org/ 10.22059/ijswr.2022.343977.669286 ، ۵۳ (۹)، ۲۰۴۵- ۲۰۵۹.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343977.669286
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.

مقدمه

گندم یکی از مهم‌ترین تولیدات زراعی جهان است و در میان غلات از نظر سطح زیر کشت و تولید سالانه، مقام اول را داراست (Aslani et al., 2021). استان گلستان یکی از قطب‌های مهم تولید گندم در ایران است به‌طوری که براساس آمارنامه وزارت جهادکشاورزی در سال زراعی ۹۹-۹۸ بیش از ۳۵۵ هزار هکتار اراضی استان گلستان زیر کشت گندم (آبی و دیم) رفته که از آن بیش از ۱/۲میلیون تن گندم برداشت شده است. از این جهت استان گلستان پس از استان خوزستان و فارس در رتبه سوم کشور قرار گرفته‌است (Ahmadi et al., 2021).

اتخاذ تصمیم‌های درست و راهبردی درباره تولید محصولات کشاورزی و برنامه‌ریزی برای تأمین نیاز غذایی جمعیت روبه رشد، نیازمند پیش‌بینی و مدل‌سازی دقیق عملکرد اقتصادی است. مدل‌های زراعی، در واقع بیان ریاضی مراحل و فرآیندهای رشد گیاه تحت تأثیر عوامل محیطی و مدیریتی است و به دلیل فراهم آوردن امکان پیش‌بینی مراحل رشد گیاهی و عملکرد، بسیار حائز اهمیت است (Dahmardeh et al., 2021). در واقع، مدل‌ها با استفاده از داده‌های اقلیمی، خاک، نوع ارقام و مدیریت زراعی، رشد، نمو و عملکرد گیاهان زراعی را پیش‌بینی می‌کنند. از همین رو مطالعات فراوانی در جهت بررسی دقت مدل‌ها در شبیه‌سازی مراحل رشد و نمو گیاهی در مورد گیاهان زراعی مختلف و در مناطق مختلف صورت گرفته است (Jing et al., 2021; Chen et al., 2021; Manschadi et al., 2022; Kumar et al., 2021; Ouda et al., 2021). در استان گلستان نیز مطالعاتی در این زمینه صورت گرفته است و استفاده از نرم‌افزارهای DSSAT[1]، CropSyst[2]، SSM-Wheat[3] جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی رشد، نمو و عملکرد گندم توصیه شده‌است (MahrooKashani et al., 2010; Dastmalchi et al., 2010; Torabi et al., 2020; Soltani and Sinclar, 2015; AhmadiAlipour et al., 2018)

Ebrahimipak et al. (2019) به مقایسه سه مدل CropSyst، WOFOST و AquaCrop در برآورد عملکرد چغندرقند در شهرکرد پرداختند. مقدار آماره‌ی جذر میانگین مربعات خطا[4] (RMSE)در مدل CropSyst نسبت به دو مدل دیگر کمتر و برابر با ۲۶۰ کیلوگرم در هکتار بود. همچنین آماره راندمان مدل[5] (EF) برای مدل CropSyst برابر با ۰/۹۱ بود که نسبت به دو مدل دیگر بیشتر بود و نشان دهنده کارایی بهتر مدل CropSyst است.

Alimagham et al. (2020) به مطالعه عملکرد پتانسیل گندم آبی و تاثیر صفات گیاهی بر آن در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ (به‌عنوان اقلیم کنونی) و همچنین در سال ۲۰۵۵ (به عنوان اقلیم آینده) به کمک مدل SSM-Wheat در سراسر ایران پرداختند. طبق نتایج این مطالعه، میزان تاثیر افزایش طول دوره پر شدن دانه، به عنوان صفت کلیدی بر عملکرد پتانسیل، برای اقلیم کنونی ۱۵/۳٪ و برای اقلیم آینده تحت سناریوی انتشار RCP4.5، حدود ۱۶/۸٪ بود. افزایش کارایی استفاده از تشعشع در سطح کشور باعث افزایش ۱۴/۷درصدی عملکرد برای اقلیم کنونی و ۱۳/۷٪ برای اقلیم آینده می‌شود.

Tofigh et al. (2020) به ارزیابی مدل DSSAT در برآورد تبخیرتعرق، نیازآبی، عملکرد گندم و کارایی مصرف آب در شهرکرد پرداختند. آنالیز حساسیت روش‌های فائوپنمن‌مانتیث[6] و پریستلی‌تیلور[7] در برآورد تبخیرتعرق نشان داد که روش فائوپنمن‌مانتیث با مقادیر RMSE برابر با ۱/۵۷و ضریب همبستگی ۰/۹۷روش بهینه‌ای در برآورد تبخیرتعرق محصول گندم در دشت شهرکرد است. همچنین نتایج آزمون آماری روی نتایج عملکرد شبیه‌سازی شده رضایت‌بخش بود.

طبق تحقیقات Panahi et al. (2020) روی مدل SSM-Wheat برای ژنوتیپ‌های گندم نان در استان گلستان، تفاوت معنی‌داری بین ژنوتیپ‌های گندم از نظر دماهای کاردینال و طول روز بحرانی (طول روزی که در کمتر از آن سرعت نمو کاهش می‌یابد) وجود نداشت، ولی از نظر تعداد روز زیستی و ضریب حساسیت به طول روز تفاوت داشتند. بنابراین در مدل، دماهای کاردینال (حداقل، مطلوب و حداکثر) برای کلیه ژنوتیپ‌های گندم به ترتیب صفر، ۲۸ و ۴۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد. به‌علاوه مقدار طول روز بحرانی در این مدل ۲۱ ساعت به‌دست آمد و ضریب حساسیت به طول روز برای ژنوتیپ‌های گندم بین ۰/۰۰۲۷۲تا ۰/۰۰۶۹۱تعیین شد.

Fallah et al. (2021) به ارزیابی جامع مدل DSSAT-Nwheat در طیف وسیعی از مناطق ایران و برای ارقام گندم شهریار،

---

1 Decision Support System for Agrotechnology Transfer
2 Cropping Systems Simulation Model
3 Simple Simulation Model to simulate wheat
4 Root Mean Square Error
5 Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient
6 FAO Penmam_Monteithe (F.P.M)
7 Priestley-Taylor (P.T)

پیشتاز، تجن و چمران پرداختند. نتایج اعتبارسنجی عملکرد دانه ارقام گندم نشان داد که مقدار RMSE از ۵۶۸ کیلوگرم در هکتار برای رقم تجن تا ۹۳۳ کیلوگرم در هکتار برای رقم چمران متغیر بود.

با توجه به اهمیت گندم به‌عنوان یک محصول استراتژیک در امنیت غذایی، پیش‌بینی عملکرد دقیق آن امری مهم جهت برنامه‌ریزی و اتخاذ سیاست‌های مناسب در جهت واردات یا صادرات محسوب می‌شود. در تحقیقاتی که پیش از این روی این منطقه انجام شده، سه مدل DSSAT، CropSyst و SSM-Wheat برای محاسبه عملکرد گندم در این منطقه توصیه شده اند که باوجود واسنجی‌های انجام شده، همچنان دارای اختلاف قابل توجهی نسبت به داده‌های واقعی عملکرد هستند. هدف از این تحقیق بهبود دقت برآوردهای عملکرد گندم است و نوآوری این تحقیق استفاده از روش BMA برای ترکیب این مدل‌ها به منظور رسیدن به تخمین دقیق‌تر از عملکرد گندم در منطقه است. در واقع ما در این تحقیق به دنبال تولید مدل جدیدی هستیم که حاصل ترکیب مدل‌های ذکر شده است و انتظار می‌رود این مدل جدید، برآورد دقیق‌تری از عملکرد گندم منطقه بدهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

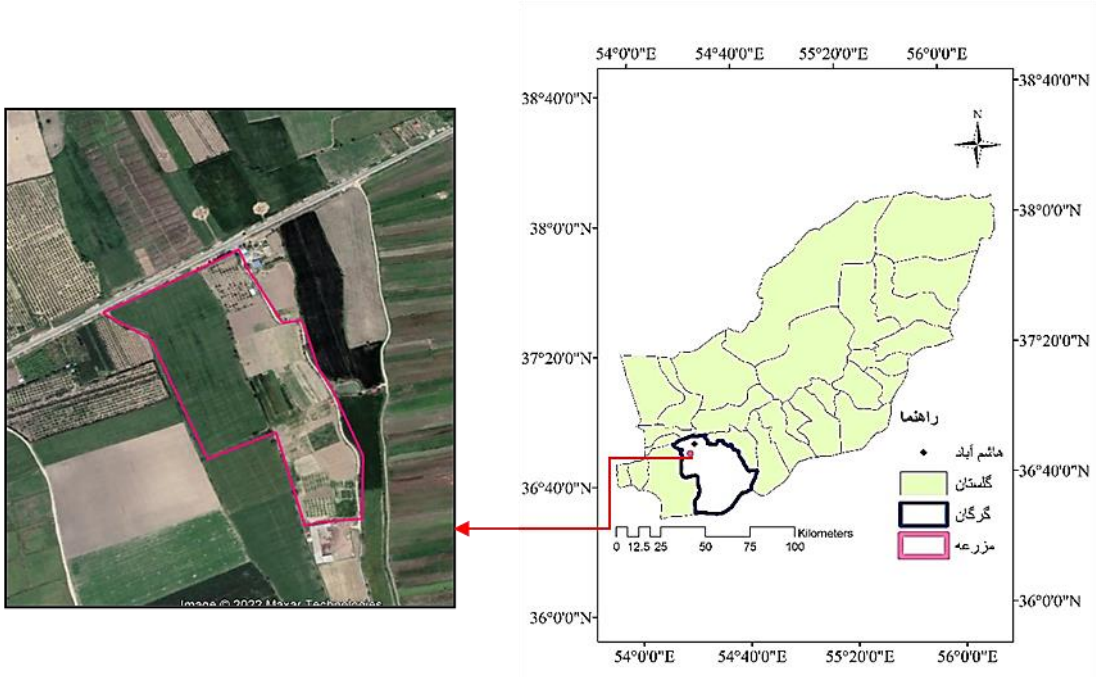
مطالعه حاضر در استان گلستان واقع در شمال شرقی ایران انجام شد. به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد گندم با استفاده از مدل‌های CropSyst، DSSAT و SSM-wheat در شرایط اقلیمی استان گلستان، از داده‌های عملکرد آزمایش‌های مزرعه‌ای مستخرج از پایان‌نامه‌های اجراشده در دانشگاه علوم‌کشاورزی و منابع‌طبیعی گرگان برای سه رقم گندم کوهدشت، تجن و زاگرس در طی سال‌های زراعی۸۷-۱۳۸۶ و ۸۸-۱۳۸۷ استفاده شد (جدول ۱).

جدول ۱ . مشخصات مزراع مورد استفاده

مزرعه	رقم	تراکم کشت (دانه در مترمربع)	تاریخ کاشت	منبع
۱	کوهدشت	۳۵۰	۱۳۸۶/۱۱/۱۰	Dastmalchi, 2010
۲	کوهدشت	۳۵۰	۱۳۸۶/۱۰/۸	
۳	کوهدشت	۳۵۰	۱۳۸۶/۱۲/۸	
۴	کوهدشت	۳۰۰	۱۳۸۷/۹/۳۰	Ghadiryan, 2011
۵	تجن	۳۰۰	۱۳۸۷/۹/۳۰	
۶	تجن	۳۵۰	۱۳۸۶/۱۱/۱۰	Dastmalchi, 2010
۷	زاگرس	۳۵۰	۱۳۸۶/۱۲/۸	
۸	زاگرس	۳۰۰	۱۳۸۷/۹/۳۰	Ghadiryan, 2011
۹	کوهدشت	۳۵۰	۱۳۸۷/۱/۸	Dastmalchi, 2010
۱۰	تجن	۳۵۰	۱۳۸۶/۱۲/۸	
۱۱	زاگرس	۳۵۰	۱۳۸۶/۱۱/۱۰	

موقعیت جغرافیایی استان گلستان، ایستگاه هواشناسی و مزارع انتخاب شده در شکل ۱ نمایش داده شده است. اطلاعات روزانه بیشینه و کمینه دمای هوا، بیشینه و کمینه رطوبت نسبی، بارندگی، سرعت باد و ساعت آفتابی برای ایستگاه سینوپتیک هاشم‌آباد از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. این ایستگاه با حداقل و حداکثر دمای سالانه $-10^{\circ}C$ و $45^{\circ}C$ و میانگین بارش سالیانه ۵۲۷/۴ میلی‌متر(میانگین ۳۰ ساله) براساس طبقه‌بندی کوپن دارای اقلیم معتدل و مرطوب است (Salarieh et al., 2021). بافت خاک مزرعه مورد مطالعه لوم رسی سیلتی[1] بوده و آزمایش‌ها در شرایط عدم محدودیت آب و عناصر غذایی انجام شده است. همچنین در طول آزمایش‌ها کنترل آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز نیز صورت گرفته‌است.

1 Silty-Clay-Loam



شکل ۱. موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه

مدل‌های زراعی مورد مطالعه

مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاه به عنوان ابزاری ارزشمند در تحقیقات کشاورزی محسوب می‌شوند. اجرای تحقیقات مزرعه‌ای در مقایسه با مدل‌های شبیه‌سازی نیازمند صرف هزینه و وقت بیش‌تری هستند. این مدل‌ها با اهداف متعددی از جمله بهبود مدیریت مزرعه، پیش‌بینی عملکرد و ریسک ناشی از تاثیرات اقلیمی، ارزیابی عملیات مطلوب مدیریتی و پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم روی رشد و عملکرد گیاه استفاده می‌شوند. طبق مطالعاتی که در استان گلستان انجام شده است سه مدل CropSyst، DSSAT و SSM-wheat برای محاسبه عملکرد گندم از دقت کافی برخوردار هستند (Dastmalchi et al., 2010; MahrooKashani et al., 2010; Soltani et al., 2013). بنابراین در این تحقیق مدل‌های CropSyst نسخه ۵، DSSAT نسخه ۴,۷,۵ و SSM-wheat مورداستفاده قرارگرفتند.

CropSyst[1]، یک تحلیل‌گر جهت بررسی تأثیر اقلیم، خاک و مدیریت بهره‌وری سامانه‌های زراعی چندساله و چندمحصوله با گام زمانی یک‌روزه است. مدل برای اجرا به شش فایل ورودی نیازمند است که عبارتند از: سناریو، هواشناسی، خاک، گیاه، مدیریت زراعی و قالب خروجی. جداسازی فایل‌ها امکان پیوند آسان‌تر CropSyst با نرم افزار GIS را فراهم آورده‌است. پارامترهای خروجی مدل عبارتند از: زمان برداشت، زمان سبزشدن، تاریخ رسیدگی، تاریخ رکود رشد یا خواب گیاه[2] (توقف رشد گیاه به دلیل شرایط آب و هوایی نامناسب برای رشد)، عملکرد محصول، وزن خشک اندام هوایی، آب زهکش‌شده از خاک، تبخیرتعرق واقعی، کل نیتروژن جذب شده و نیتروژن آبشویی شده از خاک. پارامترهای گیاهی تنها داده‌های ورودی هستند که برای نمایش صحیح گیاه و ارقام خاص نیاز به واسنجی[3] دارند. پارامترهای گیاهی این مدل شامل پارامترهای مربوط به فنولوژی، فتوپریود، بهاره‌سازی، برگ (حداکثر شاخص سطح برگ، سطح ویژه برگ، ضریب تخصیص ساقه به برگ، دوام سطح برگ و ضریب خاموشی)، و رشد (ضریب تعرق بیوماس، کارایی مصرف نور، حداکثر جذب آب، پتانسیل بحرانی آب و پتانسیل پژمردگی برگ) است. این پارامترها توسط Dastmalchi et al. (2010) برای ارقام کوهدشت، شیرودی، تجن و زاگرس به‌دست آمدند و در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مدل SSM-Wheat[4]، یک مدل ساده جهت شبیه‌سازی گندم است. این مدل شبیه‌سازی را برای سه سطح پتانسیل (تشعشع محدود)، محدودیت آب و نیتروژن به‌صورت روزانه انجام می‌دهد و به اطلاعات قابل‌دسترس هواشناسی (حداقل و حداکثر دما، تشعشع خورشیدی یا تعداد ساعات آفتابی روزانه و بارندگی روزانه)، تاریخ کاشت، میزان مصرف کودهای پایه و سرک، آبیاری، اطلاعات خاک از قبیل بافت خاک، درصد نیتروژن، نسبت شن، رس سیلت و نیز اطلاعات کاشت از قبیل تراکم و رقم بذر مصرفی، نیاز دارد. مدل با دریافت ورودی‌ها، محاسبات

1 Cropping Systems Simulation Model
2 Dormancy date
3 Calibration
4 Simple Simulation Model to simulate wheat

را از زمان کاشت تا رسیدگی انجام می‌دهد و مراحل فنولوژی، شاخص سطح برگ، تولید و توزیع ماده خشک، رشد، عملکرد، پتانسیل رطوبتی و نیتروژن خاک، میزان مصرف آب و نیتروژن گیاه و تاثیر نیتروژن بر رشد گیاه را شبیه‌سازی می‌کند (Soltani et al., 2013). فایل گیاهی حاوی پارامترهای گیاهی همچون فنولوژی، فتوپریود، بهاره‌سازی، فیلوکرون (واحد درجه حرارت بین ظهور برگ‌های متوالی بر حسب درجه سلسیوس)، تعرق، نیتروژن، رشد و عملکرد برای هر گیاه ورقم خاص است. پارامترهای مورد استفاده در زیرمدل فنولوژی در مدل SSM-Wheat شامل دماهای کاردینال، طول روز بحرانی و ضریب حساسیت به طول‌روز است که توسط Soltani et al. (2013) برای استان گلستان واسنجی[1] شده است و در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مدل DSSAT (سیستم پشتیبانی تصمیم برای انتقال فناوری کشاورزی[2])، در سال ۱۹۸۹ توسط یک شبکه بین‌المللی از دانشمندان[3]، به منظور تسهیل استفاده از مدل‌های زراعی توسعه یافت و به‌صورت موفقیت آمیزی در سراسر جهان و برای شرایط و مکان‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌است. مدل DSSAT به اطلاعات هواشناسی، خاک، مدیریت زراعی و رقم زراعی به عنوان ورودی جهت شبیه‌سازی نیاز دارد. مدل با دریافت ورودی‌ها، محاسبات را از زمان کاشت تا رسیدگی انجام داده و مراحل فنولوژی، تجمع ماده خشک، شاخص سطح برگ، رشد ریشه، ساقه، برگ و دانه گیاه و همچنین توازن رطوبت و نیتروژن خاک، میزان مصرف آب و نیتروژن گیاه و تاثیر تنش‌های آب و نیتروژن را بر رشد و نمو شبیه‌سازی می‌کند. ارقام مختلف گیاهان از نظر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی با یکدیگر تفاوت دارند که این اختلاف در رشد و نمو گیاهان تاثیر می‌گذارد و باید به نوعی در مدل‌های شبیه‌سازی در نظر گرفته شود. این مشخصات توسط هفت پارامتر به نام ضرایب ژنتیک شامل تاثیر بهاره‌سازی (P1V) و فتوپریود (P1D) بر نمو، مدت زمان پرشدن دانه (P5)، فیلوکورن (PHINT) و پارامترهای مربوط به رشد دانه که شامل تعداد دانه در هر واحد وزن کانوپی در گرده افشانی بر حسب تعداد در گرم در مترمربع (G1)، سرعت بالقوه رشد دانه بر حسب میلی‌گرم در روز (G2) و وزن خشک ساقه در شرایط مطلوب رشد برحسب گرم (G3) است. ضرایب ژنتیکی مدل DSSAT برای شرایط محیطی استان گلستان برای واریته‌های گندم (کوهدشت، شیرودی، تجن و زاگرس) توسط MahrooKashani et al. (2010) ، محاسبه شده‌است که در این تحقیق جهت اجرای مدل مورد استفاده قرار گرفت.

ترکیب مدل‌ها و میانگین‌گیری مدل بیزی (BMA)

در این مطالعه روش BMA به‌منظور ترکیب[4] مدل‌های زراعی در راستای افزایش دقت در تخمین عملکرد به‌کاربرده شد. برای اجرای BMA، کد آن در محیط برنامه‌نویسی فرترن نوشته و اجرا شد. در شکل به‌صورت شماتیک روند اجرای BMA در این تحقیق، نمایش داده‌شده است.

در این تحقیق سه مدل مورد استفاده قرار گرفتند. بنابراین طبق رابطه ۱، ترکیب های دوتایی و سه تایی (C_3^3 و C_3^2) از مدل‌ها تشکیل می‌شود و ترکیب سه مدل منجر به تولید چهار مدل جدید می‌شود.

$$C_n^r = \frac{n!}{r!\,(n-r)!} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

BMA یک رویکرد برای ترکیب چگالی‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های مختلف و تولید یک پیش‌بینی جدید از تابع چگالی احتمال (PDF) است. روش BMA روی یک متغیر وابسته y، داده‌های تعلیمی[5] y_t و مجموع همه پیش‌بینی‌های اعضا $X\{x_1, x_2, x_3, \ldots, x_k\}$ کار می‌کند. K نشان‌دهنده تعداد مدل‌ها است. بر اساس قانون جمع احتمالات، تابع چگالی احتمال (PDF) را می‌توان به‌صورت رابطه ۲ نمایش داد (Kazemi et al., 2021; Prakash and Balomenos, 2021).

$$p(y|x_1,x_2,x_3,\ldots,x_k)=\sum_{k=1}^{k} p(y|x_k).p(x_k|y_T) \quad \text{(رابطه ۲)}$$

در این رابطه $p(y|x_k)$، تابع چگالی احتمال پیش‌بینی‌شده توسط مدل شبیه‌سازی x_k، $p(x_k|y_T)$ احتمال پسین مربوط پیش‌بینی مدل x_k، y_T مربوط به داده‌های هدف و T طول داده‌ها است. درواقع، $p(x_k|y_T)$ به‌گونه‌ای وزن آماری (w_k) است. اندازه این وزن نشان می‌دهد که چقدر x_k بر y_T منطبق است و مجموع این وزن‌ها برابر یک است $\sum_{k=1}^{k} w_k = 1$. بنابراین رابطه ۲ را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد.

---

1 Calibration
2 Decision Support System for Agrotechnology Transfer
3 International Benchmark Sites Network for Agro Technology Transfer
4 Combination
5 Training data

$$p(y|x_1,x_2,\ldots,x_k)=\sum_{k=1}^{k} p\,(y|x_k).w_k$$ (رابطه ۳)

قبل از اینکه روش BMA مورداستفاده قرار گیرد، منطقی است که فرض شود $p(y|x_k)$ یک توزیع گوسی است که توسط میانگین μ_k و واریانس σ_k^2 تعریف می‌شود.

$$p(y|x_k)=g(y|\theta_k)$$ (رابطه ۴)

در این رابطه g اشاره به توزیع گوسی دارد و $\theta_k=\{\mu_k,\sigma_k,\ k=1,\ldots,k\}$ بردار پارامتر[1] را می‌دهد.

با ترکیب رابطه ۳ و ۴، PDF مربوط به پیش‌بینی احتمالاتی y روش BMA را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد.

$$p(y|x_1,x_2,\ldots,x_k)=\sum_{k=1}^{k} g(y|\theta_k).w_k$$ (رابطه ۵)

لگاریتم تابع درست‌نمایی (l) به‌منظور به دست آوردن هر دو مورد وزن‌های بیزینی w_k و بردار پارامتر θ_k مورداستفاده قرار می‌گیرد. l به‌صورت زیر تقریب زده می‌شود.

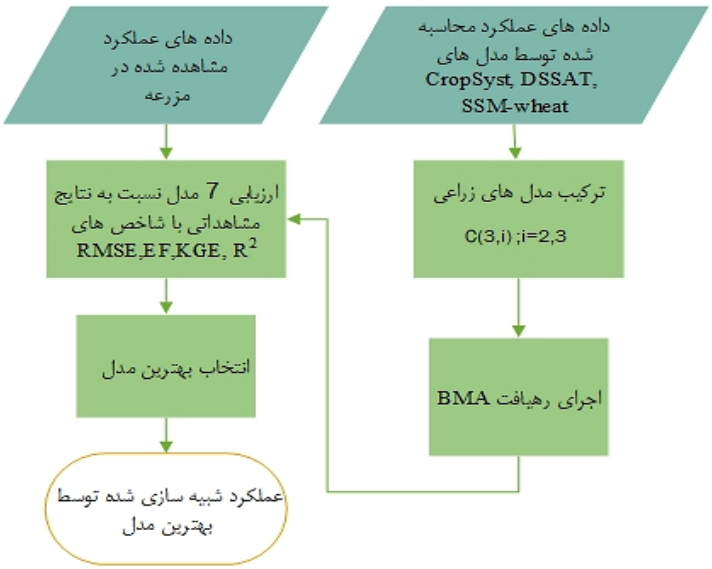
$$l(\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_k)=\sum_{(s,t)} \log\left[\sum_{k=1}^{k} g\,(y_{s,t}|\theta_k).w_k\right]$$ (رابطه ۶)

در این رابطه $\Sigma_{(s,t)}$ مجموع مشاهدات در نقطه s و $y_{s,t}$ به داده‌های هدف در نقطه s و زمان t اشاره می‌کند. مدل BMA وزن‌ها (w_k) و بردار پارامتر (θ_k) را در حین بیشینه‌سازی لگاریتم تابع درست‌نمایی محاسبه می‌کند.

ازآنجاکه $g(y|\theta k)$ تابع گوسی است تخمین بیش‌ترین درست‌نمایی میانگین شبیه‌سازی‌های مدل‌های منفرد k ، (μ_k) درواقع همان مقادیر X_k است، یعنی $X_k=\mu_k$، بنابراین $\theta=\{W_k,\ \sigma^2_k\}$ پارامترهای آماری نامعلوم هستند که توسط بیش‌ترین درست نمایی تخمین زده می‌شوند. این کار توسط الگوریتم بیشینه‌سازی امید ریاضی[2] (EM) انجام می‌شود. درنهایت میانگین و واریانس BMA به ترتیب توسط رابطه ۷ و ۸ محاسبه می‌شود (Zou et al., 2021).

$$E[y|y_T]=\sum_{K=1}^{k} W_K X_k$$ (رابطه ۷)

$$Var[y|y_T]=\sum_{k=1}^{K} w_k(X_k-\sum_{i=1}^{K} w_i X_i)^2+\sum_{k=1}^{K} w_k\sigma_k^2$$ (رابطه ۸)



شکل ۲. روندنمای اجرای BMA در این مطالعه

1 Parameter vector
2 Expectation-Maximization

ارزیابی

مهم‌ترین مرحله در سنجش کارایی مدل، اعتبار سنجی نتایج آن مدل نسبت به داده‌های مشاهداتی مستقلی است که در مرحله واسنجی استفاده نشده‌اند (Lotfi et al., 2021). در این مطالعه از اطلاعات هفت مزرعه برای مدل‌سازی و از چهار مزرعه باقی‌مانده برای اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شد. شاخص‌های آماری ضریب تبیین[1] (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا[2] (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده[3] (NRMSE)، ضریب راندمان مدل نش–ساتکلیف[4] (EF) که به اختصار راندمان مدل نامیده می‌شود و شاخص کلینگ–گوپتا[5] (KGE) مورد استفاده قرار گرفتند.

ضریب تبیین (رابطه ۹)، قدرت توضیح دهندگی مدل را نشان می‌دهد. مقدار R^2 بین صفر تا ۱۰۰ تغییر می‌کند. مقدار یک، نشان‌دهنده همبستگی کامل بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است. در به‌کارگیری مدل‌ها برای پیش‌بینی عملکرد گفته شده‌است که مقدار R^2 باید بیش‌تر از ۶۰ درصد باشد.

$$R^2=\left(\frac{n(\sum O_iS_i)-(\sum O_i)(\sum S_i)}{\sqrt{[n\sum O_i^2-(\sum O_i)^2][n\sum S_i^2-(\sum S_i)^2]}}\right)^2*100 \quad \text{(رابطه ۹)}$$

که در رابطه فوق Oi مقادیر مشاهده‌شده و Si مقادیر شبیه‌سازی‌شده است.

جذر میانگین مربعات خطا (رابطه ۱۰) اختلاف نسبی بین مشاهدات و داده‌های شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهد. مقدار این شاخص از صفر تا مثبت بی‌نهایت تغییر می‌کند. هرچه میزان خطای مقادیر شبیه‌سازی شده کمتر باشد، مقدار این شاخص به صفر نزدیک‌تر و دقت مدل بیش‌تر است. NRMSE نرمال شده‌ی RMSE است. اگر درصد این معیار بین صفر تا ۱۰ باشد شبیه‌سازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ متوسط، بین ۲۰ تا ۳۰ قابل قبول و بیشتر از ۳۰ ضعیف خواهد بود (Lotfi et al., 2021).

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i-O_i)^2} \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

$$NRMSE=\frac{RMSE}{\overline{O_i}}*100 \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

راندمان مدل (EF یا همان ضریب ناش–ساتکلیف) طبق رابطه ۱۲، برای تخمین کارایی مدل در ارتباط با میانگین داده‌های مشاهده‌شده محاسبه می‌شود. مقدار این ضریب بین منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است و مقدار بهینه این متغیر یک است (Seifi et al., 2021). در واقع هرچه مقدار این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، شبیه‌سازی مطلوب‌تر است و مدل های با EF منفی قابل قبول نیستند. که معادلات آن‌ها در زیر آمده است.

$$EF=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O_i})^2} \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

که در روابط فوق O_i مقادیر مشاهده‌شده، $\overline{O_i}$ میانگین مقادیر مشاهده شده، n تعداد مشاهدات و S_i مقادیر شبیه‌سازی‌شده است.

شاخص راندمان کلینگ–گوپتا[6] (KGE) به‌منظور ارزیابی همه‌جانبه کارایی مدل مورداستفاده قرار گرفت. که KGE به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (Agyekum et al., 2022).

$$KGE=1-ED \quad \text{(رابطه ۱۳)}$$

$$ED=\sqrt{(r-1)^2+(\alpha-1)^2+(\beta-1)^2} \quad \text{(رابطه ۱۴)}$$

$$\alpha=\frac{\sigma_s}{\sigma_o} \quad \text{(رابطه ۱۵)}$$

$$\beta=\frac{\mu_s}{\mu_o} \quad \text{(رابطه ۱۶)}$$

که در این رابطه ED فاصله اقلیدسی از نقطه ایده آل، r ضریب همبستگی بین شبیه‌سازی‌ها و مشاهدات، μ_o و σ_o میانگین و انحراف معیار مشاهدات و μ_s و σ_s میانگین و انحراف‌معیار شبیه‌سازی‌ها هستند. α به‌نوعی نسبت تغییرات در مقادیر شبیه‌سازی‌و مشاهده‌شده و β نسبت میانگین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهدات است. بدون هیچ نوع خطای شبیه‌سازی، مقادیر سه جزء، r، α و β برابر

1 Coefficient of determination
2 Root Mean Square Error
3 Normalized Root Mean Square Error
4 Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient
5 Kling-Gupta
6 Kling-Gupta

یک خواهد بود. که در این شرایط، مقدار KGE نیز برابر یک است (Hassan Abdalla et al., 2022). نتایج KGE در سه طبقه قرار می‌گیرند:

خوب (KGE≥0.75)

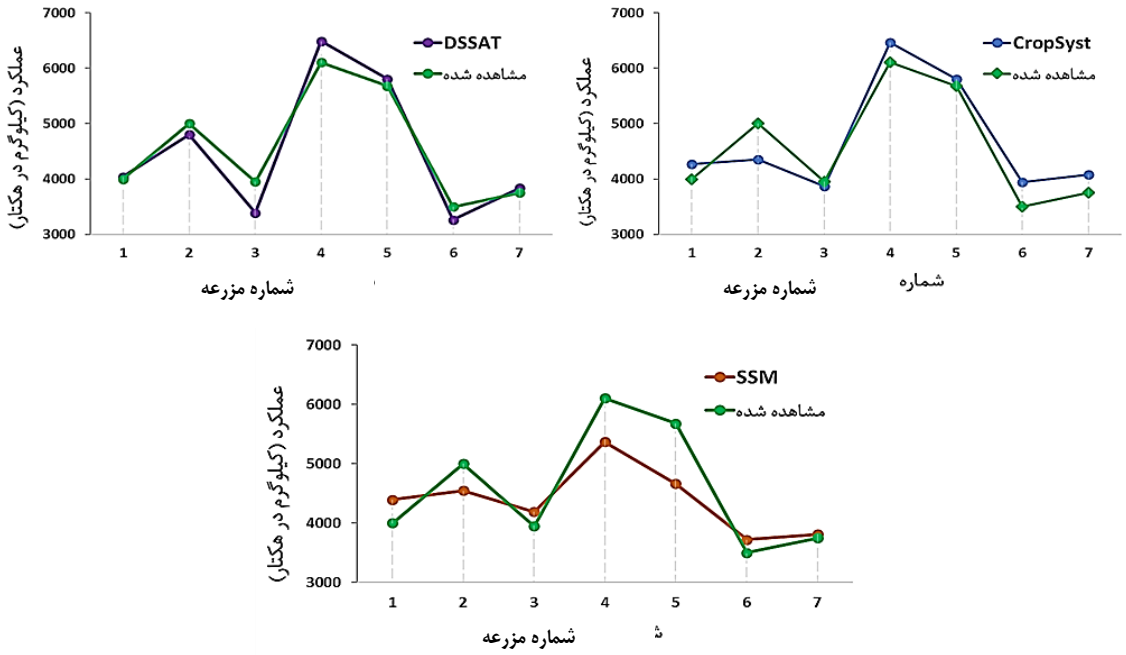
رضایت‌بخش (0.5≤KGE<0.75)

ضعیف (KGE<0.5)

نتایج

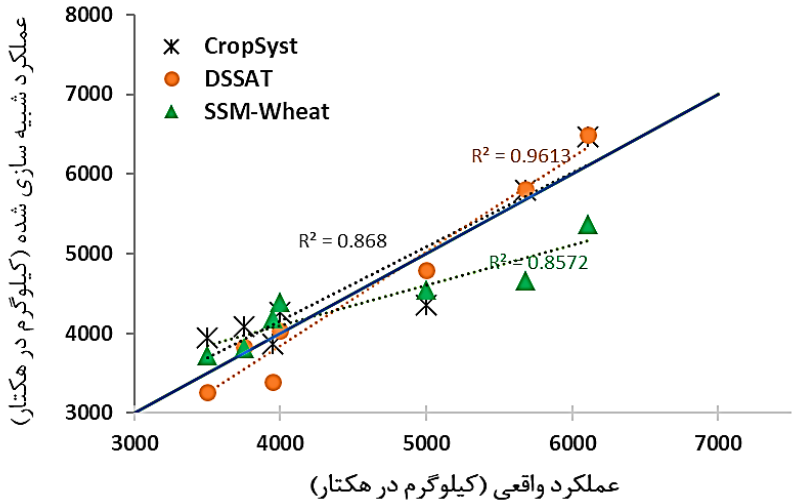
نتایج صحت‌سنجی مدل‌ها برای هفت مزرعه اول

در این پژوهش ابتدا مدل‌های CropSyst، DSSAT و SSM-wheat برای هفت مزرعه اجرا شدند که مقدار عملکرد برآورده شده توسط این مدل‌ها در مزارع در مقایسه با مقادیر مشاهده شده در شکل ۳ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود بیش‌ترین تفاوت بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی مربوط به مدل SSM است، اما در مجموع می‌توان گفت هر سه مدل برآورد مناسبی از عملکرد داشته‌اند.



شکل ۲. مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد در مزارع مورد بررسی

همچنین در شکل ۴ مقادیر عملکرد شبیه سازی شده نسبت به عملکرد واقعی در مقایسه با نیمساز ربع اول برای هر سه مدل آورده شده است. بر اساس مقدار ضریب تبیین هر سه مدل دارای نتایج قابل قبولی هستند. مقدار ضریب تبیین برای مدل DSSAT برابر با ۰/۹۶ است که بر این اساس مدل DSSAT دارای بیشترین تطابق بین مشاهدات و تخمین‌ها است. بعد از آن دو مدل CropSyst و SSM-Wheat به ترتیب با مقدار ضریب تبیین برابر با ۰/۸۶ و ۰/۸۵ قرار دارند که می‌توان گفت دارای ضریب تبیین برابری هستند. اما همانطور که در شکل مشاهده می‌شود در تعدادی از آزمایشات مدل CropSyst دارای تطابق بیش‌تری است و در سری دیگری از ایستگاه‌ها SSM_Wheat دارای تطابق بیش‌تری است و حتی در مواردی SSM-Wheat درارای برآورد دقیق‌تری نسبت به DSSAT است. بنابراین ما با ترکیب این مدل‌ها به دنبال تعریف مدل جدیدی هستیم که در کل نسبت به مدل‌های منفرد شبیه سازی دقیق‌تری انجام دهد.



شکل ۳. همبستگی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد توسط سه مدل DSSAT، CropSyst و SSM_Wheat

مقادیر شاخص‌های آماری جهت ارزیابی هفت مزرعه اول در جدول ۲، آورده شده‌است که بر اساس آن مقادیر شاخص‌های ارزیابی، تایید کننده توانایی هر سه مدل در شبیه‌سازی عملکرد گندم است. در مقایسه سه مدل با یکدیگر، مدل DSSAT دارای برآورد بهتری از عملکرد مزراع براساس شاخص‌های R^2، RMSE، EF و NRMSE است. بعد از آن مدل CropSyst دارای برآورد بهتری از عملکرد گندم در شرایط محیطی استان گلستان است.

جدول ۲. نتایج ارزیابی مدل‌های CropSyst، DSSAT و SSM در شبیه‌سازی عملکرد گندم

مدل / آماره	CropSyst	DSSAT	SSM-Wheat
R^2	۸۶/۷	۹۶/۱۳	۸۵/۷۱
RMSE (kg ha^{-1})	۳۶۸	۲۹۰	۵۴۱
EF	۰/۸۴	۰/۹۰	۰/۶۷
NRMSE	۸/۰۷	۶/۳۴	۱۱/۸۳
KGE	۰/۹۲	۰/۷۹	۰/۵۳

اجرای مدل BMA

از ترکیب مدل‌های DSSAT، CropSyst و SSM-wheat، چهار مدل جدید به وجود آمد. به این صورت که مدل C12 حاصل ترکیب مدل CropSyst و DSSAT است. مدل C13 حاصل ترکیب مدل CropSyst و SSM-wheat است. مدل C23 حاصل ترکیب مدل SSM-wheat و DSSAT است و درنهایت مدل C123 حاصل ترکیب هر سه مدل DSSAT، CropSyst و SSM-wheat است. ضرایب این مدل‌ها در هر ترکیب با کمک رهیافت BMA به دست آمد که در جدول۳ آورده شده است. به طور مثال طبق جدول۳، مدل C12 از ضرب عملکرد محاسبه شده توسط CropSyst در ۰/۴۳۹به علاوه ضرب عملکرد محاسبه شده توسط DSSAT در ۰/۵۶۱حاصل می‌شود که به طور کامل در روابط ۱۷ الی ۲۰ تعریف شده‌اند.

جدول ۳. وزن مدل‌ها در ترکیب با یکدیگر جهت تولید مدل جدید

شماره ترکیب	CropSyst	DSSAT	SSM-wheat
C12	۰/۴۳۹	۰/۵۶۱	_
C13	۰/۵۶۳	_	۰/۴۳۷
C23	_	۰/۶۲۷	۰/۳۷۳
C123	۰/۳۳۳	۰/۴۲۹	۰/۲۳۸

بر اساس جدول ۳، می‌توان مدل‌های جدید تولید شده توسط رهیافت BMA را به صورت روابط زیر تعریف کرد.

$C12 = 0.439Y_{CropSyst} + 0.561Y_{DSSAT}$ R^2=94% (رابطه ۱۷)

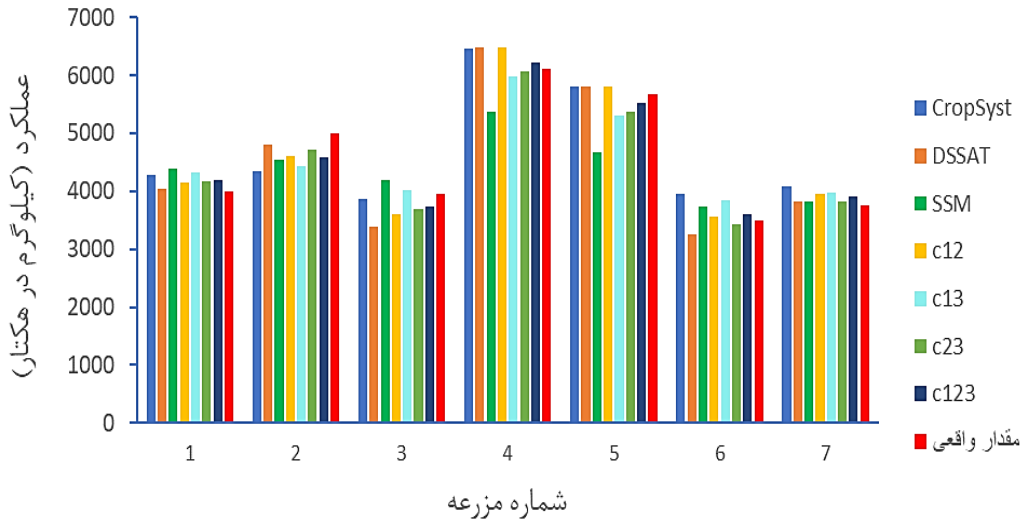
$C13 = 0.563Y_{CropSyst} + 0.561Y_{SSM}$ R^2=91% (رابطه ۱۸)

$C23 = 0.627Y_{DSSAT} + 0.373Y_{SSM}$ R^2=97% (رابطه ۱۹)

$C23 = 0.333Y_{CropSyst} + 0.429Y_{DSSAT} + 0.238Y_{SSM}$ R^2=95% (رابطه ۲۰)

که در روابط فوق $Y_{CropSyst}$، Y_{DSSAT} و Y_{SSM} به ترتیب عملکرد محاسبه شده توسط مدل‌های CropSyst ، DSSAT و SSM-Wheat است.

در شکل ۵، مقادیر عملکرد هفت مدل مورد بررسی در مقایسه با مقادیر واقعی عملکرد برای هر مزرعه نشان داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد، استفاده از BMA منجر به کاهش حداقل ۳۰ درصدی RMSE شده که معنی آن کاهش مقدار خطای برآورد عملکرد به اندازه حداقل ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نسبت به سه مدل منفرد است. همچنین مقادیر سایر شاخص‌ها در تمام هفت مزرعه نسبت به مدل‌های منفرد بهبود یافته‌است.



شکل ٤. عملکرد مشاهداتی و برآورد شده توسط CropSyst، DSSAT و SSM و چهار مدل تولید شده توسط BMA

مقادیر شاخص‌های آماری مدل‌های تولید شده توسط BMA در مقایسه با مدل‌های منفرد مورد بررسی در جدول ۴ آورده شده است. براساس آن می‌توان گفت بهترین برآورد عملکرد بین تمام مدل‌ها مربوط به مدل C23 است، به طوریکه موجب کاهش مقدار RMSE به اندازه ۶۲٪ ، ۳۰٪ و ۴۵٪ (به ترتیب) نسبت به مدل‌های SSM-wheat، DSSAT و CropSyst شد. مقدار شاخص راندمان مدل (EF) به اندازه ۴۱٪ ، ۵٪ و ۱۲٪ (به ترتیب) نسبت به مدل‌های SSM-wheat، DSSAT و CropSyst بهبود یافت و در واقع به یک نزدیک‌تر شد. همچنین موجب بهبود شاخص KGE به اندازه ۷۴٪، ۱۸٪ و ۱/۳٪ (به ترتیب) نسبت به مدل های SSM-wheat، DSSAT و CropSyst شد. در مجموع می‌توان گفت که از نظر تمام شاخص‌های مورد بررسی و نسبت به تمام مدل‌ها، مدل C23 دارای تخمین بهتری از عملکرد است. بعد از مدل C23، مدل C123 که حاصل ترکیب هر سه مدل است دارای نتایج بهتری است و بعد از آن مدل C12 و سپس C13 قرار دارد.

طبق نتایج Soltani and Sinclar (2015)، مقدار RMSE در مدل SSM-Wheat که به‌عنوان برترین مدل در شبیه‌سازی گندم معرفی شده، برابر با ۳۷۷ کیلوگرم در هکتار است، در حالی‌که طبق جدول ۴ با ترکیب مدل‌ها، مقدار RMSE در مدل C23 برابر با ۲۰۲ کیلوگرم در هکتار است، که معنی آن کاهش ۴۶ درصدی RMSE است.

جدول٤. آماره‌های محاسبه شده برای ارزیابی مدل‌ها در شبیه‌سازی عملکرد

آماره	CropSyst	DSSAT	SSM	C12	C13	C23	C123
R^2	۸۷	۹۶	۸۶	۹۴	۹۱	۹۷	۹۵
RMSE (kg ha^{-1})	۳۶۸	۲۹۰	۵۴۱	۲۶۶	۳۲۶	۲۰۲	۲۱۴
EF	۰/۸۵	۰/۹۱	۰/۶۸	۰/۹۲	۰/۸۸	۰/۹۵	۰/۹۵
NRMSE	۸/۰۷	۶/۳۵	۱۱/۸۴	۵/۸۴	۷/۱۵	۴/۴۲	۴/۷۰
KGE	۰/۹۳	۰/۷۹	۰/۵۴	۰/۸۹	۰/۷۷	۰/۹۴	۰/۹۵

اعتبارسنجی نتایج BMA

جهت ارزیابی و اعتبار سنجی مدل‌های تولید شده توسط BMA، از اطلاعات چهار مزرعه دیگر که در اجرای BMA، به‌کار نرفته بودند، استفاده شد که نتایج آن در جدول ۵ آورده شده‌است. بر اساس آن، میزان خطای RMSE در مدل C23، که در قسمت قبل به‌عنوان مدل برتر معرفی شد، نسبت به مدل‌های منفرد SSM، DSSAT و CropSyst به‌طور متوسط حدود ۴۳٪ کاهش یافت که معنی آن افزایش دقت مدل در براورد عملکرد حدود ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار است که بهبود چشم‌گیری محسوب می‌شود. همچنین مقدار EF حدود سه تا ۴۰٪ نسبت به سه مدل منفرد مورد بررسی بهبود یافت. در کل می‌توان گفت که ارقام شاخص‌ها تایید کننده نتایج به‌دست آمده، است.

کم‌ترین مقدار خطای RMSE در برآورد عملکرد گندم، متعلق به مدل C123 است که حاصل ترکیب هر سه مدل است. درواقع این مدل عملکرد را تنها با حدود ۱۹۰ کیلوگرم در هکتار خطا نسبت به واقعیت محاسبه می‌کند، یعنی تنها ۵ درصد خطا در برآورد عملکرد، که این بهبود محسوسی در دقت برآورد عملکرد گندم محسوب می‌شود.

جدول ۵. مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل‌های BMA در مقایسه با مدل‌های منفرد در ٤ ایستگاه شاهد

C123	C23	SSM	DSSAT	CropSyst	آماره
۹۹	۹۶	۹۶	۹۱	۸۹	R^2
۱۹۱	۴۲۷	۷۳۰	۷۴۴	۷۸۸	RMSE (kg ha^{-1})
۰/۹۷۸	۰/۸۹۱	۰/۶۸۳	۰/۶۷۱	۰/۶۳۰	EF
۴/۹	۱۱	۱۸/۷	۱۹	۲۰	NRMSE
۰/۸۵۷	۰/۸۶۲	۰/۴۵۸	۰/۷۶۶	۰/۷۶۶	KGE

استفاده از رهیافت BMA علاوه‌بر اینکه موجب افزایش دقت برآورد مدل‌ها می‌شود، در شرایطی که امکان اجرای مدل برتر توصیه شده برای منطقه فراهم نباشد، می‌توان از ترکیب دو مدل دیگر برای برآورد عملکرد استفاده نمود. به‌طور مثال اگر امکان اجرای مدل DSSAT به دلایلی همچون واسنجی نشدن برای منطقه مورد مطالعه یا دشواری کار با مدل فراهم نباشد، می‌توان از مدل C13 که حاصل ترکیب دو مدل دیگر است استفاده کرد. طبق جدول ۴، دقت برآورد مدل C13 از تک تک مدل‌های CropSyst و SSM بیشتر است و بر اساس شاخص‌های مورد مطالعه نسبت به برآوردهای DSSAT که بهترین تک مدل در برآورد عملکرد گندم در منطقه مورد مطالعه معرفی شده، دارای نتایج مشابهی است. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که در این مطالعه، نتایج مدل C13 نسبت به سایر مدل‌های تولید شده توسط رهیافت BMA دارای ضعیف‌ترین برآورد بود و جزء مدل‌های توصیه شده نبود اما همچنان نتایج بهتری را نسبت به مدل‌های CropSyst و SSM به صورت منفرد داراست. در مجموع می‌توان گفت که طبق نتایج این تحقیق، استفاده از رهیافت BMA و ترکیب مدل‌ها موجب بهبود دقت برآورد عملکرد می شود، که با نتایج تحقیقات Hao et al. (2019)، Sun et al. (2019) و Kazemi et al. (2021) در زمینه استفاده از رهیافت BMA تطابق دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه ابتدا، دقت مدل‌های زراعیDSSAT، CropSyst و SSM-Wheat در برآورد عملکرد گندم در استان گلستان مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای ارزیابی از شاخص‌های RMSE، R^2، KGE و EF استفاده شد. طبق نتایج مدل DSSAT با داشتن مقادیر RMSE برابر با ۲۹۰ کیلوگرم در هکتار، R^2 برابر با ۹۶٪، NRMSE برابر با ۶/۳۵ و مقدار EF برابر با ۰/۹۱، نسبت به دو مدل دیگر برآورد دقیق

تری از عملکرد گندم می‌دهد.

در مرحله بعد به کمک رهیافت BMA، ترکیب‌های دوتایی و سه تایی از مدل‌ها گرفته شد که منجر به تولید چهار مدل جدید شد. با مقایسه عملکرد حاصل از این مدل‌ها نسبت به مقدار عملکرد محاسبه شده توسط مدل‌های منفرد ، مشاهده شد که ترکیب مدل‌ها موجب بهبود دقت در برآورد عملکرد می‌شود. به‌طوریکه مقدار RMSE در مدل C23 (که حاصل ترکیب مدل DSSAT و SSM-Wheat است) نسبت به مقدار عملکرد محاسبه شده توسط بهترین مدل منفرد (DSSAT)، ۳۰٪ کاهش یافت و به مقدار ۲۰۲ کیلوگرم در هکتار رسید. همچنین مقدار R^2 در مدل C23 به ۹۷٪ رسید. بنابراین می‌توان گفت که با ترکیب مدل‌ها، مدلی به‌دست آمد که مقدار عملکرد را دقیق تر از مدل های منفرد برآورد می‌کند.

مدل DSSAT با داشتن ۲۹۲ پارامتر در دسته مدل‌های پیچیده قرار می‌گیرد که واسنجی آن دارای پیچیدگی‌هایی است و همچنین تعداد ورودی‌های آن نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر است. در مواردی که امکان استفاده از مدل DSSAT به هر دلیلی فراهم نباشد می‌توان از مدل C13 برای پیش‌بینی عملکرد استفاده نمود. مدل C13 حاصل ترکیب مدل‌های CropSyst و SSM-Wheat است. اما مقدار RMSE در آن ۱۱٪ کمتر از CropSyst و ۴۰٪ کمتر از SSM-Wheat است. همچنین مقدار R^2 در مدل C13 برابر با ۹۱٪ است که مقدار آن در CropSyst و SSM-Wheat به ترتیب برابر با ۸۷٪ و ۸۶٪ است.

بنابراین در مجموع می‌توان گفت BMA یک گام بعد از واسنجی مدل‌ها، به جهت افزایش دقت برآورد مدل‌ها است. در این مطالعه با ترکیب مدل‌های زراعی توصیه شده برای منطقه مورد مطالعه طبق تحقیقات قبلی (MahrooKashani et al., 2010; Dastmalchi et al., 2010; Torabi et al., 2020; Soltani and Sinclar, 2015; AhmadiAlipour et al., 2018; Ebrahimipak et al., 2019) ، در برآورد عملکرد گندم بهبود حاصل شد. همچنین در شرایطی که امکان استفاده از یک مدل (که به عنوان مدل برتر برای آن منطقه توصیه شده است) فراهم نباشد، می‌توان از ترکیب سایر مدل‌ها به جای آن استفاده کرد، به طوری که دقت قابل قبولی در حد مدل غایب داشته باشد.

سپاس‌گزاری

بدینوسیله از همکاری سازمان هواشناسی کشور به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های هواشناسی تشکر و قدردانی می‌گردد. این مقاله حاصل رساله دکتری در رشته هواشناسی کشاورزی دانشگاه تهران است.

"هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Abdalla, E. M. H., Alfredsen, K. and Muthanna, T. M. (2022). Towards improving the calibration practice of conceptual hydrological models of extensive green roofs. *Journal of Hydrology*, 607, 127548. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127548

Agyekum, J., Annor, T., Quansah, E., Lamptey, B. and Okafor, G. (2022). Extreme Precipitation Indices over the Volta Basin: CMIP6 model evaluation. *Scientific African*, e01181.

Ahmadi, K., Ebadzadeh, H., Hatami, F., Afruzi, SH., Esfandiari-Pur, E. and Abbas-Taghani, R. (2021). *Agricultural statistics 2019 first volume: crops.* Tehran: Ministry of agriculture.

AhmadiAlipour, H., Soltani, a., Kazemi, H. and Nehbandani, A. (2018). zoning golestan province in terms of the ability and the wheat production gap using a simulation model (SSM). *journal of crops improvement (journal of agriculture)*, 20(1), 129-144. https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=610238 . (In Farsi)

Alimagham, S.M., Soltani, A., Vadez, V., Zeinali, E. and Zand, E. (2020). Irrigated Wheat (Triticum aestivum L.) Traits Effects on Potential Yield under Current and Future Climates in Iran, *Agroecology journal*, 12(3), 413-431. (In Farsi)

Aslani, P., Davari, M., Mahmoodi, M., Hosseinpanahi, F., Khaleghpanah, N. (2021). Effect of zeolite and nitrogen on some basic soil properties and wheat yield in potato-wheat rotation. *Journal of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization, (Scientific Journal of Agriculture)*, 44(1). (In Farsi)

Chen, S., He, L., Cao, Y., Wang, R., Wu, L., Wang, Z., ... and He, J. (2021). Comparisons among four different upscaling strategies for cultivar genetic parameters in rainfed spring wheat phenology simulations with

the DSSAT-CERES-Wheat model. *Agricultural Water Management*, 258, 107181.

Dahmardeh, A., Shahriari, A., Pahlavan Rad, M., Shabani, A., GHOEBANI, M. (2021). Modeling wheat yield using some soil properties at the field scale (Case study: Sistan dam research farm, university of Zabol*). Journal of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization, (Scientific Journal of Agriculture)*, 44(1). (In Farsi)

Dastmalchi, A. (2010). *Simulating wheat growth and development using CropSyst model under Golestan province Condition.* M.Sc. thesis, Gorgan University of agricultural sciences and natural resources. (In Farsi)

Ebrahimipak, N.A. and Egdernezhad, A. (2019). Assessment of AquaCrop, WOFOST and CropSyst models for Estimating Sugar Beet Yield under Water Deficit Conditions, *Journal of Hydrology and Soil Science*, 23(1), 199-207. (In Farsi)

Fallah, M.H., Nezami, A., Khazaie, H.R. and Nassiri Mahallati, M. (2021). Evaluation of DSSAT-Nwheat Model across a Wide Range of Climate Conditions in Iran. *Agroecology journal*, 12(4), 561-580. (In Farsi)

Ghadiryan, R. (2011). *Growth analysis of wheat cultivars of Golestan province.* M.Sc. thesis, Gorgan University of agricultural sciences and natural resources. (In Farsi)

Hao, Y., Baik, J. and Choi, M. (2019). Combining generalized complementary relationship models with the Bayesian Model Averaging method to estimate actual evapotranspiration over China. *Agricultural and Forest Meteorology*, *279*, 107759.

Jing, Q., McConkey, B., Qian, B., Smith, W., Grant, B., Shang, J., ... and Luce, M. S. (2021). Assessing water management effects on spring wheat yield in the Canadian Prairies using DSSAT wheat models. *Agricultural Water Management*, *244*, 106591.

Kazemi, A., Ghahreman, N., Ghamghami, M. and Ghameshloo, A. (2021). Application of Bayesian Model Averaging (BMA) Approach for Estimating Evapotranspiration in Gorganrood-Gharesoo Basin, Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021; 23 (6) :1395-1409. http://jast.modares.ac.ir/article-23-45031-en.html . (In Farsi)

Kumar, R., Yadav, R. S., Kumawat, A., Yadava, N. D., Rathore, V. S., Nangia, V. and Pareek, N. K. (2021). Evaluation of CropSyst model for soil moisture and water productivity of wheat. *Journal of Soil and Water Conservation*, *20*(3), 330-334.

lotfi, M., Kamali, G., Meshkatee, A., Varshavian, V. (2021). Evaluation of Yield Changes and Length of Dryland Wheat Phenological Stages under RCP Scenario Using DSSAT and AquaCrop Models in Western Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(10), 2665-2677. (In Farsi)

MahrouKashani, A., Soltani, A., Galeshi, S. and KalatehArabi, M. (2010). Estimates of genetic coefficients and evaluation of model DSSAT for Golestan province. *Journal of Crop Production*, 3(2), 229-153. (In Farsi)

Manschadi, A. M., Palka, M., Fuchs, W., Neubauer, T., Eitzinger, J., Oberforster, M. and Soltani, A. (2022). Performance of the SSM-iCrop model for predicting growth and nitrogen dynamics in winter wheat. *European Journal of Agronomy*, *135*, 126487.

Ouda, S., Noreldin, T., Alarcón, J. J., Ragab, R., Caruso, G., Sekara, A. and Abdelhamid, M. T. (2021). Response of Spring Wheat (Triticum aestivum) to Deficit Irrigation Management under the Semi-Arid Environment of Egypt: Field and Modeling Study. *Agriculture* 2021, 11, 90.

Panahi, M.H., Soltani, A., Zeynali, E., KalatehArabi, M. and Nehbandani, A.R. (2020). Estimation of phenological parameters in SSM-Wheat model for bread wheat (Triticum aestivum L.) genotypes in Golestan province of Iran, *Iranian Journal of Crop Sciences*, 21(4), 302-314. (In Farsi)

Prakash, G. and Balomenos, G. P. (2021). A Bayesian approach to model selection and averaging of hydrostatic-season-temperature-time model. *Elsevier*, *33*, 4359-4370.

Salarieh, P., Khoshravesh, M., Norooz Valashedi, R., Kiani, A. (2021). Investigation the Effect of Climate Change and Planting Date on Maize Yield using WOFOST Model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(10), 2515-2527. (In Farsi)

Seifi, S., Khodashenas, S., Mosaedi, A. (2021). Prediction of Changes in Inflow Suspended to the Dam Reservoir using IHACRES Rainfall-runoff Model under the Influence of Climate Change Phenomenon (Case Study: Torogh Dam). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(10), 2539-2553. (In Farsi)

Soltani, A. and Sinclair, T. R. (2015). A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency: Simulation in a temperate, sub-humid environment. *Field Crops Research*, *175*, 37-46.

Soltani, A., Maddah, V. and Sinclair, T. R. (2013). SSM-wheat: a simulation model for wheat development, growth and yield. *International Journal of Plant Production*, *7*(4), 711-740.

Sun, H., Yang, Y., Wu, R., Gui, D., Xue, J., Liu, Y. and Yan, D. (2019). Improving estimation of cropland evapotranspiration by the Bayesian model averaging method with surface energy balance models. *Atmosphere*, 10(4), 188.

Tofigh, S., Rahimi, D. and Yazadnpanah H. (2020). Simulation of Yield, Evapotranspiration, Water Requirement and Water Use Efficiency of Wheat Using CERES-WHEAT-DSSAT Model in Shahrekord Plain, *Journal of water and soil*, 34(3), 579-592. (In Farsi)

Zou, Y., Lin, B., Yang, X., Wu, L., Muneeb Abid, M. and Tang, J. (2021). Application of the bayesian model averaging in analyzing freeway traffic incident clearance time for emergency management. *Journal of advanced transportation*, *vol. 2021*. *https://doi.org/10.1155/2021/6671983*

Torabi, B., Soltani, A., Galeshi, S., Zeinali, E. (2020). Yield Gap Analysis: quantifying the gap between actual yield and potential yields of wheat in Gorgan. *Journal of Crop Production*, 13(1), 1-24.