



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
**Water and Soil
Resources Conservation
(WSRCJ)**

Web site:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

**Vol. 14
No. 1 (53)**

Received:
2023-12-17

Accepted:
2024-04-08

Pages: 1-15

Simulation of Yield and Efficiency of Water Productivity in Soybean Plant under Deficit Irrigation and Nitrogen Fertilizer Conditions Using DSSAT Model

Amir Nikaktar¹, Ali Neshat^{2*}, Najmeh Yazdanpanah³, Ali Abdzad Gohari⁴ and Ebrahim Amiri⁵

- 1) Researcher, Department of Soil and Water Research, Hormozgan Agricultural Research and Training Center, (AREEO), Bandar Abbas, Iran.
 - 2) Associate Professor, Department of Water Engineering, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran.
 - 3) Associate Professor, Department of Water Engineering, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran.
 - 4) Researcher, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
 - 5) Professor, Department of Water Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran.
- *Corresponding author emails: a.neshat8961@gmail.com

Abstract:

Background and Aim: Water and fertilizer stress have a negative effect on many physical and chemical processes related to the efficiency of water productivity in soybean, thus leading to a decrease in the yield and quality of the plant. Predicting yield response for evaluating irrigation and fertilizer management strategies is of particular importance for making decisions. One of the decision support models in soybean is the CSM-CROPGRO-Soybean model, which is included in the DSSAT software package. The purpose of building this model is the ability to analyze systems and simulate, in order to evaluate income and risk, by changing management strategies in different places and different environmental conditions.

Method: The present research was done in Hormozgan province and in Hajiabad city with a latitude of 55 degrees and 55 minutes and a longitude of 28 degrees and 18 minutes with an average height of 1196 meters above sea level, in the cropping years of 2021 and 2022. Each experimental unit had dimensions of 5×20 meters and had 10 cultivation rows. The experiment was done in the form of split plots in the form of a randomized complete block design in 3 replications, which included the main factor without irrigation and supplying 40, 60, 80, 100, and 120% of the water requirement and the sub-factor of nitrogen fertilizer amounts included zero, 50, 100, 150 and 200 kg/hectare. In order to use the DSSAT model, data and information such as spatial location, meteorological information, soil information and agricultural operations are required. The estimation of the development process and performance in this model is based on soil-plant-atmosphere accumulation and for each soil layer, water absorption by roots and water flow in the soil are simulated.

Results: The root mean square relative error (RMSEn) based on the comparison of two years showed that in the first year, this index for seed, pod and biomass yield and water productivity based on seed, pod and biomass yields were 0.162, 0.161, 0.099, 0.304, 0.454 and 0.223 percent respectively, while in the second year it were 0.195, 0.172, 0.106, 0.349, 0.485 and 0.247 percent respectively. Index of Agreement (d or IoA) for seed, pod and biomass yield in the studied years from 0.872 to 0.939 percent and for water productivity based on seed, pod and biomass yield from 0.766 to 0.970 percent was variable, that the vicinity of this index to the number one indicates the reliability of the simulation values.

Conclusion: In general, based on the statistical results, the simulation of seed, pod and biomass yields under the effect of different irrigation requirements and different levels of nitrogen fertilizer was acceptable and it seems that the use of the model as a useful tool to support scientific research and improving decisions in water use management in soybeans in the study area are recommended.

Keywords: Williams cultivar, biomass, yield, fertilizer, water requirement



شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:

<https://wsrj.srbiau.ac.ir>

پست الکترونیک:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

سال چهاردهم

شماره ۱ (۵۳)

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۹/۲۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۱/۲۰

صفحات: ۱۵-۱

شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه سویا تحت شرایط کم‌آبایی و کود نیتروژن با استفاده از مدل DSSAT

امیر نیک اختر^۱، علی نشاط^{۲*}، نجمه یزدان پناه^۳، علی عبدالذکوهی^۴ و ابراهیم امیری^۵

(۱) محقق، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی هرمزگان، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی، بندرعباس، ایران.

(۲) دانشیار، گروه مهندسی آب، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران.

(۳) دانشیار، گروه مهندسی آب، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران.

(۴) محقق، بخش تحقیقات مدیریت آب در مزرعه، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

(۵) استاد، گروه مهندسی آب، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: a.neshat8961@gmail.com

چکیده:

زمینه و هدف: تنش‌آبی و کود بر بسیاری از فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی مرتبط با بهره‌وری مصرف آب در سویا اثر منفی دارد، بنابراین منجر به کاهش عملکرد و کیفیت گیاه می‌شود. پیش‌بینی پاسخ عملکرد برای ارزیابی استراتژی‌های مدیریت آبیاری و کود از اهمیت خاصی جهت اتخاذ تصمیم مورد نیاز است. یکی از مدل‌های پشتیبانی تصمیم در سویا، مدل CSM-CROPGRO-Soybean می‌باشد که در بسته نرم‌افزاری DSSAT قرار دارد. هدف از ساخت این مدل، توانایی آنالیز سیستم‌ها و شبیه‌سازی، به منظور ارزیابی درآمد و ریسک، از طریق تغییر استراتژی‌های مدیریتی در نقاط مختلف و شرایط محیطی مختلف است.

روش پژوهش: پژوهش حاضر در استان هرمزگان و در شهرستان حاجی‌آباد با عرض جغرافیایی ۵۵ درجه و ۵۵ دقیقه و طول جغرافیایی ۲۸ درجه و ۱۸ دقیقه با ارتفاع متوسط ۱۱۹۶ متر از سطح دریا، در سال‌های زراعی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ انجام شد. هر واحد آزمایشی دارای ابعاد ۲۰×۵ متر و دارای ۱۰ ردیف کشت بود. آزمایش به صورت طرح کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در ۳ تکرار که شامل عامل اصلی بدون آبیاری و تامین ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی و عامل فرعی مقادیر کود نیتروژن شامل صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار بود. جهت استفاده از مدل DSSAT، داده‌ها و اطلاعاتی مانند موقعیت مکانی، اطلاعات هواشناسی، اطلاعات خاک‌شناسی و عملیات زراعی مورد نظر می‌باشد. برآورد روند توسعه و عملکرد در این مدل بر اساس تجمع خاک-گیاه-اتم‌سفر بوده و برای هر لایه خاک، جذب آب توسط ریشه و جریان آب در خاک شبیه‌سازی انجام می‌شود.

یافته‌ها: ریشه میانگین مربعات خطای نسبی ($RMSE_n$) بر اساس مقایسه دو سال نشان داد که در سال اول این شاخص برای عملکرد دانه، غلاف و زیست توده و بهره‌وری مصرف آب مبتنی بر عملکرد دانه، غلاف و زیست توده به ترتیب ۰/۱۶۱، ۰/۰۹۹، ۰/۳۰۴، ۰/۴۵۴ و ۰/۲۲۳ درصد شد، در حالی که در سال دوم به ترتیب ۰/۱۹۵، ۰/۱۷۲، ۰/۱۰۶، ۰/۳۴۹، ۰/۴۸۵ و ۰/۲۴۷ درصد بود. شاخص توافق ویلموت (d) برای عملکرد دانه، غلاف و زیست توده در سال‌های مورد مطالعه از ۰/۸۷۲ تا ۰/۹۳۹ درصد و برای بهره‌وری مصرف آب مبتنی بر عملکرد دانه، غلاف و زیست توده از ۰/۷۶۶ تا ۰/۹۷۰ درصد متغیر بود که نزدیک بودن این شاخص به عدد یک، نشان‌دهنده قابل اطمینان بودن مقادیر شبیه‌سازی شده است.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی بر اساس نتایج آماری، شبیه‌سازی عملکرد دانه، غلاف و زیست توده تحت تأثیر نیازهای مختلف آبیاری و سطوح متفاوت کود نیتروژن، قابل قبول بود و به‌نظر می‌رسد استفاده از مدل به‌عنوان ابزاری راهگشا جهت پشتیبانی پژوهش‌های علمی و ارتقاء تصمیم‌گیری‌ها در مدیریت مصرف آب در سویا در منطقه مورد مطالعه قابل توصیه می‌باشد.

کلید واژه‌ها: رقم ویلیامز، زیست توده، عملکرد، کود، نیاز آبی

مقدمه

با توجه به افزایش جمعیت در جهان و مصرف مواد غذایی، در دهه‌های آینده تقاضا برای محصولات کشاورزی با افزایش بین ۵۰ تا ۱۰۰ درصد متصور است (Clark and Tilman, 2019; Searchinger et al., 2017) و این بدان معنا است که تقاضا برای غلات و بقولات بیشتر شده که می‌تواند ناامنی غذایی را در کشورهای جهان به همواره داشته باشد (Marchand et al., 2016; D'Amour et al., 2016). سویا^۱ منبع پروتئین غذایی و یکی از مهمترین دانه‌های روغنی در جهان می‌باشد که در حال حاضر برای امنیت غذایی بسیار مهم است (Thomson, 2019). این گیاه ششمین محصول کشاورزی کشت شده در جهان است که طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۳، ایالات متحده آمریکا، برزیل و آرژانتین کشورهای اصلی تولیدکننده سویا بودند که تولید سویای آن‌ها به ترتیب برابر با ۷۰ و ۸۰ درصد کل سطح برداشت و کل تولید در جهان بود (FAOSTAT, 2016).

آبیاری درصد زیادی از مصرف آب شیرین را مصرف می‌کند. با این حال، نیاز به آبیاری به سرعت افزایش یافته است که عمدتاً به دلیل کمبود شدید بارش و افزایش دمای هوا ناشی از تغییرات شرایط آب و هوایی است. زمانی که سویا در خاک‌هایی که با کمبود دائمی آب یا دوره‌ای رشد می‌کند، با آبیاری می‌توان عملکرد و حاشیه سود سویا را به طور قابل توجهی افزایش داد (Montoya et al., 2017). پاسخ سویا به کمبود آب عمدتاً در شرایط خشک یا نیمه خشک در بسیاری از آزمایشات تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است (Montoya et al., 2017). کمبود آب در خاک برای دوره‌های کوتاه مدت در طول مرحله رویشی عموماً باعث کاهش عملکرد سویا نمی‌شود، با این حال، کمبود آب شدید یا طولانی مدت می‌تواند منجر به کاهش عملکرد دانه سویا شود (Lich et al., 2013). سویا در مرحله زایشی بیشترین حساسیت را نسبت به کاهش عملکرد بالقوه در طول کمبود آب نشان می‌دهد، در حالی که کمبود در مرحله گلدهی تأثیر منفی کمی بر عملکرد دارد (Lich et al., 2013). با این حال، کمبود آب در طول مراحل بزرگ شدن غلاف و پر کردن بذر اثر منفی قابل توجهی بر عملکرد نهایی و اجزای عملکرد دارد (Lich et al., 2013; Montoya et al., 2017). یکی از عناصر ضروری برای رشد و نمو سویا، نیتروژن است. از آنجایی که سویا مقادیر نسبتاً زیادی از مواد مغذی ضروری در خاک را مصرف می‌کند، باید در مناطقی با محتوای مواد مغذی کافی پرورش داده شود (Kahraman et al., 2017; Tyagi et al., 2017; Biel et al., 2017). نیاز نیتروژن سویا به‌طور کلی با تثبیت بیولوژیکی نیتروژن به علاوه جذب نیتروژن از خاک برآورده می‌شود. گزارش شده است که

۵۰ تا ۶۰ درصد نیاز نیتروژن سویا با تثبیت بیولوژیکی برآورده می‌شود (Mourtzinis et al., 2018). سویا به دلیل محتوای پروتئین بالا در دانه، به میزان زیادی نیتروژن نیاز دارد و کاربرد نیتروژن عمدتاً بر عملکرد محصول تأثیر می‌گذارد. تهیه اطلاعات جدید به وسیله روش‌های تحقیقات زراعی سنتی برای تأمین نیازهای کشاورزی کفایت نمی‌کند. از طرفی آزمایشات زراعی مرسوم در زمان و مکان ویژه‌ای اجرا شده که نتایج آن را ویژه مکان و فصل خاصی قرار داده و نیز این آزمایشات زمان‌بر و پرهزینه هستند. از این‌رو بهره‌گیری از مدل‌های کشاورزی می‌تواند مفید واقع شود. در حال حاضر استفاده از مدل‌های رشد محصول^۲ و شبیه‌سازی‌ها بخوبی پذیرفته شده و این مطلب مستلزم آن است که کالبراسیون در مزرعه برای آزمایش محصول در زمینه‌های اقلیمی خاص انجام شود (Boote et al., 2017; Maiorano et al., 2016). مدل DSSAT^۳ یاسیستم پشتیبانی تصمیم برای انتقال فناوری کشاورزی، شامل مجموعه‌ای از برنامه‌های مستقل است که هماهنگ با یکدیگر عمل می‌کنند هدف از ساخت این مدل، توانایی آنالیز سیستم‌ها و شبیه‌سازی، به منظور ارزیابی درآمد و ریسک، از طریق تغییر استراتژی‌های مدیریتی در نقاط مختلف و شرایط محیطی مختلف بود (Singh, et al., 1991). قبل از ارائه مدل DSSAT، سازندگان آن به‌طور جداگانه در تهیه و به‌کارگیری مدل‌های CERES برای گندم (Ritchie and Otter, 1985) و ذرت (Jones and Kiniry, 1986)، مدل SOYGRO برای سویا (Wilkerson et al., 1983) و PNTGRO برای بادام‌زمینی (Boote et al., 1986) مشغول بودند. در آن زمان مدل‌های ذکر شده از نظر روش‌ها و ورودی و خروجی داده‌ها تفاوت‌های بسیاری با یکدیگر داشتند. جی. دبلیو. جونز^۴ و کی. جی. بوت^۵ از دانشگاه فلوریدا از پیشگامان ساخت این مدل بوده‌اند. مدل CSM-CROPGRO-Soybean یکی از قوی‌ترین و گسترده‌ترین مدل‌هایی است که برای شبیه‌سازی محصول سویا استفاده می‌شود (Boote et al., 1998). این مدل دارای ساختار ترکیبی است (Jones et al., 2001)، که فرآیند تعادل کربن و نیتروژن (Godwin and Allan, 1991; Ritchie, 1998; Godwin and Singh, 1998)، تعادل آب خاک (Ritchie, 1998; Silva et al., 2021; Dias et al., 2020; Edreira et al., 2018; Er-Raki et al., 2008; Timsina et al., 2020; al., 2020) و رشد و توسعه سویا (Boote et al., 1998; Bhatia et al., 2008) و تولید محصول تحت شرایط تغییرات آب و هوایی (Adhikari et al., 2016; Antolin et al., 2021; Bao et al., 2015; Quansah et al., 2020; Souza et al., 2019) را دارد. گزارش‌ها نشان داد که افزودن آبیاری در دوره پر شدن دانه، پتانسیل عملکرد را نسبت به شرایط بدون محدودیت آب،

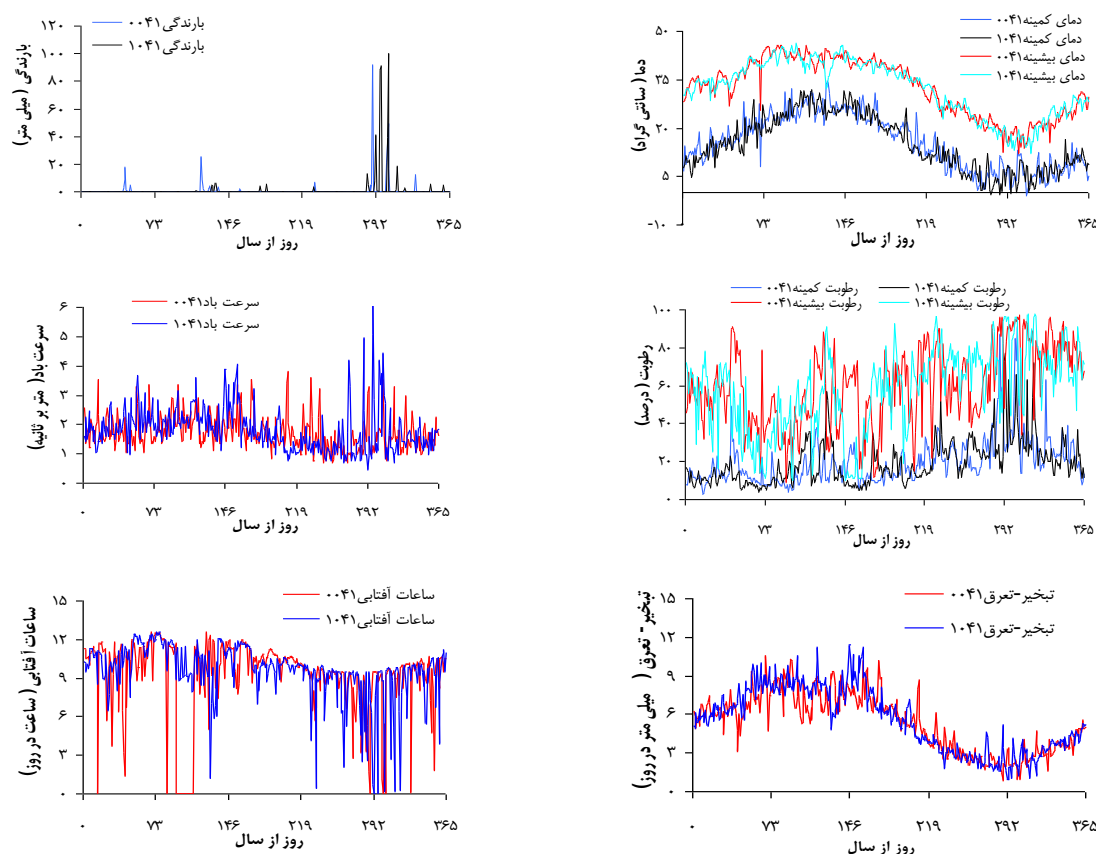
۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی و عامل فرعی مقادیر کود نیتروژن شامل صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار بود. پارامترها هواشناسی و خصوصیات خاک منطقه مورد مطالعه به ترتیب در شکل (۱) و جدول (۱) ارائه شد. رقم کشت شده سویا در این پژوهش ویلیامز بود. زمان شخم برای هر دو سال، در اواسط اردیبهشت و تاریخ کاشت سویا ۳۰ اردیبهشت- ماه و در عمق ۳ سانتی متری خاک بود. قبل از کشت نیز، بذر در قارچ کش کربوکسین تیرام به نسبت دو در هزار ضد عفونی شد. بر اساس آزمون خاک، در ابتدای فصل کشت، ۵۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات تریپل و ۱۲۰ کیلوگرم کود سولفات پتاسیم استفاده گردید. میزان مصرف کود نیتروژن به صورت تقسیط در سه نوبت به خاک داده شد. در سال دوم، تکرارهای اصلی و فرعی تقریباً در مکان کرت‌های سال اول قرار گرفتند. روش آبیاری به- کارگیری شده در این تحقیق از نوع آبیاری جویچه‌ای و فاصله بین دو ردیف ۵۰ سانتی متر و فاصله بین گیاه در هر ردیف ۵ سانتی متر بود.

افزایش می‌دهد، اگرچه میزان عملکرد شبیه‌سازی شده با کمبود آبیاری کاهش می‌یابد، ولی آب تنها عامل محدودکننده برای عملکرد نیست (Boulch et al., 2021). هدف از این تحقیق، ارزیابی مدل DSSAT در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در گیاه سویا تحت شرایط مدیریت آبیاری و کود نیتروژن می‌باشد.

مواد و روش‌ها

روش اجرای پژوهش و تیمارهای مورد مطالعه

پژوهش حاضر در استان هرمزگان و در شهرستان حاجی‌آباد با عرض جغرافیایی ۵۵ درجه و ۵۵ دقیقه و طول جغرافیایی ۲۸ درجه و ۱۸ دقیقه با ارتفاع متوسط ۱۱۹۶ متر از سطح دریا، در سال‌های زراعی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ انجام شد. هر واحد آزمایشی دارای ابعاد ۵×۲۰ متر و دارای ۱۰ ردیف کشت بود. آزمایش به- صورت طرح کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در ۳ تکرار که شامل عامل اصلی بدون آبیاری و تامین



شکل ۱. پارامترها هواشناسی منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۰

جدول ۱. خصوصیات خاک مورد مطالعه در مزرعه آزمایشی

سال	عمق خاک (سانتی‌متر)	هدایت الکتریکی (dS/m)	کربن آلی (%)	نیتروژن کل (%)	فسفر قابل جذب (mg/kg)	پتاسیم قابل جذب (mg/kg)	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	بافت خاک	ظرفیت ذرات زراعی	رطوبت حجمی (%)
۱۴۰۰	۳۰-۶۰	۱/۹	۰/۴۸۴	۰/۰۳۱	۴/۰۳	۱۰۵	۸	۳۲	۶۰	لومی‌شنی	۱۸/۱	۷
	۶۰-۳۰	۱/۸	۰/۳۲۹	۰/۰۳۵	۳/۳۶	۱۳۱	۱۰	۳۵	۵۵	لومی‌شنی	۲۰/۲	۸/۱
۱۴۰۱	۳۰-۶۰	۲/۰	۰/۵۳۶	۰/۰۹۱	۵/۱۱	۱۰۷	۸	۳۲	۶۰	لومی‌شنی	۱۸/۱	۷
	۶۰-۳۰	۱/۹	۰/۴۳۲	۰/۰۸۹	۴/۰۲	۱۳۵	۱۰	۳۵	۵۵	لومی‌شنی	۲۰/۲	۸/۱

وزن مخصوص ظاهری در عمق ۰ تا ۳۰ برابر با ۱/۴۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و در عمق ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر برابر با ۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود.

مدیریت آبیاری و بهره‌وری مصرف آب

برای تعیین تیمارهای آبیاری از تخلیه رطوبتی خاک استفاده گردید و نیاز آبی گیاه به‌عنوان تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری در نظر گرفته شد و سایر تیمارهای آبیاری به‌عنوان درصدی از این مقدار بود. برای دستیابی به تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری، رطوبت خاک در عمق ریشه گیاه، به‌نحوی محاسبه گردید که رطوبت خاک تا عمق ریشه به حد ظرفیت مزرعه برسد (رابطه ۱). مدت زمان آبیاری بر اساس رسیدن آب به جبهه رطوبتی در اطراف عمق ریشه گیاه بود.

که در آن θ_{Fc} درصد وزنی رطوبت در ظرفیت زراعی θ_i درصد وزنی رطوبت موجود در خاک ρ_b جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، D_r عمق مؤثر ریشه (سانتی-متر). تعیین رطوبت لایه‌های مختلف خاک به‌روش وزنی انجام شد. اندازه‌گیری میزان آب تحویلی به هر واحد آزمایشی توسط کنتور انجام گرفت. پس از رسیدگی گیاه، اقدام به اندازه‌گیری عملکرد و بهره‌وری مصرف آب شد. برای اجرای صحیح نمونه-برداری و حذف اثرات حاشیه‌ای، بوته‌های ردیف کناری و نیز بوته‌های واقع شده در ابتدا و انتهای کرت‌ها در نظر گرفته نشدند. برای تعیین عملکرد بیولوژیک، غلاف و دانه، ۱۲ بوته به طور تصادفی انتخاب گردید. سپس غلاف‌ها، برگ‌ها و ساقه‌ها از گیاه جدا گشتند و در داخل آون و در دمای ۷۰ درجه سانتی-گراد به مدت ۴۸ ساعت گذاشته شدند. بعد از خشک شدن، نمونه‌ها به‌وسیله ترازوی دقیق یک صدم، وزن و سپس به واحد کیلوگرم در هکتار تبدیل گردید. بهره‌وری مصرف آب بر اساس روابط (۲ تا ۴) محاسبه شد (Babazadeh and Sarai, 2012).

$$WP_{Seed} = \frac{Y_{Seed}}{WU} \quad (2)$$

$$WP_{pod} = \frac{Y_{pod}}{WU} \quad (3)$$

$$WP_{bio} = \frac{Y_{bio}}{WU} \quad (4)$$

که در آن WU، میزان آب مصرفی (میلی‌متر) و مقادیر Y_{Seed} ، Y_{pod} و Y_{bio} به ترتیب عملکرد دانه، غلاف و زیست توده (کیلوگرم بر هکتار) و مقادیر WP_{Seed} ، WP_{pod} و WP_{bio} به

داده‌های مورد نیاز مدل

مدل DSSAT رشد، توسعه و عملکرد را بر اساس تجمع خاک-گیاه-تمسفر برآورد می‌کند و برای هر لایه خاک، جذب آب توسط ریشه و جریان آب در خاک شبیه‌سازی انجام می‌شود. این مدل یک پروفیل خاک را با لایه‌های افقی متفاوت در شرایط ظرفیت نگهداری و تراکم ریشه در نظر می‌گیرد (White and Hoogenboom, 2010) و آن به‌صورت $D_r = (D_r - D_n) \times \frac{\theta_i - \theta_{Fc}}{\theta_i - \theta_{Fc}}$ با روش روش پنمن مانیتث فائو-۵۶ (Allen et al. 1998) و یا روش پرستلی-تیلور^۶ و با استفاده از داده‌های آب و هوایی و شرایط کانوپی گیاه محاسبه می‌شود. داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز برای اجرای مدل شامل موقعیت مکانی، اطلاعات هواشناسی، اطلاعات خاک‌شناسی و عملیات زراعی می‌باشد.

شاخص‌های آماری در ارزیابی مدل

بررسی نتایج مدل با استفاده از ترکیب روش‌های گرافیکی و آماری انجام شد. مقایسه مقادیر و پراکنش داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده با نمودار و خط ۱:۱ نشان داده شد. برای مقایسه آماری بین نتایج، از شاخص‌های آماری موجود در روابط (۵ تا ۱۰) استفاده شد.

$$MRE = \frac{M_i - S_i}{M_i} \times 100 \quad (5)$$

$$RMSE = (\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2 / n)^{0.5} \quad (6)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i) \quad (7)$$

$$RMSE_n = [(\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2 / n)^{0.5} / \bar{M}] \quad (8)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{M}| + |\bar{M} - M|)^2} \quad (9)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (10)$$

که در آن، $\bar{M}$ ، $\bar{S}$ ، S ، M و n به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده، شبیه‌سازی شده، میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده،

میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده است. در ارزیابی عملکرد شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده، باید مقادیر میانگین خطای نسبی (MRE)^۷، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^۸ و میانگین انحراف خطا (MBE)^۹ به صفر نزدیک باشند (Willmott, 1982; Singh et al., 2008). اگر ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (RMSE_n)^{۱۰}، کمتر از ۱۰ درصد باشد شبیه‌سازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد متوسط و بالاتر از ۳۰ درصد، ضعیف می‌باشد (Jamieson et al., 1991; Yang et al., 2014). اگر مقادیر شاخص توافق یا سازگاری (d or IoA)^{۱۱} و ضریب کارایی (EF)^{۱۲} به ۱ نزدیک‌تر باشند، نشان‌دهنده شبیه‌سازی بهتر مدل است (Willmott, 1982; Singh et al., 2008).

نتایج و بحث

ارزیابی مدل DSSAT

نتایج نشان داد که مقادیر آب مصرفی در تیمارهای ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی در سال ۱۴۰۰ به ترتیب ۲۶۵، ۳۵۴، ۴۴۴، ۵۳۳ و ۶۲۳ میلی‌متر و در سال ۱۴۰۱ به ترتیب ۲۵۹، ۳۴۷، ۴۳۵، ۵۴۱ و ۶۳۲ میلی‌متر بود. در مدل حاضر، عملکرد دانه، غلاف و زیست‌توده و مقادیر بهره‌وری مصرف آب مبتنی زیست‌توده، غلاف و دانه در تیمارهای مختلف آبیاری و کود نیتروژن بررسی شد. ضرایبی که پارامترهای اندازه‌گیری شده و واسنجی شده در گیاه سویا را در مدل تعریف می‌کنند، در جدول (۲) ارائه شده است.

با توجه به نتایج، بیشترین عملکرد دانه، غلاف و زیست توده در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و سطح ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار در سال ۱۴۰۰ به ترتیب با ۳۰۶۸، ۴۹۷۲ و ۷۲۱۹ کیلوگرم در هکتار و در سال ۱۴۰۱ به ترتیب با ۳۰۲۹، ۴۹۱۰ و ۷۱۲۸ به دست آمد (جداول ۳ و ۴). با تأمین ۱۰۰ درصد نیاز

آبی، میزان عملکرد زیست‌توده، دانه و غلاف با خطای کمی همراه بود که نشان دهنده روند تغییرات عملکرد در نیازهای مختلف آبی و سطوح متفاوت کودی در شبیه‌سازی می‌باشد. با افزایش تنش آبی و شرایط کم‌آبیاری تا سطح ۴۰ درصد نیاز آبی، مدل توانسته عملکردها را با تقریب مناسبی برآورد نماید. اما با افزایش تنش و در حالت بدون آبیاری، مدل قادر به شبیه‌سازی مناسبی از مقادیر عملکرد نمی‌باشد. ولی با این رویکرد، میزان خطای نسبی برای عملکرد زیست‌توده در سال ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ به ترتیب ۳ و ۲ درصد بود که بهترین میزان خطای نسبی را نشان داد (جدول ۳). عوارض کم‌آبی در زمان رشد رویشی به صورت رشد کم برگ‌ها، قطر کم‌ساقه و کوتاهی ارتفاع بوته ظاهر می‌شود که نتیجه آن کاهش اندام هوایی است. در پژوهشی نشان داده شد که کم‌آبی موجب کاهش برگ، فتوسنتز و تجمع ماده خشک می‌شود که در نهایت زیست‌توده یا عملکرد بیولوژیکی را کاهش می‌دهد (Abdazad Gohari and Babazadeh, 2023). در بیش‌آبیاری و در تیمار ۱۲۰ درصد نیاز آبی با مصرف کودی ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، میزان خطای نسبی در سال ۱۴۰۰ به ترتیب ۶، ۹- و ۶- درصد و در سال ۱۴۰۱ به ترتیب ۸، ۷- و ۴- درصد بود که نشان دهنده برآورد ایده‌آل مدل در شرایط بیش آبیاری بود (جداول ۳ و ۴). مصرف مناسب آب و کود نیتروژن، باعث افزایش عملکرد در نتیجه افزایش بهره‌وری مصرف آب می‌شود. استفاده از نیتروژن باعث عمیق‌تر شدن سیستم ریشه‌ای و افزایش بهره‌وری از آب می‌شود. این مطلب علاوه بر سویا، در سایر گیاهان نیز صادق است (Majidian and Ghadiri, 2002; Yousefi et al., 2011). در شرایط بدون آبیاری یا توجه به این‌که میزان آب مصرفی گیاه کمتر بود، اما بهره‌وری مصرف آب بالاتری را داشت که این امر به علت مصرف آب زیاد گیاه تحت شرایط آبیاری است.

جدول ۲. پارامترهای اندازه‌گیری شده و واسنجی شده در گیاه سویا

تعریف ضرایب	مقادیر	واحد	منابع پارامترها
زمان بین رویش گیاه و ظهور گل (R ₁)	۱۶/۵	(photothermal days)	واسنجی
زمان بین اولین گل و اولین غلاف (R ₃)	۷/۰	(photothermal days)	واسنجی
زمان بین اولین گل و اولین دانه (R ₅)	۱۲/۵	(photothermal days)	واسنجی
زمان بین اولین دانه (R ₅) و بلوغ فیزیولوژیکی (R ₇)	۲۵/۰	(photothermal days)	واسنجی
زمان بین اولین گل (R ₁) و انتهای انبساط برگ	۱۸/۰	(photothermal days)	پیش فرض
سطح برگ خاص رقم در شرایط رشد استاندارد	۴۰۰	(cm ² /g)	اندازه‌گیری شده
حداکثر اندازه برگ کامل	۱۵۰	(cm ²)	اندازه‌گیری شده
حداکثر کسری از رشد روزانه تقسیم بر دانه + پوسته	۱/۰	-	پیش فرض
حداکثر وزن در هر دانه	۰/۱۵۵	(g)	اندازه‌گیری شده
مدت پر شدن بذر برای گروه غلاف در شرایط رشد استاندارد	۲۳	(photothermal days)	اندازه‌گیری شده
میانگین بذر در هر غلاف در شرایط رشد استاندارد	۱/۷۰	-	اندازه‌گیری شده
زمان مورد نیاز رقم برای رسیدن به بار نهایی غلاف در شرایط بهینه	۷/۵	(photothermal days)	واسنجی
حداکثر نسبت (دانه/دانه+پوسته) در بلوغ	۷۸/۰	-	اندازه‌گیری شده

دلیل بالا بودن بهره‌وری مصرف آب در شرایط بدون آبیاری، مصرف آب کمتر توسط گیاه می‌باشد و علت بالاتر بودن عملکرد غلاف تحت شرایط بدون آبیاری را می‌توان به تحمل بیشتر گیاه نسبت به تنش آبی ربط داد. در این پژوهش محدوده بهره‌وری مصرف آب مبتنی بر عملکرد دانه در شرایط بدون آبیاری برای دو سال از ۱/۵۶ تا ۲/۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر بود (جدول ۴). در پژوهشی نشان داده شد که در ارقام مختلف سویا در حالت آبیاری کامل بهره‌وری مصرف آب از ۱/۶۶ تا ۲/۴۴ کیلوگرم ماده خشک به‌ازای هر گرم آب تعرق شده متغیر می‌-

باشد (Wright, 1996). بهره‌وری مصرف آب سویا بر مبنای عملکرد زیست توده با میانگین ۱/۱۱ کیلوگرم به‌ازای مصرف هر مترمکعب آب برآورد شد (Karam et al, 2005). در پژوهشی بر گیاه سویا، میزان بهره‌وری مصرف آب در شرایط آبیاری را ۰/۷۴ مترمکعب بر هکتار گزارش شد (Das, 2003). در تحقیقی دامنه نوسان بهره‌وری مصرف آب در عملکرد دانه سویا در شرایط تنش و آبیاری کامل در محدوده ۰/۵۵ تا ۱/۱۴ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش شد (Garcia et al., 2010).

جدول ۳. درصد خطای نسبی و مقادیر عملکرد زیست توده، غلاف و دانه در شرایط شبیه‌سازی و مشاهده‌ای

شماره تجربه	عملکرد اندازه‌گیری شده (کیلوگرم بر هکتار)			عملکرد شبیه‌سازی شده (کیلوگرم بر هکتار)			درصد خطای نسبی عملکرد		
	دانه	غلاف	زیست توده	دانه	غلاف	زیست توده	دانه	غلاف	زیست توده
I ₁ N ₁	۱۳۵۰s	۱۳۳۱o	۲۲۰۰q	۲۱۶۸s	۳۴۳۰v	۳۳۸۱w	۱۲۷۹	۱۲۷۹	۱۲۷۹
I ₁ N ₂	۱۷۲۸q	۱۷۰۳m	۲۸۲۳o	۲۷۸۳q	۴۳۲۰t	۴۲۵۷u	۱۲۰۲	۱۲۷۵	۱۲۷۵
I ₁ N ₃	۱۷۷۳q	۱۷۴۹m	۲۸۹۲o	۲۸۵۲p	۴۳۶۳t	۴۳۰۴t	۱۲۹۵	۱۲۹۵	۱۲۹۵
I ₁ N ₄	۱۹۶۳o	۱۹۳۶k	۳۱۹۸m	۳۱۵۲m	۴۸۳۳q	۴۷۶۵q	۱۳۱۱	۱۳۱۱	۱۳۱۱
I ₁ N ₅	۱۸۶۰p	۱۸۳۷l	۳۰۲۴n	۲۹۸۷o	۴۶۴۹s	۴۵۹۲r	۱۳۱۲	۱۳۱۲	۱۳۱۲
I ₂ N ₁	۱۵۸۱r	۱۵۶۰n	۲۵۷۹p	۲۵۴۵r	۴۰۱۶u	۳۹۶۲v	۲۰۳۴	۲۰۳۴	۲۰۳۴
I ₂ N ₂	۱۹۳۲o	۱۹۰۲k	۳۰۳۱n	۳۰۸۲n	۴۸۲۹q	۴۷۵۵q	۲۰۷۲	۲۰۷۲	۲۰۷۲
I ₂ N ₃	۱۹۹۳o	۱۹۶۰k	۳۲۴۱l	۳۱۸۷m	۴۹۰۶p	۴۸۲۴p	۲۱۰۳	۲۱۰۳	۲۱۰۳
I ₂ N ₄	۲۱۷۵m	۲۱۴۵i	۳۳۲۰k	۳۲۷۱k	۵۳۵۴n	۵۲۸۰n	۲۱۵۱	۲۱۵۱	۲۱۵۱
I ₂ N ₅	۲۰۷۲n	۲۰۴۳j	۳۳۴۷k	۳۳۰۱l	۵۱۷۹o	۵۱۰۷o	۲۱۶۰	۲۱۶۰	۲۱۶۰
I ₃ N ₁	۲۰۹۸n	۲۰۷۷m	۳۲۳۸l	۳۲۸۷p	۴۷۹۵r	۴۶۱۷s	۲۴۹۲	۲۴۹۲	۲۴۹۲
I ₃ N ₂	۲۱۸۰m	۲۱۴۵i	۳۵۲۱j	۳۴۶۶k	۵۳۶۵m	۵۲۸۱m	۲۵۵۴	۲۵۵۴	۲۵۵۴
I ₃ N ₃	۲۱۸۷m	۲۱۶۱i	۳۵۳۹j	۳۴۹۶k	۵۳۰۳n	۵۲۳۸n	۲۵۴۴	۲۵۴۴	۲۵۴۴
I ₃ N ₄	۲۴۳۵k	۲۴۰۲g	۳۹۴۷h	۳۸۹۴i	۵۹۰۴j	۵۸۲۴j	۲۶۲۴	۲۶۲۴	۲۶۲۴
I ₃ N ₅	۲۳۴۸l	۲۳۱۲h	۳۸۱۲i	۳۷۵۳j	۵۷۸۰l	۵۶۹۱l	۲۶۴۲	۲۶۴۲	۲۶۴۲
I ₄ N ₁	۲۱۶۷m	۲۱۴۱k	۳۲۰۳l	۳۱۶۰m	۴۸۴۱q	۴۷۷۶q	۲۶۴۷	۲۶۴۷	۲۶۴۷
I ₄ N ₂	۲۳۸۷l	۲۳۵۵h	۳۸۸۲i	۳۸۲۹i	۵۷۸۷l	۵۷۰۹k	۲۷۰۸	۲۷۰۸	۲۷۰۸
I ₄ N ₃	۲۴۴۸j	۲۴۱۳g	۳۹۷۴h	۳۹۱۸i	۵۸۴۶k	۵۷۶۳k	۲۷۰۲	۲۷۰۲	۲۷۰۲
I ₄ N ₄	۲۶۹۷h	۲۶۵۸e	۴۴۱۳e	۴۳۵۰e	۶۴۳۹f	۶۳۴۸g	۲۷۷۰	۲۷۷۰	۲۷۷۰
I ₄ N ₅	۲۵۶۳j	۲۵۳۰f	۴۱۸۷g	۴۱۳۵g	۶۲۱۲h	۶۱۳۵h	۲۷۹۴	۲۷۹۴	۲۷۹۴
I ₅ N ₁	۲۷۰۰g	۲۶۶۳e	۴۴۰۵e	۴۳۴۴e	۶۵۴۶e	۶۴۵۵f	۳۰۶۷	۳۰۶۷	۳۰۶۷
I ₅ N ₂	۲۷۵۸f	۲۷۱۷d	۴۴۵۶e	۴۳۸۹e	۶۵۸۷e	۶۴۸۸f	۳۱۲۳	۳۱۲۳	۳۱۲۳
I ₅ N ₃	۲۸۰۲d	۲۷۶۴d	۴۵۳۴d	۴۴۷۳d	۶۵۹۳e	۶۵۰۵e	۳۱۸۴	۳۱۸۴	۳۱۸۴
I ₅ N ₄	۳۰۶۸a	۳۰۲۹a	۴۹۷۲a	۴۹۱۰a	۷۲۱۹a	۷۱۲۸a	۳۲۳۱	۳۲۳۱	۳۲۳۱
I ₅ N ₅	۲۹۶۲b	۲۹۱۹b	۴۸۰۹b	۴۷۳۹b	۷۰۷۴b	۶۹۷۲b	۳۲۴۹	۳۲۴۹	۳۲۴۹
I ₆ N ₁	۲۵۱۹j	۲۴۸۰g	۴۱۰۳g	۴۰۳۹h	۶۱۵۴i	۶۰۵۷i	۳۰۰۴	۳۰۰۴	۳۰۰۴
I ₆ N ₂	۲۵۹۰i	۲۵۵۴f	۴۲۱۲f	۴۱۵۴g	۶۲۳۲g	۶۱۴۶h	۳۰۱۸	۳۰۱۸	۳۰۱۸
I ₆ N ₃	۲۶۱۸h	۲۵۸۴f	۴۲۵۷f	۴۲۰۲f	۶۲۰۶h	۶۱۲۵h	۳۰۱۳	۳۰۱۳	۳۰۱۳
I ₆ N ₄	۲۸۶۹c	۲۸۳۳c	۴۶۴۳c	۴۵۸۴c	۶۸۰۱c	۶۷۱۶c	۳۰۴۰	۳۰۴۰	۳۰۴۰
I ₆ N ₅	۲۷۹۱e	۲۷۴۹d	۴۵۰۹d	۴۴۴۰d	۶۷۱۵d	۶۶۱۴d	۳۰۴۵	۳۰۴۵	۳۰۴۵

تیمارها شامل بدون آبیاری (I₁) و تامین ۴۰ (I₂)، ۶۰ (I₃)، ۸۰ (I₄)، ۱۰۰ (I₅) و ۱۲۰ (I₆) درصد نیاز آبی و مقادیر

کود نیتروژن شامل صفر (N₁)، ۵۰ (N₂)، ۱۰۰ (N₃)، ۱۵۰ (N₄) و ۲۰۰ (N₅) کیلوگرم بر هکتار

جدول ۴. درصد خطای نسبی و مقادیر بهره‌وری مصرف آب در زیست‌توده، غلاف و دانه در شرایط شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای

تیمار	بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری شده (کیلوگرم بر هکتار)						بهره‌وری مصرف آب شبیه‌سازی شده (کیلوگرم بر هکتار)						خطای نسبی (درصد)					
	دانه			غلاف			زیست‌توده			دانه			غلاف			زیست‌توده		
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	
I ₁ N ₁	۱/۵۸w	۱/۵۶d	۲/۵۷e	۲/۵۴e	۴/۰۱e	۳/۹۵e	۱/۵۰	۱/۴۰	۱/۹۶	۱/۸۰	۴/۱۴	۴/۰۲	-۵	-۱۰	-۲۴	-۲۹	۲	
I ₁ N ₂	۲/۰۲v	۱/۹۹d	۳/۳۰d	۳/۳۰d	۵/۰۵d	۴/۹۸d	۱/۴۹	۱/۴۱	۱/۹۲	۱/۸۰	۴/۱۵	۴/۰۲	-۲۶	-۲۹	-۴۲	-۴۵	-۱۹	
I ₁ N ₃	۲/۰۷v	۲/۰۵c	۳/۳۴c	۳/۳۴c	۵/۱۰c	۵/۰۳c	۱/۵۱	۱/۴۳	۱/۹۵	۱/۸۴	۴/۱۸	۴/۰۴	-۲۷	-۳۰	-۴۲	-۴۵	-۲۰	
I ₁ N ₄	۲/۳۰u	۲/۲۶a	۳/۷۴a	۳/۶۹a	۵/۶۵a	۵/۵۷a	۱/۵۳	۱/۴۲	۱/۹۷	۱/۸۳	۴/۲۰	۴/۰۰	-۳۳	-۳۷	-۴۷	-۵۰	-۲۸	
I ₁ N ₅	۲/۱۸t	۲/۱۵b	۳/۴۹b	۳/۴۹b	۵/۴۴b	۵/۳۷b	۱/۵۳	۱/۴۲	۱/۹۷	۱/۸۳	۴/۲۰	۳/۹۶	-۲۹	-۳۴	-۴۴	-۴۸	-۲۶	
I ₂ N ₁	۰/۶۰s	۰/۷۰i	۰/۹۷m	۱/۱۳j	۱/۵۲j	۱/۷۷j	۰/۷۷	۰/۸۹	۱/۲۵	۱/۸۰	۱/۷۷	۲/۰۷	۲۹	۲۸	۱۱	۱۰	۱۷	
I ₂ N ₂	۰/۷۳r	۰/۷۱h	۱/۱۵i	۱/۱۵i	۱/۸۳h	۱/۷۸i	۰/۷۸	۰/۷۶	۱/۰۷	۱/۸۰	۱/۷۶	۱/۷۶	۷	۷	-۴	-۷	-۱	
I ₂ N ₃	۰/۷۵q	۰/۷۳g	۱/۲۲h	۱/۱۹h	۱/۸۵h	۱/۸۰h	۰/۷۹	۰/۷۷	۱/۰۸	۱/۱۲	۱/۸۳	۱/۷۸	۶	۶	-۹	-۹	-۱	
I ₂ N ₄	۰/۸۲p	۰/۸۰e	۱/۲۵g	۱/۳۰f	۲/۰۲f	۱/۹۷f	۰/۸۱	۰/۷۹	۱/۱۴	۱/۱۰	۱/۸۵	۱/۸۱	-۱	-۱	-۹	-۱۵	-۸	
I ₂ N ₅	۰/۷۸o	۰/۷۶f	۱/۲۶f	۱/۲۳g	۱/۹۶g	۱/۹۱g	۰/۸۲	۰/۷۹	۱/۱۵	۱/۱۱	۱/۸۶	۱/۸۲	۴	۴	-۹	-۱۰	-۵	
I ₃ N ₁	۰/۵۹n	۰/۵۹m	۰/۹۱p	۰/۹۶m	۱/۳۵m	۱/۴۷m	۰/۷۰	۰/۸۳	۰/۹۸	۱/۱۶	۱/۵۰	۱/۷۷	۱۹	۴۱	۸	۲۱	۲۰	
I ₃ N ₂	۰/۶۲m	۰/۶۰l	۰/۹۹l	۰/۹۷m	۱/۵۲j	۱/۴۷m	۰/۷۲	۰/۷۱	۱/۰۰	۰/۹۹	۱/۵۳	۱/۵۱	۱۷	۱۹	۱	۲	۳	
I ₃ N ₃	۰/۶۲l	۰/۶۰l	۱/۰k	۰/۹۷m	۱/۵۰k	۱/۴۶n	۰/۷۲	۰/۷۱	۱/۰۰	۰/۹۹	۱/۵۲	۱/۵۰	۱۶	۱۸	۰	۱	۳	
I ₃ N ₄	۰/۶۹l	۰/۶۷j	۱/۱۱j	۱/۰۹k	۱/۶۷i	۱/۶۲k	۰/۷۴	۰/۷۳	۱/۰۳	۱/۰۲	۱/۵۶	۱/۵۴	۸	۹	-۸	-۶	-۵	
I ₃ N ₅	۰/۶۶k	۰/۶۴k	۱/۰۸k	۱/۰۵l	۱/۶۳i	۱/۵۹l	۰/۷۵	۰/۷۴	۱/۰۴	۱/۰۳	۱/۵۷	۱/۵۵	۱۳	۱۴	-۳	-۲	-۲	
I ₄ N ₁	۰/۴۹j	۰/۵۲o	۰/۷۲w	۰/۸۴s	۱/۰۹q	۱/۲۷t	۰/۶۰	۰/۷۰	۰/۸۴	۱/۰۰	۱/۲۵	۱/۴۷	۲۲	۲۶	۱۷	۱۹	۱۶	
I ₄ N ₂	۰/۵۴i	۰/۵۲o	۰/۸۷r	۰/۸۵r	۱/۳۰o	۱/۲۷t	۰/۶۱	۰/۶۰	۰/۸۶	۰/۸۵	۱/۲۸	۱/۲۶	۱۳	۱۵	-۱	-۲	-۱	
I ₄ N ₃	۰/۵۵h	۰/۵۴n	۰/۹۰q	۰/۸۷q	۱/۳۲no	۱/۲۸s	۰/۶۱	۰/۶۰	۰/۸۶	۰/۸۵	۱/۲۷	۱/۲۵	۱۰	۱۲	-۴	-۳	-۲	
I ₄ N ₄	۰/۶۱h	۰/۵۹m	۰/۹۹l	۰/۹۷m	۱/۴۵l	۱/۴۱o	۰/۶۲	۰/۶۲	۰/۸۸	۰/۸۷	۱/۳۰	۱/۲۹	۳	۴	-۱۲	-۱۰	-۹	
I ₄ N ₅	۰/۵۸gh	۰/۵۶n	۰/۹۴n	۰/۹۲n	۱/۴۰l	۱/۳۶p	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۸۹	۰/۸۷	۱/۳۱	۱/۲۹	۹	۱۰	-۶	-۵	-۵	
I ₅ N ₁	۰/۵۱g	۰/۴۹r	۰/۸۳u	۰/۸۰v	۱/۲۳p	۱/۱۹v	۰/۵۸	۰/۵۷	۰/۸۰	۰/۷۹	۱/۱۶	۱/۱۴	۱۴	۱۵	-۳	-۲	-۴	
I ₅ N ₂	۰/۵۲f	۰/۵۰q	۰/۸۴t	۰/۸۱u	۱/۲۴p	۱/۲۰u	۰/۵۹	۰/۵۸	۰/۸۱	۰/۸۰	۱/۱۷	۱/۱۶	۱۳	۱۵	-۳	-۲	-۴	
I ₅ N ₃	۰/۵۳f	۰/۵۱p	۰/۸۵s	۰/۸۳t	۱/۲۴p	۱/۲۰u	۰/۶۰	۰/۵۹	۰/۸۲	۰/۸۱	۱/۱۹	۱/۱۷	۱۴	۱۵	-۳	-۲	-۲	
I ₅ N ₄	۰/۵۸f	۰/۵۶n	۰/۹۳o	۰/۹۱o	۱/۳۵m	۱/۳۲q	۰/۶۱	۰/۶۰	۰/۸۳	۰/۸۲	۱/۲۰	۱/۱۸	۵	۷	-۱۱	-۹	-۱۰	
I ₅ N ₅	۰/۵۶e	۰/۵۴n	۰/۹۰q	۰/۸۸p	۱/۳۳n	۱/۲۹r	۰/۶۱	۰/۶۰	۰/۸۴	۰/۸۳	۱/۲۱	۱/۱۹	۱۰	۱۱	-۷	-۶	-۸	
I ₆ N ₁	۰/۴۰d	۰/۳۹w	۰/۶۶y	۰/۶۴z	۰/۹۹s	۰/۹۶z	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۶۷	۰/۶۷	۱/۰۲	۱/۰۱	۱۹	۲۲	۲	۵	۶	
I ₆ N ₂	۰/۴۲c	۰/۴۰v	۰/۶۸x	۰/۶۶y	۱/۰۰r	۰/۹۷v	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۶۷	۰/۶۷	۱/۰۲	۱/۰۱	۱۷	۱۹	-۱	-۲	۴	
I ₆ N ₃	۰/۴۲c	۰/۴۱u	۰/۶۸x	۰/۶۶y	۱/۰۰r	۰/۹۷v	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۶۷	۰/۶۷	۱/۰۲	۱/۰۱	۱۵	۱۷	-۲	-۲	۵	
I ₆ N ₄	۰/۴۶b	۰/۴۵s	۰/۷۵v	۰/۷۳w	۱/۰۹q	۱/۰۶w	۰/۴۹	۰/۴۸	۰/۶۷	۰/۶۷	۱/۰۳	۱/۰۲	۶	۸	-۹	-۷	-۴	
I ₆ N ₅	۰/۴۵a	۰/۴۳t	۰/۷۲w	۰/۷۰x	۱/۰۸q	۱/۰۵x	۰/۴۹	۰/۴۸	۰/۶۷	۰/۶۷	۱/۰۳	۱/۰۲	۸	۴	-۷	-۴	-۲	

تیمارها شامل بدون آبیاری (I₁) و تامین ۴۰ (I₂), ۶۰ (I₃), ۸۰ (I₄), ۱۰۰ (I₅) و ۱۲۰ (I₆)

درصد نیاز آبی و مقادیر کود نیتروژن شامل صفر (N₁), ۵۰ (N₂), ۱۰۰ (N₃), ۱۵۰ (N₄) و ۲۰۰ (N₅) کیلوگرم بر هکتار

فاصله کمی تا عدد یک را نشان داد، از این‌رو مقادیر شبیه‌سازی شده حاکی از قابل اطمینان بودن نتایج دارد (جدول ۵). شاخص توافق ویلموت (d) در سال‌های مورد مطالعه برای عملکرد دانه از ۰/۳۵ تا ۰/۵۰ و برای غلاف از ۰/۲۸ تا ۰/۶۸ و در عملکرد زیست توده از ۰/۳۸ تا ۰/۶۱ متغیر بود. برای بهره‌وری مصرف آب مبتنی بر عملکرد دانه، غلاف و زیست‌توده نیز این شاخص بین ۰/۲۱ و ۰/۶۸ متغیر بود که نزدیک بودن این شاخص به عدد یک، نشان‌دهنده قابل اطمینان بودن مقادیر

با توجه به جدول (۵)، ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (RMSE_n) در مدیریت آب مصرفی در سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ در عملکرد دانه بین ۰/۱۱ و ۰/۳۱ بود که در این میان در شرایط بدون آبیاری ریشه میانگین مربعات خطای نسبی در سال اول ۰/۲۸ درصد و در سال دوم ۰/۳۱ درصد بود. این شاخص برای عملکرد غلاف از ۰/۰۴ تا ۰/۴۶ درصد و برای عملکرد زیست توده از ۰/۰۴ تا ۰/۲۳ درصد متغیر بود. شاخص ضریب کارایی (EF) برای صفات عملکرد و بهره‌وری مصرف آب،

شبیه‌سازی شده است (جدول ۵). میانگین انحراف خطا در تمام تیمارها، به غیر از تیمار تنش (بدون آبیاری) از دقت خوبی برخوردار بود، در شرایط بدون آبیاری با کاهش عملکرد دانه همراه بود که حاکی از برآورد پایین عملکرد در شرایط تنش است (جدول ۵). ریشه میانگین مربعات در برآورد میزان بهره‌وری مصرف آب مبتنی بر عملکرد دانه بر اساس آب مصرفی در سال ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۶۲۹ کیلوگرم بر مترمکعب بود و برای بهره‌وری آب در غلاف در سال ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ به ترتیب ۰/۳۰ و ۱/۴۹۱ کیلوگرم بر مترمکعب را نشان داد. در بهره‌وری آب مصرفی مبتنی بر عملکرد زیست توده در سال اول و دوم به ترتیب ۰/۳۰ و ۱/۴۹۱ کیلوگرم بر مترمکعب بود (جدول ۵). مقادیر R^2 برای تمام تیمارها، به جز تیمار تنش بدون آبیاری، از ضریب R^2 بالایی برخوردار بود (جدول ۵).

جدول ۵. شاخص‌های آماری در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری در سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱

شاخص	بدون آبیاری	۴۰ درصد نیاز آبی		۶۰ درصد نیاز آبی		۸۰ درصد نیاز آبی		۱۰۰ درصد نیاز آبی		۱۲۰ درصد نیاز آبی	
		۱۴۰۰	۱۴۰۱	۱۴۰۰	۱۴۰۱	۱۴۰۰	۱۴۰۱	۱۴۰۰	۱۴۰۱	۱۴۰۰	۱۴۰۱
Y_{Seed}	MBE	-۴۴۰/۳	-۴۹۹/۱	۱۵۳/۵	۱۴۸/۳	۳۲۱/۵	۴۱۳/۷	۲۷۲/۰	۳۴۴/۹	۳۱۲/۷	۳۹۶/۴
	RMSE	۴۸۲/۴	۵۳۷/۷	۲۲۱/۴	۲۱۶/۷	۳۳۰/۰	۴۴۶/۷	۳۰۲/۳	۳۹۶/۵	۳۲۳/۲	۴۱۳/۸
	RMSE _n	۰/۲۸	۰/۳۱	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۲۱	۰/۱۲	۰/۱۷	۰/۱۱	۰/۱۶
	d	۰/۳۸	۰/۳۵	۰/۵۶	۰/۵۵	۰/۴۴	۰/۴۳	۰/۵۰	۰/۴۸	۰/۴۴	۰/۳۷
	EF	-۴/۳۶	-۵/۸۲	-۰/۲۰	-۰/۱۹	-۶/۱۶	-۳/۲۲	-۱/۹۰	-۱/۶۷	-۴/۶۲	-۹/۰۳
	R^2	۰/۷۵	۰/۶۳	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۹۲	۰/۹۱	۰/۹۰	۰/۸۹	۰/۹۹
Y_{Pod}	MBE	-۱۱۵۷/۷	-۱۲۳۲/۹	-۱۴۵/۵	-۲۱۸/۷	-۳۱/۱	۸۱/۲	-۸۶/۲	-۳۲/۷	-۲۵۶/۹	-۴۲/۹
	RMSE	۱۲۰۵/۵	۱۲۷۵/۱	۲۷۰/۸	۳۴۰/۴	۱۸۱/۲	۲۹۱/۹	۳۶۰	۳۴۳/۵	۲۹۹/۲	۱۸۹
	RMSE _n	۰/۴۳	۰/۴۶	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۴
	d	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۶	۰/۵۶	۰/۶۸	۰/۵۳	۰/۴۶	۰/۴۶	۰/۶۰	۰/۳۶
	EF	-۱۱/۶۶	-۱۳/۵	-۰/۰۹	-۰/۱۸	-۰/۴۶	-۰/۲۹	-۰/۲۲	-۰/۲۷	-۰/۸۷	-۰/۱۰
	R^2	۰/۲۱	۰/۷۳	۰/۹۳	۰/۹۱	۰/۹۳	۰/۸۸	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۸۷	۰/۹۹
Y_{Bio}	MBE	-۷۴۷/۹	-۸۳۳/۵	-۳۰/۴	-۲۰/۳	۷/۶	۱۴۶/۹	-۱۳۴/۷	-۵۵/۵	-۴۸۰/۱	-۵۱/۹
	RMSE	۸۸۰/۷	۹۶۵/۴	۳۸۳/۱	۳۷۶/۷	۳۰۲/۳	۴۳۰/۵	۴۷۴/۸	۴۵۰/۷	۵۲۳/۷	۲۵۹/۲
	RMSE _n	۰/۲۰	۰/۲۳	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۴
	d	۰/۴۲	۰/۳۸	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۶۱	۰/۵۰	۰/۵۱	۰/۵۰	۰/۵۷	۰/۵۲
	EF	-۲/۳۳	-۳/۰۹	-۰/۳۱	-۰/۳۱	-۰/۴۱	-۰/۲۳	-۰/۲۵	-۰/۳۰	-۲/۴۱	-۱/۱۱
	R^2	۰/۸۷	۰/۴۰	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۸۲	۰/۹۴
WP_{Seed}	MBE	-۰/۵۲	-۰/۵۸۴	۰/۰۶	۰/۰۶۲	۰/۱۰	۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۶۳
	RMSE	۰/۵۶	۰/۶۲۹	۰/۰۸	۰/۰۹۴	۰/۱۰	۰/۱۴	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۶۶
	RMSE _n	۰/۲۸	۰/۳۱	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۲۲	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۱۱	۰/۱۶
	d	۰/۳۸	۰/۳۵	۰/۵۶	۰/۲۸	۰/۴۴	۰/۲۶	۰/۵۰	۰/۲۶	۰/۴۸	۰/۳۷
	EF	-۴/۳۶	-۵/۸۲	-۰/۲۰	-۵/۱۴	-۶/۱۶	-۱۸/۶۵	-۱/۹	-۱۲/۰۸	-۴/۶۲	-۹/۰۴
	R^2	۰/۷۵	۰/۶۳	۰/۹۱	-۰/۴۰	۰/۹۴	-۰/۳۲	۰/۹۱	-۰/۳۹	۰/۸۹	۰/۹۹
WP_{Pod}	MBE	-۱/۳۵	-۱/۴۴۲	-۰/۰۶	-۰/۰۷۸	-۰/۰۱	۰/۰۲۹	-۰/۰۲	-۰/۰۰۲	-۰/۰۰۵	-۰/۰۰۷
	RMSE	۱/۴۱	۱/۴۹۱	۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۰۵	۰/۰۹۵	۰/۰۸	۰/۰۸۵	۰/۰۶	۰/۰۳
	RMSE _n	۰/۴۳	۰/۴۶	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۰۴
	d	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۶۰	۰/۲۷	۰/۶۸	۰/۲۱	۰/۴۶	۰/۲۰	۰/۶۰	۰/۳۶
	EF	-۱۱/۶۷	-۱۳/۵	۰/۰۹	-۳/۹۴	۰/۴۶	-۲/۶	۰/۲۲	-۲/۲۸	-۰/۸۷	۰/۱۰
	R^2	۰/۲۱	۰/۷۳	۰/۹۳	-۰/۴۰	۰/۹۳	-۰/۲۴	۰/۹۱	-۰/۳۹	۰/۸۷	۰/۹۹
WP_{Bio}	MBE	-۰/۸۷	-۰/۹۷۵	-۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۵۱	-۰/۰۳	-۰/۰۰۶	-۰/۰۰۹	۰/۰۱۵
	RMSE	۱/۰۳	۱/۱۲۹	۰/۱۴	۰/۱۵۹	۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۱۱۲	۰/۱۰	۰/۰۴۱
	RMSE _n	۰/۲۰	۰/۲۳	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۴
	d	۰/۴۲	۰/۳۸	۰/۵۰	۰/۲۱	۰/۶۱	۰/۱۸	۰/۵۱	۰/۲۶	۰/۵۳	۰/۵۲
	EF	-۲/۳۳	-۳/۰۹	۰/۳۱	-۲/۲۸	۰/۴۱	-۳/۲۱	۰/۲۵	-۲/۷۳	-۲/۴۱	۰/۱۱
	R^2	۰/۸۷	۰/۴۰	۰/۹۴	-۰/۳۴	۰/۹۶	-۰/۲۱	۰/۹۱	-۰/۲۷	۰/۸۲	۰/۹۴

Y_{Seed} , Y_{Pod} و Y_{Bio} به ترتیب عملکرد دانه، غلاف، زیست‌توده بر حسب کیلوگرم بر هکتار و WP_{Seed} , WP_{Pod} و WP_{Bio} به ترتیب بهره‌وری مصرف آب مبتنی بر عملکرد دانه، غلاف و زیست‌توده بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب و واحد شاخص‌های MBE و RMSE کیلوگرم بر هکتار و واحد شاخص‌های d (IOA)، EF و R^2 بر حسب درصد است.

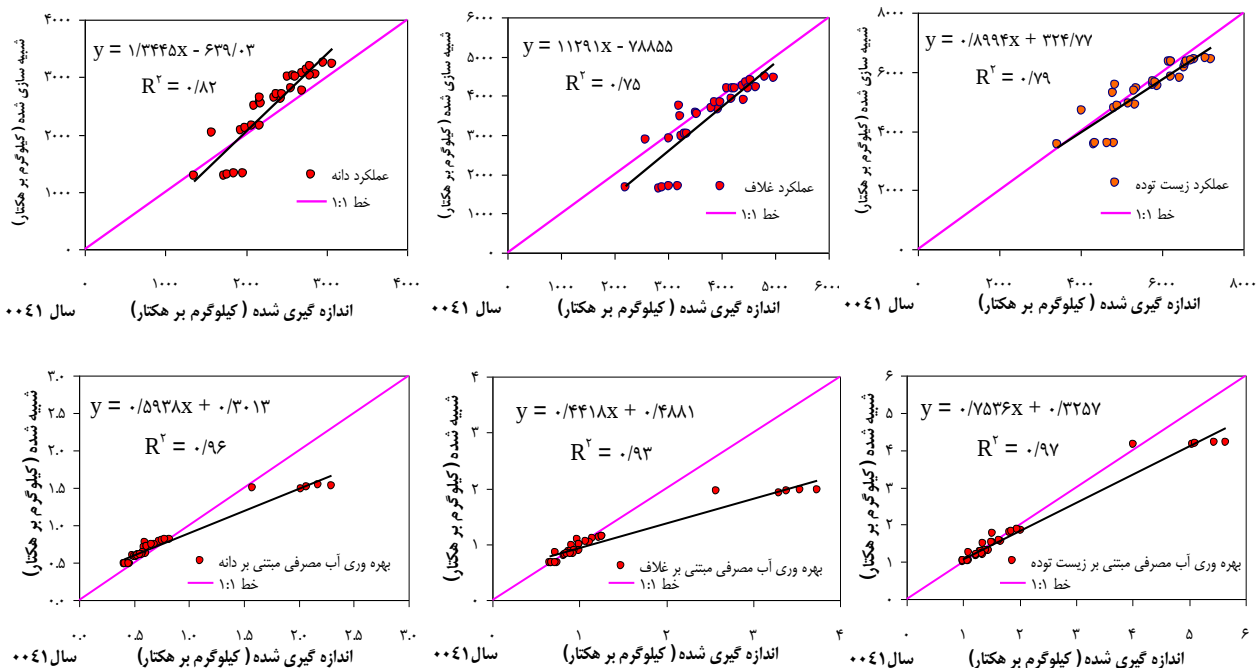
این پیش‌بینی به‌ترتیب با کاهش ۳۰۵/۵۸۹ و ۲۳۹/۵۵۶ کیلوگرم بر هکتار بود (جدول ۶). مقایسه مقادیر عملکرد دانه، غلاف و زیست‌توده (شکل ۲) و بهره‌وری مصرف آب مبتنی بر عملکرد دانه، غلاف و زیست‌توده (شکل ۳) در شرایط مشاهده شده و شبیه‌سازی شده به وسیله مدل با خط ۱:۱ نشان داد که در مدل، شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده و دانه ایده‌آل بود و نقاط مربوط به عملکرد نزدیک به خط ۱:۱ هستند و می‌توان شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده و دانه را برای مراحل مختلف رشد در سال‌های مورد مطالعه، مطلوب ارزیابی کرد.

جدول ۶. نتایج شبیه‌سازی پارامترهای گیاهی مدل Dssat در سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱

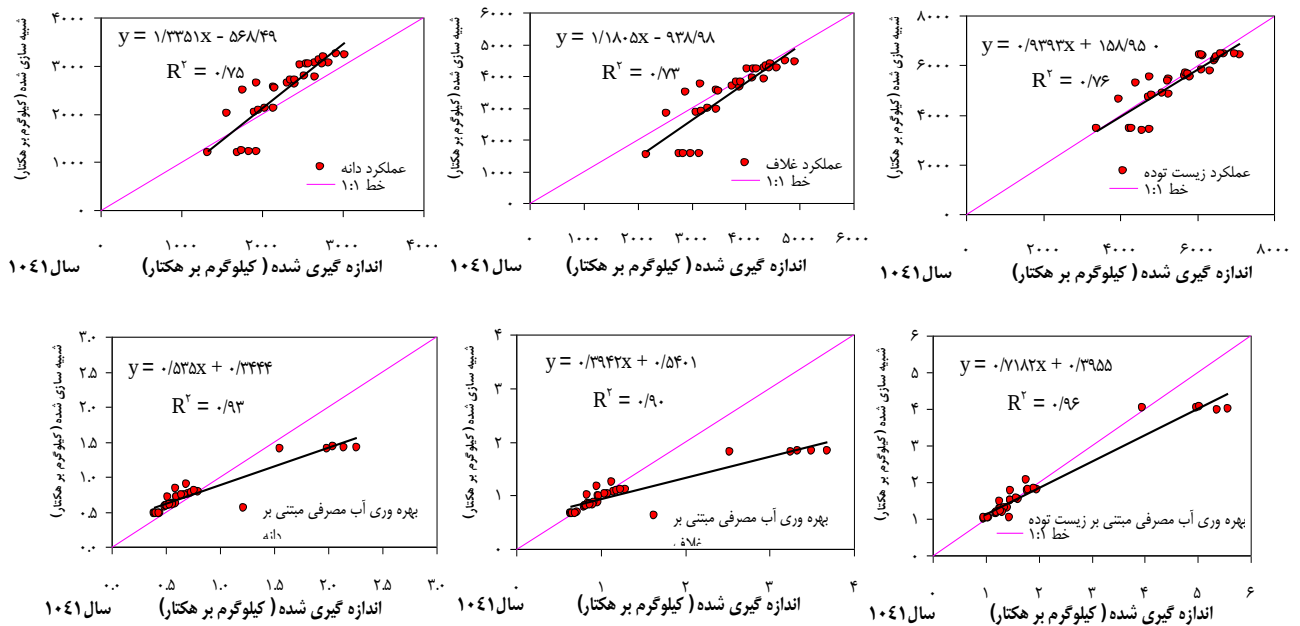
سال	صفات گیاهی	EF	d	RMSE _n	RMSE	MBE
۱۴۰۰	عملکرد دانه	۰/۴۴۷	۰/۹۰۲	۰/۱۶۲	۳۴۶/۰	۱۶۰/۳۸۹
	عملکرد غلاف	۰/۴۷۹	۰/۸۹۱	۰/۱۶۱	۵۳۳/۳	-۳۰۵/۵۸۹
	عملکرد زیست‌توده	۰/۷۶۴	۰/۹۳۹	۰/۰۹۹	۵۱۲/۴	-۲۳۹/۵۵۶
	بهره‌وری مصرف آب در دانه	۰/۸۱۶	۰/۹۲۸	۰/۳۰۴	۰/۲۴۰۱	-۰/۰۳۲
	بهره‌وری مصرف آب در غلاف	۰/۶۰۰	۰/۸۱۰	۰/۴۵۴	۰/۵۷۹۱	-۰/۲۵۲
۱۴۰۱	بهره‌وری مصرف آب در زیست‌توده	۰/۹۰۷	۰/۹۷۰	۰/۲۳۳	۰/۴۳۰۵	-۰/۱۶۹
	عملکرد دانه	۰/۲۵۰	۰/۸۷۲	۰/۱۹۵	۴۰۷/۲	۱۹۲/۷۴۴
	عملکرد غلاف	۰/۴۱۱	۰/۸۸۵	۰/۱۷۲	۵۸۳/۲	-۲۷۲/۱۳۳
	عملکرد زیست‌توده	۰/۷۴۰	۰/۹۳۶	۰/۱۰۶	۵۳۵/۷	-۱۷۵/۹۵۶
	بهره‌وری مصرف آب در دانه	۰/۷۵۹	۰/۸۹۹	۰/۳۴۹	۰/۲۷۱۴	-۰/۰۳۱

واحد MBE و RMSE کیلوگرم بر هکتار و واحد RMSE_n، d و E (EF) بر حسب درصد است.

ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (RMSE_n) بر اساس مقایسه دو سال نشان داد که در سال ۱۴۰۰ این میزان برای عملکرد دانه، غلاف و زیست‌توده و بهره‌وری دانه، غلاف و زیست‌توده به ترتیب ۰/۱۶۲، ۰/۱۶۱، ۰/۰۹۹، ۰/۳۰۴، ۰/۴۵۴ و ۰/۲۳۳ درصد بود، در حالی که این شاخص در سال ۱۴۰۱ برای عملکرد دانه، غلاف و زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب مبتنی بر دانه، غلاف و زیست‌توده به ترتیب ۰/۱۷۲، ۰/۱۹۵، ۰/۱۰۶، ۰/۳۴۹، ۰/۴۵۴ و ۰/۲۴۷ درصد بود (جدول ۶). شاخص توافق ویلموت (d) برای عملکرد دانه، غلاف و زیست‌توده در سال‌های مورد مطالعه از ۰/۸۷۲ تا ۰/۹۳۹ درصد، و برای بهره‌وری مصرف آب مبتنی بر عملکرد دانه، غلاف و زیست‌توده از ۰/۷۶۶ تا ۰/۹۷۰ درصد متغیر بود که نزدیک بودن این شاخص به عدد یک، نشان‌دهنده قابل اطمینان بودن مقادیر شبیه‌سازی شده است (جدول ۶). شاخص ضریب کارایی (EF) در عملکرد دانه، غلاف و زیست‌توده در سال اول به ترتیب ۰/۴۴۷، ۰/۴۷۹، ۰/۷۶۴ و ۰/۸۱۶ درصد و برای سال دوم به ترتیب ۰/۲۵۰، ۰/۴۱۱ و ۰/۷۴۰ درصد بود. این شاخص در بهره‌وری مصرف آب مبتنی بر عملکرد دانه، غلاف و زیست‌توده در سال اول به ترتیب ۰/۸۱۶، ۰/۶۰۰ و ۰/۹۰۷ درصد و برای سال دوم به ترتیب ۰/۷۵۹، ۰/۵۳۷ و ۰/۸۸۴ درصد مشاهده شد (جدول ۶). میانگین انحراف خطا (MBE) در عملکرد دانه با میانگین ۱۶۰/۳۸۹ کیلوگرم بر هکتار، نشان‌دهنده پیش‌بینی بیش از میزان واقعی است، در حالی که برای عملکرد غلاف و زیست‌توده



شکل ۲. مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در زیست‌توده، غلاف و دانه سویا در سال‌های ۱۴۰۰



شکل ۳. مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در زیست‌توده، غلاف و دانه سویا در سال‌های ۱۴۰۱

محتوای رطوبت خاک

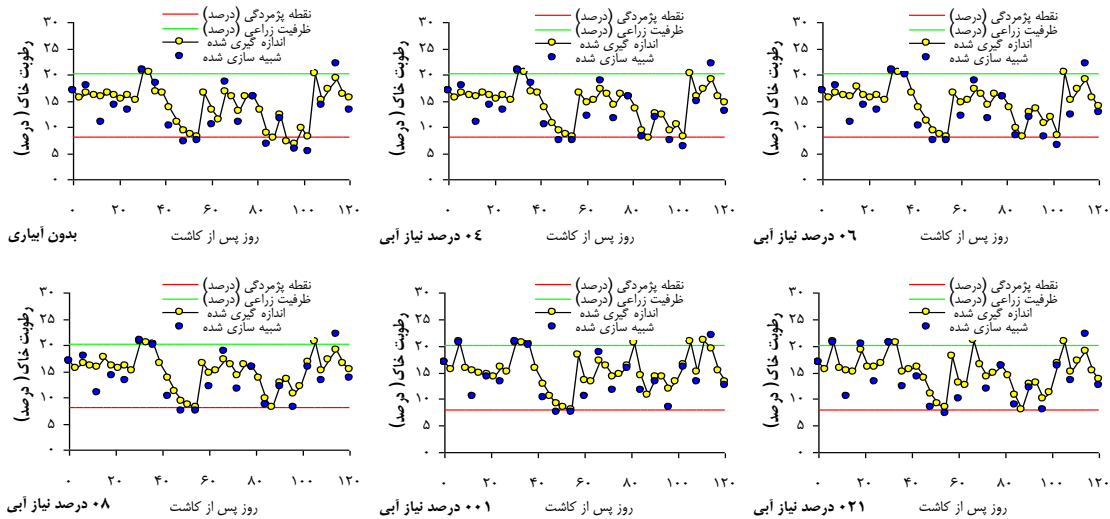
محدوده ۰/۱۴۴ تا ۰/۱۵۹ درصد و در سال ۱۴۰۱ در محدوده ۰/۱۴۴ تا ۰/۱۶۴ درصد متغیر بود (جدول ۷). مقادیر شاخص توافق یا سازگاری (d) در سال اول در محدوده ۰/۹۲۷ تا ۰/۹۴۱ درصد و در سال دوم در محدوده ۰/۹۲۵ تا ۰/۹۴۰ درصد را نشان داد که با توجه به نزدیک بودن این ارقام به عدد یک، برآورد بالای مدل را نشان می‌دهد. ضریب کارایی (EF) برای سال ۱۴۰۰ در تیمارهای نیاز آبی بین ۰/۷۷۲ تا ۰/۸۱۰ درصد متغیر بود، در حالی که برای سال ۱۴۰۱ این محدوده بین ۰/۷۶۴ تا ۰/۸۰۹ درصد بود که با توجه به نزدیک بودن آنها به عدد یک، نشان‌دهنده شبیه‌سازی بهتر مدل است.

شبیه‌سازی رطوبت در عمق توسعه ریشه برای سطوح مختلف نیاز آبی نشان داد که در طی دو سال، شاخص آماری میانگین انحراف خطا (MBE) در همه تیمارها با افزایش پیش‌بینی همراه بود که این مقادیر توسط مدل در سال دوم بهتر از سال اول برآورد شد (جدول ۷). ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در سال اول از ۲/۰۳۸ تا ۲/۱۱۷ درصد و در سال دوم ۰/۰۲۰ تا ۰/۰۲۱ درصد متغیر بود که با توجه به نزدیک بودن این اعداد به صفر، نشان از تخمین مناسب مدل دارد (جدول ۷). ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (RMSE_n) در سال ۱۴۰۰ در

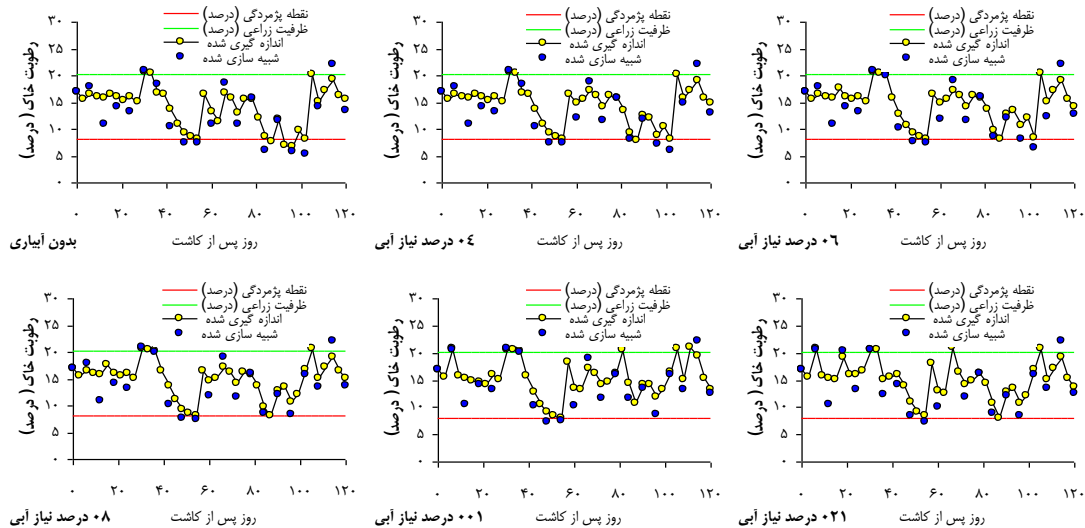
جدول ۷. نتایج آماری شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده رطوبت خاک با استفاده از مدل Dssat

سال	نیاز آبی	EF	d	RMSE _n	RMSE	MBE
۱۴۰۰	بدون آبیاری	۰/۸۱۰	۰/۹۴۱	۰/۱۵۹	۲/۰۷۸	۱/۰۰
	۴۰ در صدنیاز آبی	۰/۷۸۹	۰/۹۳۳	۰/۱۵۸	۲/۱۰۶	۰/۹۸۶
	۶۰ در صدنیاز آبی	۰/۷۸۷	۰/۹۳۴	۰/۱۵۸	۲/۱۱۷	۱/۱۱۹
	۸۰ در صدنیاز آبی	۰/۷۷۲	۰/۹۲۸	۰/۱۴۸	۲/۰۵۷	۱/۰۵۲
	۱۰۰ در صدنیاز آبی	۰/۷۷۳	۰/۹۲۷	۰/۱۴۸	۲/۰۸۴	۱/۱۷۶
	۱۲۰ در صدنیاز آبی	۰/۸۰۶	۰/۹۳۸	۰/۱۴۴	۲/۰۳۸	۱/۱۶۷
۱۴۰۱	بدون آبیاری	۰/۸۰۹	۰/۹۴۰	۰/۱۶۴	۰/۰۲۱	۰/۰۱۰
	۴۰ در صدنیاز آبی	۰/۷۹۳	۰/۹۳۴	۰/۱۵۷	۰/۰۲۱	۰/۰۱۰
	۶۰ در صدنیاز آبی	۰/۷۸۷	۰/۹۳۴	۰/۱۵۸	۰/۰۲۱	۰/۰۱۱
	۸۰ در صدنیاز آبی	۰/۷۶۴	۰/۹۲۵	۰/۱۵۱	۰/۰۲۱	۰/۰۱۱
	۱۰۰ در صدنیاز آبی	۰/۷۷۶	۰/۹۲۸	۰/۱۴۷	۰/۰۲۱	۰/۰۱۲
	۱۲۰ در صدنیاز آبی	۰/۸۰۲	۰/۹۳۷	۰/۱۴۴	۰/۰۲۰	۰/۰۱۲

واحد شاخص‌های MBE و RMSE، RMSE_n، d (IOA)، EF و R² بر حسب درصد می‌باشد.



شکل ۴. مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده رطوبت خاک در تیمارهای مختلف آبیاری در سال ۱۴۰۰



شکل ۵. مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده رطوبت خاک در تیمارهای مختلف آبیاری در سال ۱۴۰۱

نتیجه‌گیری

میزان خطای نسبی را داشت. ریشه میانگین مربعات خطای نسبی ($RMSE_n$) بر اساس مقایسه دو سال نشان داد که در سال ۱۴۰۰ این میزان برای عملکرد دانه، غلاف و زیست توده و بهره‌وری دانه، غلاف و زیست توده به ترتیب ۰/۱۶۲، ۰/۱۶۱، ۰/۰۹۹، ۰/۳۰۴، ۰/۴۵۴ و ۰/۲۲۳ درصد بود، در حالی که این شاخص در سال ۱۴۰۱ برای عملکرد دانه، غلاف و زیست توده و بهره‌وری مصرف آب مبتنی بر دانه، غلاف و زیست توده به ترتیب ۰/۱۹۵، ۰/۱۷۲، ۰/۱۰۶، ۰/۳۴۹، ۰/۴۸۵ و ۰/۲۴۷ درصد بود. به‌طور کلی بر اساس نتایج آماری، شبیه‌سازی عملکرد دانه، غلاف و زیست‌توده تحت تأثیر نیازهای مختلف آبیاری و سطوح متفاوت کود نیتروژن، قابل قبول و مطلوب بود و به‌نظر می‌رسد استفاده از مدل به‌عنوان ابزاری راهگشا جهت پشتیبانی پژوهش‌های علمی و ارتقاء تصمیم‌گیری‌ها در مدیریت مصرف آب در سویا در منطقه مورد مطالعه قابل توصیه می‌باشد.

نتایج حاصل از ارزیابی مدل DSSAT نشان داد که این مدل قادر است با دقت قابل قبولی عملکرد سویا را شبیه‌سازی کند. با افزایش تنش آبی، درصد خطای نسبی شبیه‌سازی شده در شرایط تنش بیشتر از شرایط آبیاری شده بود. میزان عملکرد زیست‌توده، دانه و غلاف با تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی با خطای نسبتاً کمتری همراه بود که نشان دهنده روند تغییرات عملکرد در نیازهای مختلف آبی و سطوح متفاوت کودی در شبیه‌سازی می‌باشد. با افزایش تنش آبی تا سطح ۴۰ درصد نیاز آبی، مدل توانسته عملکردها را با تقریب مناسبی برآورد نماید. اما با افزایش تنش و در حالت بدون آبیاری، مدل توانایی لازم برای شبیه‌سازی مناسب و دقیق از مقادیر عملکرد را دارا نمی‌باشد. ولی با این رویکرد، میزان خطای نسبی برای عملکرد زیست‌توده در سال ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ به ترتیب ۳ و ۲ درصد بود که بهترین

Reference:

- Abdizad Gohari, A., & Babazadeh, H. (2023). Simulation of yield and water productivity of Cowpea cultivars under deficit irrigation conditions using the DSSAT model. *Iranian Irrigation and Drainage*, 3(1), 215-232 (in Persian).
- Adhikari, P., Ale, S., Bordovsky, J.P., Thorp, K.R., Modala, N.R., Rajan, N., & Barnes, E.M. (2016). Simulating future climate change impacts on seed cotton yield in the Texas High Plains using the CSM-CROPGRO-Cotton model. *Agricultural Water Management*, 164, 317-330.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56*, 300. FAO, Rome, pp. 6541.
- Antolin, L.A., Heinemann, A.B., & Marin, F.R. (2021). Impact assessment of common bean availability in Brazil under climate change scenarios. *Agricultural Systems*, 191, 1-9.
- Babazadeh, H., & Sarai Tabrizi, M. (2013). Calibration of SWAP Model for Simulating Crop Yield, Biological Yield and Soybean Water Use Efficiency. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 35(4), 83-96. [in Persian]
- Bao, Y., Hoogenboom, G., McClendon, R.W., & Paz, J.O. (2015). Potential adaptation strategies for rainfed soybean production in the south-eastern USA under climate change based on the CSM-CROPGRO-Soybean model. *The Journal of Agricultural Science*, 798-824.
- Bhatia, V.S., Singh, P., Wani, S.P., Chauhan, G.S., Rao, A.K., Mishra, A.K., & Srinivas, K. (2008). Analysis of potential yields and yield gaps of rainfed soybean in India using CROPGRO-Soybean model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1252-1265.
- Biel, W., Gawęda, D., Łysoń, E., & Hury, G. (2017). The effect of variety and agrotechnical factors on nutritive value of soybean seeds. *Acta Agrophysica*. 24, 395-404.
- Boote KJ, Porter C, Jones JW, Thorburn PJ, Kersebaum KC, Hoogenboom G, White JW, Hatfield JL. 2016. Sentinel site data for crop model improvement definition and characterization. *Advances in Agricultural Systems Modeling*, 7, 125-158.
- Boote, K. J., Jones, J.W., Mishoe, J.W., & Wilkerson, G.G. (1986). Modelling growth and yield of groundnut. *Agri meteorology of Groundnut: Proceeding of an International Symposium, ICRISAT Sahelian Center, Niamey, Niger. 21-26 Aug. 1985, ICRISAT, Patancheru, A. P. 502 324, India*, pp. 243-254.
- Boote, K.J., Jones, J.W., Hoogenboom, G., & Pickering, N.B. (1998). The CROPGRO model for grain legumes. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Springer Science and Business Media, Dordrecht, pp. 99-128.
- Boulch, Elmerich, C., Djemel, A., & Lange, B. (2021). Evaluation of soybean (*Glycine max* L.) adaptation to northern European regions under different agro-climatic scenarios. In *Silico Plants*, 3(1), pp. 1-13.
- Clark, M., & Tilman, D. (2017). Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. *Environmental Research Letters*, 1-11.
- D'Amour, C.B., Wenz, L., Kalkuhl, M., Steckel, J.C., & Creutzig, F. (2016). Teleconnected food supply shocks. *Environmental Research Letters*, 035007.
- Das, H.P. (2003). Water use efficiency of soybean and its yield response to evapotranspiration and rainfall. *Journal of Agricultural Physics*, 3(1), 35-39.
- Dias, G.V.S., Silva, E.H.F.M., Vieira Junior, N.A., & Marin, F.R. (2020). Simulation of the water footprint of soybeans in Mato Grosso based on climate change projections. *Agrometeoros*, 27, 155-163.
- Edreira, J.I.R., Guilpart, N., Sadras, V., Cassman, K.G., van Ittersum, M.K., Schils, R.L., & Grassini, P. (2018). Water productivity of rainfed maize and wheat: a local to global perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 259, 364-373.
- Er-Raki, S., Bouras, E., Rodriguez, J.C., Watts, C.J., Lizarraga-Celaya, C., & Chehbouni, A. (2020). Parameterization of the AquaCrop model for simulating table grapes growth and water productivity in an arid region of Mexico. *Agricultural Water Management*, 106585, 106585.
- FAOSTAT, (2016). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Statistic Division [WWW Document]. URL <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/down>. (Accessed 6.14.16).
- Garcia, A., Persson, T., Guerra, L.C., & Hoogenboom, G. (2010). Response of soybean genotypes to different irrigation regimes in a humid region of the southeastern USA. *Agricultural Water Management*, 97, 981-987.
- Godwin, D.C., & Allan, C.J. (1991). Nitrogen dynamics in soil-plant systems. *Modeling Plant and Soil Systems* 287-321.
- Godwin, D.C., & Singh, U. (1998). Nitrogen balance and crop response to nitrogen in upland and lowland cropping systems. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Springer Science and Business Media, Dordrecht, pp. 55-77.
- Jamieson, P.D., Porter, J.R., & Wilson, D.R. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*, 27, 337-350.
- Jones, C.A., & Kiniry, J.R. (1986). CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station.
- Jons, J. W., B. A. Keat & Porer. C.H. (2001). Approachest mdula mdeldeldevelopment. *Agric. Systems* 70: 421-443.

- Kahraman, A. 2017. Nutritional value and foliar fertilization in soybean. *J. Elem.* 22, 55–66.
- Karam, F., Karaa, K., & Tarabey, N. (2005). Effects of deficit irrigation on yield and water use efficiency of some crops under semi-arid conditions of the Bekaa valley of Lebanon. , *Amman, Jordan*, 2 (1), 139-155.
- Lich, M.A., Wright, D., Lenssen, & A.W., (2013). Soybean Response to Drought, Agriculture. Iowa State University Extension and Outreach, Ames, IA (USA).
- Maiorano, A., P. Martre, S. Asseng, F. Ewert, C. Müller, R.P. Rötter, A.C. Ruane, M.A. Semenov, D. Wallach, E. Wang, P.D. Alderman, B.T.Kassie, C. Biernath, B. Basso, D. Cammarano, A.J. Challinor, J. Doltra, B. Dumont, E. Eyshi Rezaei, S. Gayler, K.C. Kersebaum, B.A. Kimball, A.K. Koehler, B. Liu, G.J. O’Leary, J.E. Olesen, M.J. Otman, E. Priesack, M. Reynolds, P. Stratonovitch, T. Streck, P. J. Thorburn, K. Waha, G.W. Wall, J.W. White, Z. Zhao, & Zhu., Y. (2017). Crop model improvement reduces the uncertainty of the response to temperature of multi-model ensembles. *Field Crops Research*, 202, 5-20.
- Majidian, M., & Ghadiri, H. (2002). The effect of moisture stress and different amounts of nitrogen fertilizer in different stages of growth on the yield of yield components, water use efficiency and some physiological characteristics of corn plants. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 33(3), 492-499. [in Persian]
- Marchand, P., Carr, J.A., Dell’Angelo, J., Fader, M., Gephart, J.A., Kumm, M., & Ratajczak, Z. (2016). Reserves and trade jointly determine exposure to food supply shocks. *Environmental Research Letters*, 095009.
- Montoya, F. García, C. Pintos, F. & Otero. A. (2017). Effects of irrigation regime on the growth and yield of irrigated soybean in temperate humid climatic conditions. *Agricultural Water Management* 193: 30-45.
- Mourtzinis, S. Gurpreet Kaurb, John M. Orlowskib, Charles A. Shapiroc, Chad D. Leed, Charles Wortmann, David Holshouse, Emerson D. Nafzigerf, Hans Kandelg, Jason Niekampf. William J. Rossh, Josh Loftoni, Joshua Vonkf, Kraig L. Roozeboomj, Kurt D. Thelenk, Laura E. Lindseyl, Michael Statonm, Seth L. Naeven, Shaun N. Casteelo, William J. Wieboldp, Shawn & Conleya., P. (2018). Soybean response to nitrogen application across the United States: A synthesis-analysis. *Field Crops Research*, 215, 74-82.
- Quansah, J.E., Welikhe, P., El Afandi, G., Fall, S., Mortley, D., & Ankumah, R. (2020). CROPGRO-soybean model calibration and assessment of soybean yield responses to climate change. *American Journal of Climate Change*, 297-316.
- Ritchie, J. T., & Otter, S. (1985). Description and performance of CERES-Wheat: a useroriented wheat yield model. In: *ARS Wheat Yield Project. ARS-38. Natl Tech Info Serv, Springfield, Missouri*, pp. 159-175.
- Searchinger, T., Waite, R., Hanson, C., Ranganathan, J., Dumas, P., Matthews, E., & Klirs, C. 2019. Creating a Sustainable Food Future: a Menu of Solutions to Feed Nearly 10 Billion People by 2050 (accessed 16 April 2020).
- Silva, E.H.F.M., Boote, K.J., Hoogenboom, G., Gonçalves, A.O., Junior, A.S.A., & Marin, F.R. (2021). Performance of the CSM-CROPGRO-soybean in simulating soybean growth and development and the soil water balance for a tropical environment. *Agricultural Water Management*, 252, 106929
- Singh, A. K., Tripathy, R., & Chopra, U.K. (2008). Evaluation of CERES Wheat and Crop System models for water-nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural Water Management*, 95, 776-786.
- Singh, U., J. T., Ritchie & Tsuji, G.Y. (1991). Simulation models for crop growth: IBSNAT approach. In: *International Symposium on Sweet Potato Technology for the 21th Century, Tuskegee University, Tuskegee, Alabama*.
- Souza, T.T., Antolin, L.A.S., Bianchini, V.J.M., Pereira, R.A.A., Silva, E.H.F.M., & Marin, F. R. (2019). Longer crop cycle lengths could offset the negative effects of climate change on Brazilian maize. *Bragantia*.
- Thomson, A.M., Calvin, K.V., Smith, S.J., Kyle, G.P., Volke, A., & Patel, P. (2011). RCP4. 5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climate Change*, 77-94.
- Timsina, J., Godwin, D., Humphreys, E., Kukal, S.S., & Smith, D. (2008). Evaluation of options for increasing yield and water productivity of wheat in Punjab, India using the DSSAT-CERES-Wheat model. *Agric. Water Manag.* 1099-1110.
- Tyagi, S.D., Khan, M.H., Teixeira D.A., & Silva, J.A. (2011). Yield stability of some soybean genotypes across diverse environments. *Int. J. Plant Breed.* 5, 37-41.
- White, J., & Hoogenboom, G. (2010). Crop response to climate: ecophysiological models. In: Lobell D, Burke M, editors. *Climate change and food security, advances in global change research*, 37, 59-83.
- Wilkerson, G. G. , J. W. Jones, K. J. Boote, K. T. Ingram, J. W. Mishoe, (1983). Modeling soybean growth for crop management. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 26: 63-73.
- Willmott, C.J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of American Meteorology Society*, 63, 1309-1313.
- Wright, G.C. (1996). Selection for water-use efficiency in grain legume species. 554-557, In: Michalk, D.L. and J.E. Dratley (eds.), *Proceedings of the 8th Australian Agronomy Conference, Toowoomba, Australia*.
- Yang, J.M., Yang, J.Y., Liu, S., & Hoogenboom, G. (2014). An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. *Agricultural Systems*, 127, 81-89.
- Yousefi, S., Pakenjad, F., & Ilkai, M. (2011). The effect of irrigation management and nitrogen fertilization on soybean plant yield and yield. *The first national conference on new topics in agriculture*, 25-32. [in Persian].

¹Glycine max L

²Crop Growth Models (CGM)

³Decision Support System For Agrotechnology Transfer (DSSAT)

⁴JW Jones

⁵KJBoote

⁶Priestley and Physics

⁷Mean Relative Error (MRE)

⁸Root Mean Square Error (RMSE)

⁹Mean Bias Error (MBE)

¹⁰Normalized Root Mean Square Error (RMSE_n)

¹¹Index of Agreement (d or IoA)

¹²Coefficient of Efficiency (EF)