



## Simulation of the Growth of Quinoa with Using DSSAT 4.7 Model in Field Conditions

Shahab Eghbali Shahabad<sup>1\*</sup>, Mehdi Nassiri-Mahallati<sup>2</sup>, Mohsen Jahan<sup>3</sup>, Mohammad Hassan Fallah<sup>4</sup>

1. Agricultural Expert, promotion and education of Yazd province, Yazd, Iran.
2. Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
3. Associated Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
4. Graduated PhD of Agroecology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

\*Corresponding Author: sh\_weed@yahoo.com

### Keywords:

Arid Area, Modeling, Phenological development, Planting date.

### Extended abstract

#### Introduction

Climate change is rapidly degrading the conditions of crop production. For instance, increasing salinization and aridity are forecasted to increase in most parts of the world. As a consequence, new stress-tolerant species and genotypes must be identified and used for future agriculture. Stress-tolerant species exist but are underutilized and neglected. Quinoa (scientifically known as *Chenopodium quinoa* Willd) is a member of the Amaranthaceous family. Promoting the cultivation and nutrition of quinoa will diversify food products in the country, sustainable production increases farmers' incomes and provide part of the community's food needs. Crop simulation models have been used for various studies such as selecting the appropriate cultivar, determining the best planting date, predicting the effect of diversity and climate change on growth. Field research experiments are time-consuming and not cost effective. In contrast, it requires a lot of time and money, while computer simulation models can save time and money by conducting extensive experimental simulations.

#### Materials and Methods

This research was conducted in two regions of Yazd province with 10 separate experiments in the form of a randomized complete block design with three replications. Experimental factors included 5 promising modified lines at Yazd Salinity Research Center with the Titicaca cultivar. The lines consisted of four intermediate maturity lines, numbered 1 (NSRCQE), 2 (NSRCQC), 3 (NSRCQD), and 6 (NSRCQA), one

### Received:

20 September 2023

### Revised:

15 November 2023

### Accepted:

23 November 2024

### How to cite this article:

Eghbali Shahabad, S., Nassiri-Mahallati, M., Jahan, M., & Fallah, M.H. (2024). Simulation of the growth of Quinoa with Using DSSAT 4.7 Model in Field Conditions. *Journal of Drought and Climate change Research*, 2(1), 107-124. [10.22077/JDCR.2023.6801.1045](https://doi.org/10.22077/JDCR.2023.6801.1045)



late maturity line numbered 4 (NSRCQB), and the early maturity cultivar Titicaca numbered 5. Sampling and note-taking were performed regularly, once every three days, in proportion to the progress of the phenological stages of each line. The simulation of quinoa growth and development was done with DSSAT 4.7 software. The model was calibrated and evaluated with data collected from the field. Before running the model, modified coefficients were used by Prager et al( 2019).

### **Results and Discussion**

The critical photoperiod parameter (CSDL) was estimated to be 13.8 hours in the early variety, 13.7 hours in the medium clay lines and 12.5 hours in the late line. The sensitivity of lines to photoperiod (PPSEN) varied from 0.22 to 0.25. The time interval between the appearance of the first seed (R5) and physiological ripening (R7) in different lines was very different, so that in the late line 4, 35 days, in the medium lines 1, 2 and 3, 27 days and in the early variety of Titicaca, 25 days was estimated. The results of calibration and validation of the CROPGRO model with DSSAT 4.7 software were evaluated as optimal for budding, flowering and maturity stages of quinoa. For the number of days from planting to flowering, the value of the root mean square error (RMSE) was in the range of 3.5 to 6.4 days, the coefficient of variation or the percentage of RMSE (CV) was in the range of 7.3 to 11.3%, Wilmot's index of agreement (d) in the range of 0.74 to 0.96, the average deviation from the model (MB) was in the range of -0.83 to 1.5 and the explanation coefficient (R<sup>2</sup>) was in the range of 0.47 to 0.85. Therefore, the model estimates flowering stage very well. In different quinoa lines, the maximum difference between simulated and observed data of days to budding, flowering, and physiological maturity was 2 days, which indicates good prediction of the CROPGRO model. The optimal planting date for lines 3, 4, 5, and 6 is the first of August, the end of July, the middle of August, and the end of July, respectively, because it is the shortest growing period.

### **Conclusion**

The results of calibration and validation of CROPGRO model with DSSAT software were evaluated as favorable for quinoa and the 30-year seasonal analysis of the model for the city of Yazd showed that the optimal planting dates for lines 3, 4, 5 and 6 are the first of August, the end of July, and the middle of It is August and the end of July because it is the shortest period of growth. Considering that this model can integrate the complex interactions of soil properties, climatic conditions, management practices and genetic characteristics of the product, it leads to a better understanding of the complex interactions between factors affecting the growth and development of this plant, so it can be used to develop studies on the aspect different types of quinoa ecophysiology should be used in research departments.



## شبیه‌سازی رشد و نمو کینوا در مناطق خشک با نرم‌افزار DSSAT 4.7 در شرایط مزرعه

شهاب اقبالی شاه آباد<sup>۱\*</sup>، مهدی نصیری محلاتی<sup>۲</sup>، محسن جهان<sup>۳</sup>، محمد حسن فلاح<sup>۴</sup>



۱. کارشناس جهاد کشاورزی استان یزد، یزد، ایران.
۲. استاد گروه آگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
۳. دانشیار گروه آگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
۴. دانش آموخته دکتری آگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

\*نویسنده مسئول: sh\_weed@yahoo.com

### چکیده

### واژه‌های کلیدی:

ایران کشوری وسیع با جمعیت رو به افزایش است و استفاده از دانه اصلاح‌شده گیاهان مقاوم با خاک‌های خشک و شور مانند کینوا در کنار گیاهان استراتژیک، با به‌کارگیری ابزارهای دانش‌بنیان در مدیریت زراعی و به‌نژادی مانند مدل‌ها، قادر خواهد بود تولید غذا را در کشورمان متناسب با افزایش جمعیت تغییر دهد. این تحقیق در سال ۱۳۹۸ و در دو منطقه از استان یزد با ۱۰ آزمایش جداگانه و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. عامل‌های آزمایش شامل ۵ لاین امید بخش اصلاح‌شده در مرکز تحقیقات شوری یزد و یک رقم به نام تی تی کاکا بود؛ که از کینوهای انتخاب شده چهار لاین متوسط‌ترس، یک لاین دیررس و یک رقم زودرس به نام تی تی کاکا بود. نمونه‌گیری و یادداشت‌برداری‌ها به‌طور مرتب، هر سه روز یک‌بار و متناسب با پیشرفت مراحل فنولوژیک هر لاین انجام شد. شبیه‌سازی رشد و نمو، واسنجی و ارزیابی رشد کینوا توسط مدل DSSAT 4.7 و با استفاده از داده‌های برداشت شده از مزرعه انجام شد. نتایج واسنجی و تعیین اعتبار مدل CROPGRO در مناطق خشک با نرم‌افزار DSSAT 4.7 برای کینوا مطلوب ارزیابی شد و بررسی تجزیه و تحلیل فصلی ۳۰ ساله مدل برای شهر یزد نشان داد که تاریخ کاشت مطلوب برای لاین‌های متوسط‌ترس، دیررس و رقم تی تی کاکا به ترتیب اول مرداد، آخر تیر و نیمه مرداد می‌باشد زیرا کوتاه‌ترین دوره رشد را در این تاریخ‌کاشت‌ها داشتند. نتایج نشان داد که روز تا غنچه‌دهی و روز تا گل‌دهی از تاریخ کاشت اول تیرماه تا تاریخ کاشت ۱۰ شهریور در همه لاین‌ها کاهش یافت به نحوی که در تاریخ کاشت اول تیرماه روز تا غنچه‌دهی در لاین‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ به ترتیب ۴۱/۲، ۵۵، ۳۸/۲ و ۳۴/۸ روز و تاریخ کاشت ۱۰ شهریور روز تا غنچه‌دهی در لاین‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ به ترتیب ۳۶/۱، ۳۵/۱، ۳۲/۳ و ۳۰/۶ روز بود. با توجه به اینکه دوره رشد کوتاه با عملکرد مناسب در مناطق خشک بعنوان مزیت محسوب می‌شود؛ بنابراین انتخاب تاریخ کاشت گیاهان زراعی با دوره کوتاه رشد به کمک مدل و با هزینه کم قابل انجام است.

تاریخ کاشت، نمو فنولوژیک، مدل‌سازی، مناطق خشک

### تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۶/۲۹

### تاریخ ویرایش:

۱۴۰۲/۰۸/۲۴

### تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۹/۰۲

## مقدمه

اثرات تغییر اقلیم بر کشاورزی و به تبع آن بر رشد و نمو گیاهان متفاوت است و باعث نگرانی‌هایی در مورد تغییر رفتار گیاهان شده است. امنیت غذایی و ضرب اطمینان تولید غذا در سطح جهانی با ایجاد نوسانات دمایی در کوتاه‌مدت در ترکیب با دوره‌های خشکسالی بلندمدت، شوری خاک‌ها و سیل به خطر افتاده است (Hinojosa et al., 2018). با افزایش تنوع گیاهانی که ظرفیت بالایی در برابر تغییرات اقلیمی دارند، امکان افزایش دسترسی به غذای با کیفیت فراهم خواهد شد. ایران کشوری وسیع با جمعیت رو به افزایش است و تأمین نیاز غذایی مردم با استفاده از پتانسیل تولید محصولات زراعی و گیاهان جدید از مهم‌ترین وظایف بخش کشاورزی به‌شمار می‌رود. کینوا (*Chenopodium quinoa, Willd*) از خانواده تاج‌خروسیان، یک محصول شبه غله با قابلیت‌های بالا برای کشت در اغلب مناطق جهان به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک است. این گیاه بسیار مقاوم به شرایط نامطلوب محیطی است که در برابر تنش‌های زنده و غیرزنده مقاومت بالایی را از خود نشان می‌دهد. فائو از سال ۲۰۱۳، بومی‌سازی این گیاه را در مناطق فقیر، مناطقی که سایر گیاهان رایج در زراعت قابلیت گسترش ندارند، برجسته کرده است (Bazile et al., 2014). اولین قدم برای مطالعه این گیاه در محیط جدید بررسی فنولوژی آن است.

تشعشع، آب، عناصر غذایی، دما و طول‌روز از مهمترین عوامل محیطی هستند که بر مراحل نمو فنولوژیک در گیاهان زراعی تأثیر می‌گذارند. اثر این عوامل به طور مشخصی بین فرآیندهای نموی و رشدی متفاوت است. مهمترین عوامل محیطی مؤثر بر نمو فنولوژیک در شرایط عدم محدودیت آب، دما و طول‌روز می‌باشند (Bertero, 2003).

معرفی یک گیاه زراعی به یک منطقه جدید ممکن است حامل یک‌سری مشکلات از قبیل ناسازگاری بین ژنوتیپ‌ها و شرایط محیطی باشد (Ceccato et al., 2011)؛ که با آزمایشات میدانی قابل شناسایی هستند. در مناطقی که دارای اقلیم با رژیم رطوبتی خشک با تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد

می‌باشند، کشت بهاره گیاه کینوا توصیه شده است (Salehi and Dehghany, 2017). با توجه به اقلیم و رقم، امکان کشت زود بهاره، تابستانه و پاییزه کینوا در مناطق مختلف کشور وجود دارد. وقوع دمای بالا طی گل‌دهی، طول دوره آزادسازی و بقای دانه‌ی گرده و زمان دریافت دانه‌ی گرده توسط گل را کوتاه می‌کند. نقش دما بسته به نوع واریته و یا نوع کاربرد گیاه کینوا (تولید دانه یا علوفه) متفاوت است (Murphy and Matanguihan., 2015). بنابراین توانایی گیاه برای تطبیق مراحل حساس نموی با شرایط عدم تنش در طول فصل رشد می‌تواند سبب فرار گیاه از تنش‌های محیطی شود (Bunce, 2018; Hinojosa et al., 2019). تاریخ کاشت یک ابزار مدیریتی مهم در به حداقل رساندن جنبه‌های منفی دمای بالا و تنش رطوبت در طی دوره‌های گل‌دهی و پر شدن دانه‌ی گیاهان است و تأخیر در کاشت می‌تواند سبب کاهش عملکرد دانه شود (Hirich et al., 2014).

مدل‌های شبیه‌سازی رشد و نمو گیاهان زراعی که رشد گیاه، مصرف آب و عملکرد را پیش‌بینی می‌کنند، با اهدافی نظیر درک واکنش گیاهان زراعی به تغییرات سیستم اقلیم-گیاه-آب، ارزیابی صفات فیزیولوژیک جهت بهبود ژنتیکی عملکرد و کمک به تصمیم‌سازی‌ها جهت بهینه‌سازی استفاده از منابع قابل دسترس، مورد استفاده قرار می‌گیرند (Soltani et al., 2006). امروزه از مدل‌های شبیه‌سازی برای ارزیابی راهبردهای مختلف مدیریت زراعی و به‌نژادی در راستای بهینه‌سازی استفاده از منابع موجود استفاده می‌شود؛ همچنین با استفاده از این مدل‌ها، هزینه‌ها و زمان مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها کاهش می‌یابد و علاوه بر آن می‌توان با این مدل‌ها به جای چند سال آزمایش در مزرعه، با کمک آمار هواشناسی بلندمدت گیاه مورد نظر را چندین سال با استفاده از مدل کاشت کرد و نتایج آن را مورد ارزیابی قرار داد (Soltani and Hoogenboom., 2007). از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی برای انجام مطالعات مختلف از جمله انتخاب گیاه و رقم مناسب، تعیین خصوصیات مطلوب گیاهی، تعیین بهترین مدیریت زراعی، پیش‌بینی اثر تنوع و تغییر اقلیم بر رشد، عملکرد محصول و تخمین عملکرد

شرایط متفاوت محیطی و اقلیمی پیش‌بینی نمایند (Soltani et al., 2006; Yin et al., 2005). محققین به‌منظور شبیه‌سازی فرآیندهای رشد و نمو کینوا از مدل CSM-CROPGRO، که زیرمجموعه مدل‌های DSSAT می‌باشد، برای واسنجی و ارزیابی استفاده نمودند. با توجه به این‌که DSSAT 4.7 مدلی برای کینوا نداشت، از مدل سویا (CROPGRO-Soybean) استفاده شد (Präger et al., 2019). هدف از این مطالعه واسنجی و ارزیابی مدل CROPGRO-Soybean در نرم‌افزار DSSAT 4.7 و تعیین ضرایب ژنتیکی مراحل نمو کینوا برای مناطق خشک در این مدل می‌باشد تا به‌عنوان یک ابزار مناسب در دسترس سایر محققین جهت تحقیقات بیشتر در مطالعات مربوط به سازگاری گیاه جدید کینوا در ایران قرار گیرد.

#### مواد و روش‌ها

##### منطقه مورد مطالعه:

این پژوهش در دو نقطه از استان یزد (شهر یزد منطقه ۱ با ارتفاع ۱۲۰۰ متر از سطح دریا و روستای ارنان منطقه ۲ با ارتفاع ۲۰۰۰ متر از سطح دریا) طبق زمان‌بندی جدول ۱ اجرا شد (شکل ۱). فاصله این دو نقطه از هم ۱۰۰ کیلومتر است. آزمایش اول در مزرعه شخصی کشاورزی در شهر یزد با طول و عرض جغرافیایی  $31^{\circ}55'$  و  $54^{\circ}21'$  در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ و آزمایش دوم در مزرعه شخصی کشاورزی در روستای ارنان یزد با طول و عرض جغرافیایی  $31^{\circ}17'$  و  $54^{\circ}14'$  در همان سال زراعی اجرا شد. نکته قابل توجه در تفاوت اقلیم دو منطقه یعنی اختلاف حداقل دماهای این دو ناحیه بین ۸ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد و اختلاف حداکثر دماهای آن‌ها بین ۵ تا ۷ درجه سانتی‌گراد بود (جدول ۱). در مجموع محل آزمایش اول با اقلیم گرم و خشک و محل آزمایش دوم با اقلیم سرد و خشک انتخاب شد.

##### روش تحقیق:

تیمار آزمایشی شامل پنج لاین امید بخش اصلاح‌شده در مرکز تحقیقات شوری یزد به‌همراه رقم تی‌تی‌کاکا بود که در ۳ تکرار برای هر تاریخ کاشت اجرا شد. لاین‌ها شامل چهار لاین متوسط‌طرس که در این

بالقوه استفاده شده است (Soltani et al., 2006). نرم‌افزار DSSAT 4.7 یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری جامع برای ارزیابی مدیریت‌های مختلف کشاورزی است (Hoogenboom et al., 2004). این نرم‌افزار یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی گیاهان زراعی است (برای بیش از ۲۰ گیاه زراعی مختلف) و برنامه‌های کامپیوتری در یک بسته نرم‌افزاری به‌منظور تسهیل در کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی در تحقیقات و تصمیمات جمع شده‌اند (Hoogenboom et al., 2004).

از عواملی که بر شفافیت یک مدل تأثیر می‌گذارد و روش مرسوم برای به‌کارگیری یک مدل می‌باشد، مسئله واسنجی مدل برای شرایط جدید است. بنابراین ابتدا مدل را واسنجی می‌نمایند. واسنجی یک مدل تغییر مداوم پارامترهای آن مدل جهت به حداقل رساندن اختلاف بین عملکرد برآورد شده (یا هر خروجی دیگر) توسط مدل با داده‌های واقعی است. مقادیر برآورد شده یک مدل با استفاده از داده‌های هواشناسی، خاک، میزان آب مصرفی و دیگر نهاده‌های کشاورزی برداشت‌شده در یک ایستگاه تحقیقاتی بدست می‌آید. در اغلب موارد، برای رسیدن به نتایج مطلوب در شرایط مختلف، باید چند پارامتر (معمولاً با سعی و خطا) واسنجی شوند. دقت روش واسنجی عمدتاً به نوع و کیفیت داده‌های اندازه‌گیری‌شده بستگی دارد. برای برآورد دقیق‌تر ضرایب ژنتیکی ارقام، توصیه می‌شود که آزمایش بیش از چندین تاریخ کاشت در همان محل یا برای تاریخ کاشت یکسان در مکان‌های مختلف انجام شود (Hoogenboom et al., 2017). ارزیابی مدل روشی معمول در استفاده از مدل در یک محیط جدید و یا در چارچوب مدل‌سازی جدید است (Mathews et al., 2013; Zach et al., 2015).

متخصصان مدل‌سازی گیاهان زراعی اقدام به ارائه فرمول‌های کمی اکوفیزیولوژی برای تشریح پاسخ‌های فتوترمال فنولوژی (تأثیر همزمان دما و فتوپریود بر فنولوژی) نموده‌اند تا بتوانند زمان گل‌دهی ژنوتیپ‌های مختلف گیاهان زراعی را در



شکل ۱. موقعیت محل های اجرای طرح در استان یزد

Fig1. The location of the project implementation sites in Yazd province

جدول ۱. تاریخ های کاشت و میانگین ماهانه داده های هواشناسی محل های آزمایش در سال ۱۳۹۸

Table 1. Planting dates and monthly average of meteorological data in experimental sites

| توضیحات                     | March   | April    | May   | June | July  | August     | September   | September | January | February |
|-----------------------------|---------|----------|-------|------|-------|------------|-------------|-----------|---------|----------|
| Explanation                 | فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر  | مرداد | اول شهریور | نیمه شهریور | مهر       | بهمن    | اسفند    |
| Date of planting 1          | 29      | 29       | 28    | 28   | 26    | 23         | 6           | 20        | 29      | 29       |
| تاریخ کاشت یزد              |         |          |       |      |       |            |             |           |         |          |
| Average maximum temperature | 25.1    | 29.69    | 36.2  | 41.9 | 39.9  | 36.7       | 36.7        | 32        | 15.8    | 21.9     |
| میانگین دماهای حداکثر       |         |          |       |      |       |            |             |           |         |          |
| Average minimum temperature | 12.9    | 17.2     | 22.5  | 28.7 | 27.7  | 21.5       | 21.5        | 18        | 2.8     | 7.9      |
| میانگین دماهای حداقل        |         |          |       |      |       |            |             |           |         |          |
| Average temperature         | 19      | 23.36    | 29.3  | 35.3 | 33.8  | 29.1       | 29.1        | 25        | 9.3     | 14.9     |
| میانگین دما                 |         |          |       |      |       |            |             |           |         |          |
| Average day length          | 12.47   | 13.37    | 13.9  | 13.9 | 13.3  | 12.4       | 12.4        | 11.44     | 10.65   | 11.5     |
| میانگین طول روز             |         |          |       |      |       |            |             |           |         |          |
| Date of planting 2          | 30      | 5 may    | 29    | 30   | 24    | 19         | 12          | 22        | -       | 28       |
| تاریخ کاشت ارنان            |         |          |       |      |       |            |             |           |         |          |
| Average maximum temperature | 18.3    | 23.66    | 30.9  | 36.2 | 34.5  | 32.2       | 32.2        | 27.26     | 11.2    | 16.8     |
| میانگین دماهای حداکثر       |         |          |       |      |       |            |             |           |         |          |
| Average minimum temperature | 5.6     | 8.3      | 14.8  | 21.1 | 17.9  | 14.4       | 14.4        | 10.4      | -3.62   | 0.9      |
| میانگین دماهای حداقل        |         |          |       |      |       |            |             |           |         |          |
| Average temperature         | 12      | 15.98    | 22.9  | 28.6 | 26.2  | 23.3       | 23.3        | 18.83     | 3.8     | 8.85     |
| میانگین دما                 |         |          |       |      |       |            |             |           |         |          |
| Average day length          | 12.46   | 13.35    | 13.9  | 13.9 | 13.3  | 12.4       | 12.4        | 11.45     | 10.67   | 11.52    |
| میانگین طول روز             |         |          |       |      |       |            |             |           |         |          |

آزمایش با شماره‌های ۱ (NSRCQE)، ۲ (NSRCQC)، ۳ (NSRCQD) و ۴ (NSRCQA)، یک لاین دیررس که با شماره ۴ (NSRCQB) و رقم زودرس تی‌تی‌تی‌کاکا که با شماره ۵ مشخص شد، بود. تاریخ‌های کاشت الزاماً نشان‌دهنده‌ی تاریخ‌های کاشت متداول نیستند، بلکه به‌منظور ایجاد رژیم‌های مختلف دمایی و فتوپریودی انتخاب شدند (Soltani et al., 2006).

با توجه به اینکه آزمایش‌ها در زمان‌های متفاوت اجرا و برای هر تاریخ کاشت زمین انتخابی در نظر گرفته شد؛ طرح آزمایشی در قالب بلوک‌های کامل تصادفی اجرا گردید. بعد از آماده‌سازی زمین، کاشت به‌صورت دستی در کرت‌هایی به ابعاد ۳×۳ متر و بر اساس تاریخ کاشت‌های جدول (۱) انجام شد. کرت‌ها با پشته‌هایی به عرض یک متر از هم جدا شدند. داخل هر کرت شش ردیف کاشت به فاصله نیم متر از هم در نظر گرفته شد. بعد از سبزشدن، تراکم بوته به ۶۴ بوته در مترمربع رسید. آبیاری کرت‌ها به‌صورت غرقابی انجام گردید که در ماه‌های اردیبهشت تا مرداد هر هفت روز یک‌بار و در سایر ماه‌ها هر ۱۲ روز یک‌بار کرت‌ها آبیاری شدند. کودهی تیمارها شامل مصرف کود اوره به‌صورت سرک و به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، در زمان تشکیل گل‌آذین برای تمام تیمارها اعمال شد. مدیریت آفات برحسب نیاز، عمدتاً در ماه‌های اردیبهشت و خرداد سم‌پاشی بر علیه آفت کرم برگ‌خوار و سنک با سم کلروپریفوس انجام شد. نمونه‌گیری و یادداشت‌برداری‌ها به‌طور مرتب، هر سه روز یک‌بار و متناسب با پیشرفت مراحل فنولوژیک هر لاین انجام شد. عمل نمونه‌گیری مراحل فنولوژیک، مشاهده بوته‌های دو ردیف از وسط هر کرت در طول دو متر بود. ملاک عمل یادداشت‌برداری هر مرحله از نمو (سبزشدن، گل‌دهی و تغییر رنگ بوته‌ها)، ۵۰ درصد بوته‌های مورد بررسی بود. فاصله زمانی از کاشت تا هر مرحله نموی شامل سبزشدن (مشاهده دو برگ حقیقی در سطح خاک)، گرده‌افشانی (ظهور گرده‌های زردرنگ روی سطح گل‌آذین) و رسیدگی‌دانه (تغییر رنگ گل‌آذین‌ها و برگ‌ها) ثبت شد.

#### مدل DSSAT:

سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای انتقال فناوری

از آنجا که اندام‌های زایشی در مدل CROPGRO-Soy-bean به عنوان غلاف نامیده می‌شوند، این اصطلاح پس از آن به‌عنوان جایگزینی برای گل‌آذین‌های کینوا استفاده شد. در ادامه با استفاده از ابزار XBuild در نرم‌افزار DSSAT 4.7 اطلاعات محیطی و مدیریتی

برای واسنجی و ارزیابی کارایی مدل از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV)، شاخص توافق ویلموت (d)، کارایی مدل (ME)، میانگین انحراف از مدل (MB)، ضریب تبیین ( $R^2$ )، آزمون خط ۱:۱ روز تا سبز شدن، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک استفاده شد.

جهت مقایسه اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده استفاده شده است که هرچه RMSE به صفر نزدیکتر باشد نشان‌دهنده‌ی آن است که شبیه‌سازی بهتر انجام شده است. چنانچه مقدار nRMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد شبیه‌سازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد متوسط و بیشتر از ۳۰ درصد ضعیف ارزیابی خواهد شد (Nassiri et al., 2019). هر چه مقدار d به دست آمده توسط مدل به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر آن است که مدل در شبیه‌سازی موفق‌تر بوده و توانسته است میزان پیش‌بینی صفت را با اختلاف کمتری نسبت به مقادیر مشاهده شده انجام دهد (Willmott, 1982). بهترین حالت MB صفر است و هر چه از صفر کمتر باشد یعنی مدل کمتر از واقعیت و هر چه از صفر بزرگ‌تر باشد یعنی مدل بیشتر از واقعیت تخمین می‌زند. شاخص کارایی مدل ME بین صفر و یک خوب است و بهترین حالت عدد یک و بدترین حالت منفی می‌باشد.

ضرایب رگرسیون ساده خطی (a و b) بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر واقعی: ضرایب a و b به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقدار انحراف خط رگرسیون از مبدأ مختصات و مقدار شیب خط رگرسیون از خط ۱:۱ می‌باشند. اگر نقاط پیش‌بینی‌شده روی خط ۱:۱ قرار گیرند، نشان‌دهنده‌ی ایده‌آل بودن مدل است. خط ۱:۱ دارای عرض از مبدأ صفر ( $a=0$ ) و شیب ۴۵ درجه ( $b=1$ ) است (Nassiri et al., 2019).

### نتایج و بحث

واسنجی مدل CROPGRO برای پنج لاین و یک رقم کینوا با استفاده از داده‌های شهر یزد انجام شد. واسنجی با مقایسه پارامترهای گیاهی اندازه‌گیری‌شده در مزرعه و داده‌های شبیه‌سازی‌شده توسط مدل ضرایب ژنتیکی لاین‌ها و رقم کینوا به صورت

شامل تاریخ کاشت، فواصل کاشت، عمق کاشت، تراکم بوته، معرفی لاین‌های کینوا، شیوه آبیاری، زمان و مقدار آبیاری، شیوه مصرف کود و مقدار آن تعریف شد. همچنین با ابزار SBuild خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت خاک، رنگ خاک، درصد مواد آلی، نیتروژن، فسفر و پتاس، PH خاک و هدایت الکتریکی خاک معرفی و فایل داده خاک ساخته شد. فایل داده‌های هواشناسی هر دو منطقه آزمایش شامل دمای حداقل و حداکثر روزانه (درجه سانتی‌گراد)، مقدار بارندگی روزانه (میلی‌متر) و تشعشع خورشیدی روزانه نیز با ابزار WeatherMan ساخته و به DSSAT 4.7 معرفی گردید.

با استفاده از ابزار ATCreate داده‌های آزمایشی ثبت‌شده شامل داده‌های مربوط به طول دوره آزمایش (صفات فنولوژیکی، شاخص سطح برگ و ارتفاع بوته) و داده‌های مربوط به برداشت نهایی (عملکرد دانه و وزن خشک بوته) به DSSAT 4.7 معرفی و فایل‌های A و T ساخته شد. مدل با دریافت ورودی‌ها، محاسبات را از زمان کاشت تا رسیدگی انجام می‌دهد و مراحل فنولوژی، تجمع و تسهیم ماده خشک، شاخص سطح برگ، رشد ریشه، ساقه و همچنین میزان رطوبت و نیتروژن خاک، میزان مصرف آب و نیتروژن و تأثیر تنش‌های آب و نیتروژن بر رشد و نمو گیاه را شبیه‌سازی می‌نماید.

با اجرای تاریخ‌های مختلف کاشت، طیف گسترده‌ای از شرایط محیطی در مراحل مختلف نمو، ایجاد شده و امکان تخمین ضرایب ژنتیکی و حساسیت‌های دمایی را برای مدل‌سازی رشد محصولات فراهم می‌کند. بنابراین، واسنجی مدل DSSAT 4.7 با داده‌های حاصل از آزمایش مزرعه‌ای انجام شده در سال ۱۳۹۸، با ۵ لاین و یک رقم انتخاب شده در ۳ طبقه (زودرس، متوسط‌رس و دیررس) و ۱۰ تاریخ کاشت (آزمایش شهر یزد) محقق شد. ارزیابی مدل برای فنولوژی، عملکرد نهایی دانه و کل زیست توده در رسیدگی فیزیولوژیک با یک مجموعه داده مستقل حاصل از انجام آزمایش تاریخ‌های کاشت فوق در همان سال در روستای ارنان یزد (آزمایش ۲) انجام شد.

**واسنجی و صحت سنجی مدل:**



لاین‌ها کمی متفاوت ولی نزدیک به هم بود؛ اما فاصله زمانی بین ظهور اولین دانه (R5) و رسیدگی فیزیولوژیک (R7) در لاین‌های مختلف، تفاوت زیاد داشت به طوری که در لاین دیررس ۴، ۳۵ روز، در لاین‌های متوسط‌تر ۱، ۲ و ۳، ۲۷ روز و رقم زودرس تی‌تی‌کاکا، ۲۵ روز برآورد شد. این پارامتر در لاین ۶، ۳۷ روز برآورد شد (جدول ۲).

دستی و با سعی و خطا استخراج شد (جدول ۲). پارامتر فتوپریود بحرانی (CSDL) در رقم زودرس ۱۳/۸ ساعت، در لاین‌های متوسط‌تر ۱۳/۷ ساعت و لاین دیررس ۱۲/۵ ساعت برآورد شد. حساسیت لاین‌ها به فتوپریود (PPSEN) از ۰/۲۲ تا ۰/۲۵ متفاوت بود. مقادیر پارامترهای زمان بین جوانه‌زنی و ظهور گل (R1)، زمان بین ظهور گل و تشکیل گل‌آذین (R3) و زمان بین تشکیل گل‌آذین و اولین دانه (R5) در تمام

جدول ۲. ضرایب به دست آمده از واسنجی مدل برای لاین‌ها و رقم کینوا با استفاده از مدل CROPGRO

Table 2. Coefficients obtained from model calibration for quinoa lines and varieties using the CROPGRO model

| پارامترها<br>parameters | لاین ۱<br>Line 1 | لاین ۲<br>Line 2 | لاین ۳<br>Line 3 | لاین ۴<br>Line 4 | رقم تی‌تی‌کاکا<br>Titicaca<br>cultivar | لاین ۶<br>Line 6 |
|-------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--|------------------|
| CSDL                    | 13.7             | 13.7             | 13.7             | 12.5             | 13.85                                  | 13.65            |
| PPSEN                   | 0.23             | 0.23             | 0.23             | 0.25             | 0.22                                   | 0.23             |
| EM- FL (R1)             | 23.5             | 23.7             | 23.8             | 23               | 19.5                                   | 21               |
| FL- SH (R3)             | 2.9              | 3                | 2.9              | 3.2              | 2.9                                    | 3                |
| FL- SD (R5)             | 10               | 9.5              | 10               | 11               | 10.4                                   | 12               |
| SD- PM (R7)             | 26.5             | 27               | 27               | 35               | 25                                     | 37               |

دارد و بدین معنا است که با معادله رگرسیون ساده خطی در لاین ۶، ۷۱ درصد و در لاین ۱، ۸۷ درصد از تغییرات در مقادیر شبیه‌سازی شده تعداد روز از کاشت تا غنچه‌دهی، بوسیله تغییرات در مقادیر مشاهده شده تعداد روز از کاشت تا غنچه‌دهی کینوا قابل توضیح است (جدول ۳). بالاترین مقدار شاخص توافق ویلموت ( $d=0.95$ ) در لاین ۱ و کمترین مقدار شاخص توافق ویلموت ( $d=0.91$ ) در لاین ۶ و رقم تی‌تی‌کاکا محاسبه شد که نشان از شبیه‌سازی خوب داده‌های روز تا غنچه‌دهی در تمامی لاین‌های کینوا است (جدول ۳). برای تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی بر اساس این نتایج مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در دامنه ۳/۵ تا ۶/۴ روز، ضریب تغییرات یا درصد RMSE (CV) در دامنه ۷/۳ تا ۱۱/۳ درصد، شاخص توافق ویلموت ( $d$ ) در دامنه ۰/۷۴ تا ۰/۹۶، میانگین انحراف از مدل (MB) در دامنه ۰/۸۳ تا ۱/۵ و ضریب تبیین ( $R^2$ ) در دامنه ۰/۴۷ تا ۰/۸۵ قرار گرفت (جدول ۳). بنابراین مرحله گل‌دهی توسط مدل بسیار خوب تخمین زده شده است. نتایج آزمون  $t$  مربوط به مقایسه خط رگرسیون برازش داده شده با خط ۱:۱ نیز نشان داد که شیب و عرض از مبدأ خط رگرسیون برازشی با خط ۱:۱ اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۲). در بررسی تعداد روز از کاشت تا غنچه‌دهی بزرگترین ضریب تبیین معادله رگرسیون در لاین ۱ ( $R^2=0.87$ ) و کوچکترین ضریب تبیین در لاین ۶ ( $R^2=0.71$ ) بدست آمد. این امر نشان از میزان پراکندگی نقاط در شبیه‌سازی این مرحله نمودی

مراحل فنولوژی بر حسب روز تا غنچه‌دهی، روز تا گل‌دهی و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک برای پنج لاین و یک رقم کینوا در شرایط نرمال آزمایش شهر یزد با مقادیر شبیه‌سازی شده مقایسه شد (هر نقطه میانگین سه تکرار مشاهده‌های مزرعه می‌باشد). برای تعداد روز از کاشت تا غنچه‌دهی بر اساس این نتایج مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در دامنه ۱/۸ تا ۴ روز، ضریب تغییرات یا درصد RMSE، (CV) در دامنه ۵/۳ تا ۱۰/۷ درصد، شاخص توافق ویلموت ( $d$ ) در دامنه ۰/۹۱ تا ۰/۹۵، میانگین انحراف از مدل (MB) در دامنه ۰/۵ تا ۱/۷۸ و ضریب تبیین ( $R^2$ ) در دامنه ۰/۷۱ تا ۰/۸۷ قرار گرفت (جدول ۳)؛ بنابراین مرحله غنچه‌دهی بسیار خوب تخمین زده شده است. نتایج آزمون  $t$  مربوط به مقایسه خط رگرسیون برازش داده شده با خط ۱:۱ نیز نشان داد که شیب و عرض از مبدأ خط رگرسیون برازشی با خط ۱:۱ اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۲). در بررسی تعداد روز از کاشت تا غنچه‌دهی بزرگترین ضریب تبیین معادله رگرسیون در لاین ۱ ( $R^2=0.87$ ) و کوچکترین ضریب تبیین در لاین ۶ ( $R^2=0.71$ ) بدست آمد. این امر نشان از میزان پراکندگی نقاط در شبیه‌سازی این مرحله نمودی

بالاترین مقدار شاخص توافق ویلموت ( $d=0.96$ ) در لاین‌های ۱، ۲ و ۶ و کمترین مقدار شاخص توافق ویلموت ( $d=0.90$ ) در لاین ۴ محاسبه شد که نشان‌دهنده شبیه‌سازی خوب داده‌های روز تا رسیدگی فیزیولوژیک در تمامی لاین‌های کینوا است. حداکثر اختلاف بین میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده روز تا غنچه‌دهی، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک با میانگین داده‌های مشاهده شده آن‌ها در لاین‌های مختلف کینوا ۲ روز بود که نشان از شبیه‌سازی خوب مدل CROP-GRO برای این گیاه دارد (جدول ۳). اگر چه مطالعات واسنجی مدل برای ارقام هر منطقه خاص است و به طور مستقیم قابل مقایسه نیستند، اما مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص توافق ویلموت ( $d$ ) بین تعداد روز تا غنچه‌دهی، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در این تحقیق قابل مقایسه با یافته‌های دیگر محققان است (Präger et al., 2019).

به‌منظور ارزیابی و اطمینان از کارایی مدل تهیه شده، داده‌های روز تا غنچه‌دهی شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده شده آن‌ها در آزمایش میدانی منطقه ۲ (روستای ارنان) مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است که این منطقه از نظر دمایی متفاوت از یزد است و مراحل نمو دارای دوره‌ی متفاوتی است. در ارزیابی ضریب تغییرات یا درصد RMSE (CV) بین  $10/3$  تا  $12/8$  درصد، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بین  $4/3$  تا  $5/4$  روز، شاخص توافق ویلموت ( $d$ ) بین  $0/83$  تا  $0/91$ ، میانگین انحراف از مدل (MB) بین  $2/2$  تا  $2/4$  و ضریب تبیین ( $R^2$ ) بین  $0/73$  تا  $0/91$  بود. این مقادیر نشان از برآورد خوب روز تا غنچه‌دهی با مدل CROPGRO کالیبره شده برای لاین‌های کینوا داشت و مقادیر روز تا غنچه‌دهی شبیه‌سازی شده اعتبار لازم را کسب کردند (جدول ۴). بررسی شیب خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده با خط  $1:1$  در مورد روز تا غنچه‌دهی لاین‌های کینوا نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین شیب خط رگرسیون و شیب خط  $1:1$  وجود نداشت (شکل ۳). بنابراین مدل واسنجی شده از اعتبار کافی برای شبیه‌سازی روز تا غنچه‌دهی لاین‌های کینوا برخوردار است.

اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۲). در بررسی تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی بزرگترین ضریب تبیین معادله رگرسیون در لاین‌های ۶ ( $R^2=0.85$ ) و کوچکترین ضریب تبیین در لاین ۴ ( $R^2=0.47$ ) بدست آمد. این امر نشان از میزان پراکندگی نقاط در شبیه‌سازی این مراحل نمو دارد و بدین معنا است که با معادله رگرسیون ساده خطی در لاین ۶، ۸۵ درصد و در لاین ۴، ۴۷ درصد از تغییرات در مقادیر شبیه‌سازی شده تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی، بوسیله تغییرات در مقادیر مشاهده شده تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی کینوا قابل توضیح است (جدول ۳). بالاترین مقدار شاخص توافق ویلموت ( $d=0.96$ ) در لاین ۶ و کمترین مقدار شاخص توافق ویلموت ( $d=0.74$ ) در لاین ۴ محاسبه شد که نشان از شبیه‌سازی خوب داده‌های روز تا گل‌دهی در تمامی لاین‌های کینوا است (جدول ۳).

برای تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک بر اساس این نتایج مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در دامنه  $2/8$  تا  $5/1$  روز، ضریب تغییرات یا درصد RMSE (CV) در دامنه  $3/1$  تا  $5/1$  درصد، شاخص توافق ویلموت ( $d$ ) در دامنه  $0/90$  تا  $0/96$ ، میانگین انحراف از مدل (MB) در دامنه  $0/33$  تا  $2/22$  و ضریب تبیین ( $R^2$ ) در دامنه  $0/72$  تا  $0/97$  قرار گرفت. بنابراین مرحله رسیدگی فیزیولوژیک توسط مدل بسیار خوب تخمین زده شده است (جدول ۳). نتایج آزمون  $t$  مربوط به مقایسه خط رگرسیون برازش داده شده با خط  $1:1$  نیز نشان داد که شیب و عرض از مبدأ خط رگرسیون برازشی با خط  $1:1$  اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۱). در بررسی تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک بزرگترین ضریب تبیین معادله رگرسیون در لاین‌های ۶ ( $R^2=0.97$ ) و کوچکترین ضریب تبیین در لاین ۴ ( $R^2=0.72$ ) بدست آمد. این امر نشان از میزان پراکندگی نقاط در شبیه‌سازی این مراحل نمو دارد و بدین معنا است که با معادله رگرسیون ساده خطی در لاین ۶، ۹۷ درصد و در لاین ۴، ۷۲ درصد از تغییرات در مقادیر شبیه‌سازی شده تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک، بوسیله تغییرات در مقادیر مشاهده شده تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک کینوا قابل توضیح است (جدول ۳).

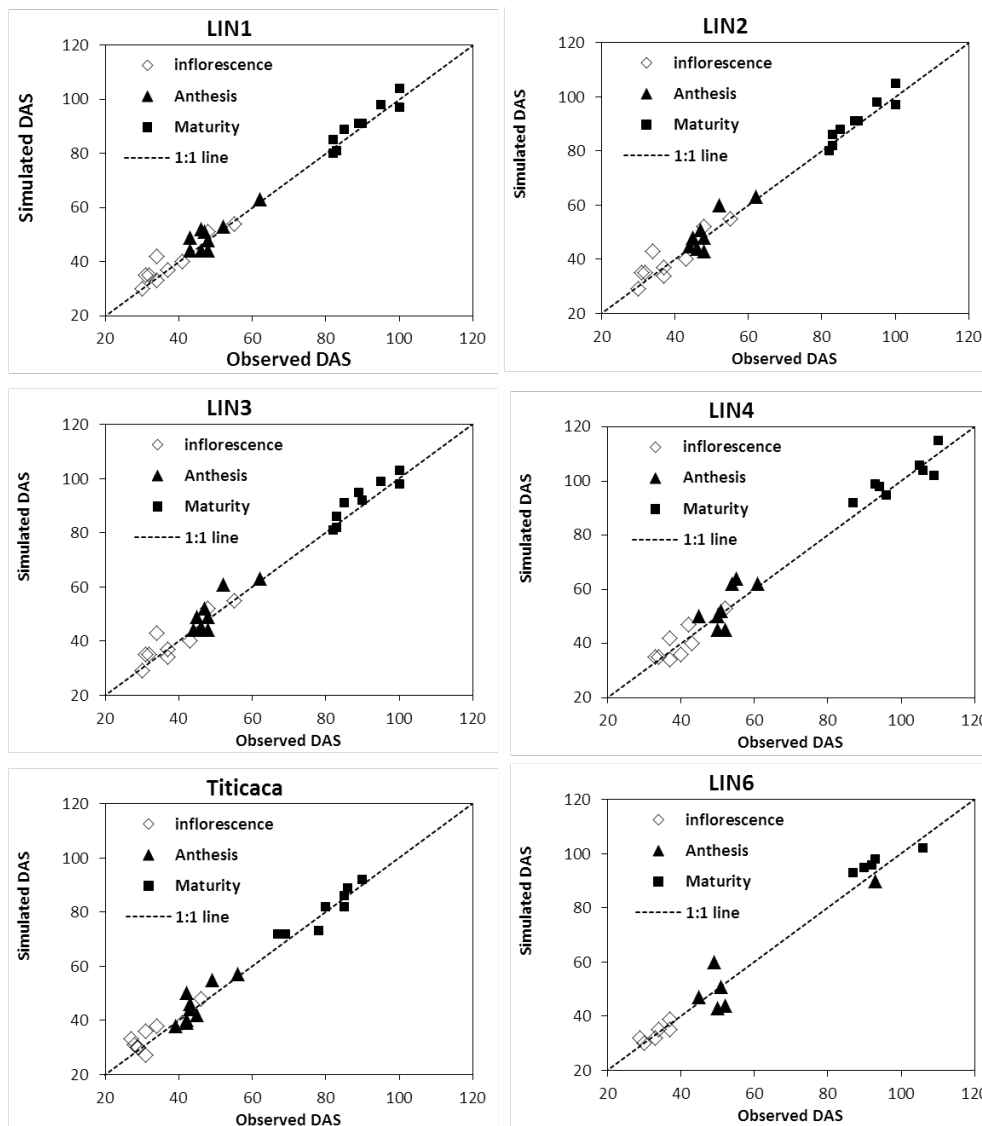
جدول ۳. مقادیر شاخص‌های آماری واسنجی مدل CROPGRO برای شبیه‌سازی روز تا غنچه‌دهی، روز تا گل‌دهی و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک کینوا

Table 3. The values of CROPGRO model calibration statistical indices for simulating days to inflorescence, days to anthesis and days to physiological maturity of quinoa

| رقم<br>Cultivar                           | شاخص آماری<br>Statistical index                | میانگین مشاهده شده<br>Observed average | میانگین شبیه‌سازی شده<br>Simulated average | RMSE<br>(day) | RMSE<br>(%) | d    | MB        | R <sup>2</sup> |
|---|--|--|--|---------------|-------------|------|-----------|----------------|
| لاین ۱<br>Line 1                          | روز تا غنچه‌دهی<br>Days until<br>inflorescence | 38                                     | 40   | 3.4           | 8.8         | 0.95 | 1.67      | 0.87           |
|   | روز تا گلدهی<br>Day until anthesis             | 48                                     | 50   | 3.5           | 7.3         | 0.9  | 1.44      | 0.7            |
|   | روز تا رسیدگی<br>Days until maturity           | 90                                     | 91   | 2.8           | 3.2         | 0.96 | 1.11      | 0.88           |
| لاین ۲<br>Line 2                          | روز تا غنچه‌دهی<br>Days until<br>inflorescence | 39                                     | 40   | 4             | 10.3        | 0.94 | 1.44      | 0.8            |
|   | روز تا گلدهی<br>Day until anthesis             | 49                                     | 50   | 3.7           | 7.6         | 0.9  | 0.89      | 0.73           |
|   | روز تا رسیدگی<br>Days to maturity              | 90                                     | 91   | 2.8           | 3.1         | 0.96 | 1.22      | 0.89           |
| لاین ۳<br>Line 3                          | روز تا غنچه‌دهی<br>days until<br>inflorescence | 39                                     | 40   | 4             | 10.3        | 0.95 | 1.44      | 0.8            |
|   | روز تا گلدهی<br>Day until anthesis             | 49                                     | 50   | 4             | 8.2         | 0.89 | 1.44      | 0.71           |
|   | روز تا رسیدگی<br>Days until maturity           | 90                                     | 92   | 3.6           | 4           | 0.93 | 2.22      | 0.85           |
| لاین ۴<br>Line 4                          | روز تا غنچه‌دهی<br>Days until<br>inflorescence | 40                                     | 40   | 3.4           | 8.4         | 0.92 | 0.5       | 0.73           |
|   | روز تا گلدهی<br>Day until anthesis             | 52                                     | 54   | 5.6           | 10.6        | 0.74 | 1.5       | 0.47           |
|   | روز تا رسیدگی<br>Days until maturity           | 100                                    | 101  | 4.4           | 4.4         | 0.9  | 1.38      | 0.72           |
| رقم<br>تی‌تی‌کاکا<br>Titicaca<br>cultivar | روز تا غنچه‌دهی<br>days until<br>inflorescence | 33                                     | 33   | 3.5           | 10.7        | 0.91 | 1.78      | 0.76           |
|   | روز تا گلدهی<br>Day until anthesis             | 45                                     | 46   | 3.9           | 8.7         | 0.88 | 1.11      | 0.69           |
|   | روز تا رسیدگی<br>days until maturity           | 80                                     | 80   | 3.5           | 4.4         | 0.94 | 0.33      | 0.79           |
| لاین ۶<br>Line 6                          | روز تا غنچه‌دهی<br>Days until<br>inflorescence | 33                                     | 34   | 1.8           | 5.3         | 0.91 | 0.5       | 0.71           |
|   | روز تا گلدهی<br>Day until anthesis             | 57                                     | 56   | 6.4           | 11.3        | 0.96 | -<br>0.83 | 0.85           |
|   | روز تا رسیدگی<br>Days until maturity           | 99                                     | 101  | 5.1           | 5.1         | 0.96 | 1.67      | 0.97           |

انحراف از مدل (MB) بین ۴/۶- تا ۰ و ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) بین ۰/۸۷ تا ۰/۹۵ بود. این مقادیر نشان از برآورد خوب روز تا گل‌دهی با مدل CROPGRO کالیبره شده برای لاین‌های کینوا داشت و مقادیر روز تا گل‌دهی شبیه‌سازی شده اعتبار لازم را کسب کردند (جدول ۴). مقایسه شیب خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده با خط ۱:۱ در مورد روز تا گل‌دهی

به‌منظور ارزیابی و اطمینان از کارایی مدل تهیه شده، داده‌های روز تا گل‌دهی شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده شده آن‌ها در آزمایش میدانی منطقه ۲ (روستای ارنان) مورد ارزیابی قرار گرفت. ضریب تغییرات یا درصد RMSE (CV) بین ۷/۷ تا ۱۳ درصد، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بین ۴/۶ تا ۶/۴ روز، شاخص توافق ویلموت (d) بین ۰/۷۱ تا ۰/۹۳، میانگین



شکل ۲. روزهای پس از کاشت مشاهده شده در مقابل روزهای پس از کاشت شبیه‌سازی شده در سه مرحله نمو غنچه‌دهی، گل‌دهی و بلوغ لاین‌های مختلف کینوا به همراه خط ۱:۱ و شاخص‌های آماری در نتایج واسنجی

**Fig 2. Observed days after planting versus simulated days after planting in the three stages of inflorescence, anthesis and maturity of different quinoa lines along with 1:1 line and statistical indicators of calibration results**

منطقه ۲ (روستای ارنان) مورد ارزیابی قرار گرفت. ضریب تغییرات یا درصد  $RMSE$  (CV) بین ۳/۵ تا ۱۱/۱ درصد، جذر میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) بین ۹/۱ تا ۳/۲ روز، شاخص توافق ویلموت (d) بین ۰/۳۳ تا ۰/۸۸، میانگین انحراف از مدل (MB) بین ۲/۲- تا ۹- و ضریب تبیین ( $R^2$ ) بین ۰/۶۲ تا ۰/۷۹ بود. این مقادیر نشان از برآورد خوب روز تا رسیدگی فیزیولوژیک با مدل CROPGRO کالیبره شده برای لاین‌های

لاین‌های کینوا نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین شیب خط رگرسیون و شیب خط ۱:۱ وجود نداشت (شکل ۳). بنابراین مدل واسنجی شده از اعتبار کافی برای شبیه‌سازی روز تا گل‌دهی لاین‌های کینوا برخوردار می‌باشد.

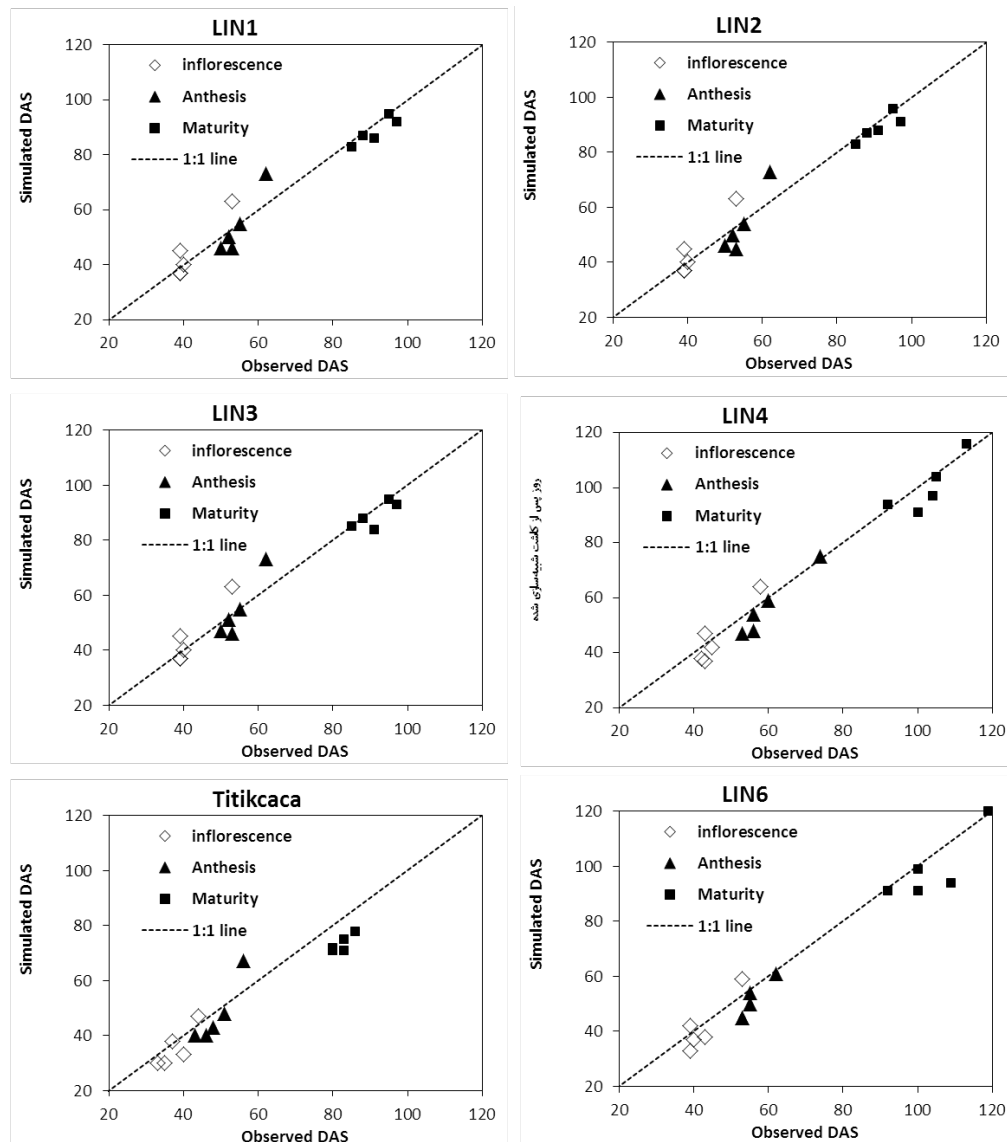
به‌منظور ارزیابی و اطمینان از کارایی مدل تهیه شده، داده‌های روز تا رسیدگی فیزیولوژیک شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده شده آن‌ها در آزمایش میدانی

لاین‌های کینوا برخوردار است. اگر چه مطالعات ارزیابی برای ارقام هر منطقه خاص است و به طور مستقیم قابل مقایسه نیستند، اما مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص توافق ویلموت (d) بین تعداد روز تا غنچه‌دهی، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در این تحقیق قابل مقایسه با یافته‌های دیگر محققان است (Präger et al., 2019).

کینوا داشت و مقادیر روز تا رسیدگی فیزیولوژیک شبیه‌سازی شده اعتبار لازم را کسب کردند (جدول ۴). مقایسه شیب خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده با خط ۱:۱ در مورد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک لاین‌های کینوا نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین شیب خط رگرسیون و شیب خط ۱:۱ وجود نداشت (شکل ۳). بنابراین مدل واسنجی شده از اعتبار کافی برای شبیه‌سازی روز تا رسیدگی فیزیولوژیک

جدول ۴. مقادیر شاخص‌های آماری اعتبارسنجی مدل برای شبیه‌سازی روز تا غنچه‌دهی، روز تا گل‌دهی و روز تا رسیدگی ۶ رقم کینوا  
Table 4. Values of statistical indicators of model validation for simulating days until inflorescence, days until anthesis and days until maturity of 6 quinoa cultivars

| رقم<br>Cultivar                           | شاخص آماری<br>Statistical index                | میانگین مشاهده شده<br>Observed average | میانگین شبیه‌سازی شده<br>Simulated average | RMSE<br>(Day) | RMSE<br>(%) | d    | MB   | R <sup>2</sup> |
|---|--|--|--|---------------|-------------|------|------|----------------|
| لاین ۱<br>Line 1                          | روز تا غنچه‌دهی<br>Days until<br>inflorescence | 42                                     | 44   | 5.4           | 12.8        | 0.88 | 2.4  | 0.91           |
|   | روز تا گل‌دهی<br>Day until anthesis            | 54                                     | 54   | 6.2           | 11.3        | 0.81 | -0.4 | 0.94           |
|   | روز تا رسیدگی<br>Days until maturity           | 91                                     | 89   | 3.3           | 3.6         | 0.86 | -2.6 | 0.79           |
| لاین ۲<br>Line 2                          | روز تا غنچه‌دهی<br>Days until<br>inflorescence | 42                                     | 44   | 5.4           | 12.8        | 0.88 | 2.4  | 0.91           |
|   | روز تا گل‌دهی<br>Day until anthesis            | 54                                     | 54   | 6.4           | 11.8        | 0.8  | -0.8 | 0.92           |
|   | روز تا رسیدگی<br>Days until maturity           | 91                                     | 89   | 3.2           | 3.5         | 0.87 | -2.2 | 0.74           |
| لاین ۳<br>Line 3                          | روز تا غنچه‌دهی<br>days until<br>inflorescence | 42                                     | 44   | 5.4           | 12.8        | 0.88 | 2.4  | 0.91           |
|   | روز تا گل‌دهی<br>Day until anthesis            | 54                                     | 54   | 6             | 11          | 0.81 | 0    | 0.92           |
|   | روز تا رسیدگی<br>Days until maturity           | 91                                     | 89   | 3.6           | 4           | 0.82 | -2.2 | 0.62           |
| لاین ۴<br>Line 4                          | روز تا غنچه‌دهی<br>Days until<br>inflorescence | 46                                     | 46   | 4.8           | 10.3        | 0.91 | -0.6 | 0.88           |
|   | روز تا گل‌دهی<br>Day until anthesis            | 60                                     | 60   | 4.6           | 7.7         | 0.93 | -3.2 | 0.95           |
|   | روز تا رسیدگی<br>Days until maturity           | 103                                    | 100  | 5.4           | 5.2         | 0.88 | -2.4 | 0.72           |
| رقم<br>تی‌تی‌کاکا<br>Titicaca<br>cultivar | روز تا غنچه‌دهی<br>days until<br>inflorescence | 38                                     | 36   | 4.3           | 11.4        | 0.81 | -2.2 | 0.73           |
|   | روز تا گل‌دهی<br>Day until anthesis            | 49                                     | 48   | 6.3           | 13          | 0.83 | -1.2 | 0.87           |
|   | روز تا رسیدگی<br>days until maturity           | 82                                     | 73   | 9.1           | 11.1        | 0.83 | -9   | 0.68           |
| لاین ۶<br>Line 6                          | روز تا غنچه‌دهی<br>Days until<br>inflorescence | 43                                     | 42   | 4.8           | 11.2        | 0.89 | -1   | 0.84           |
|   | روز تا گل‌دهی<br>Day until anthesis            | 56                                     | 51   | 5.6           | 10          | 0.71 | -4.6 | 0.88           |
|   | روز تا رسیدگی<br>Days until maturity           | 104                                    | 99   | 7.9           | 7.6         | 0.86 | -5   | 0.69           |



شکل ۳. روزهای پس از کاشت مشاهده شده در مقابل روزهای پس از کاشت شبیه‌سازی شده در سه مرحله نمو غنچه‌دهی، گل‌دهی و بلوغ لاین‌های مختلف کینوا به همراه خط ۱:۱ و شاخص‌های آماری در نتایج ارزیابی

**Fig 3. The observed days after planting versus the simulation days after planting in the three stages of inflorescence, anthesis and maturity of different quinoa lines along with the 1:1 line and the statistical indicators of the Evaluation results**

معنی‌دار نشان داد (شکل‌های ۴ و ۵). مدل CROPGRO، روز تا غنچه‌دهی، روز تا گل‌دهی، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک و فاصله زمانی گل‌دهی تا رسیدگی فیزیولوژیک را در تاریخ کاشت‌های مختلف بخوبی شبیه‌سازی کرد و تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها مشاهده نشد (شکل‌های ۶ و ۷). نتایج نشان داد که روز تا غنچه‌دهی و روز تا گل‌دهی از تاریخ کاشت اول تیرماه تا تاریخ کاشت ۱۰ شهریور در همه لاین‌ها کاهش یافت به نحوی که در تاریخ کاشت اول تیرماه روز تا غنچه‌دهی در لاین‌های ۳،

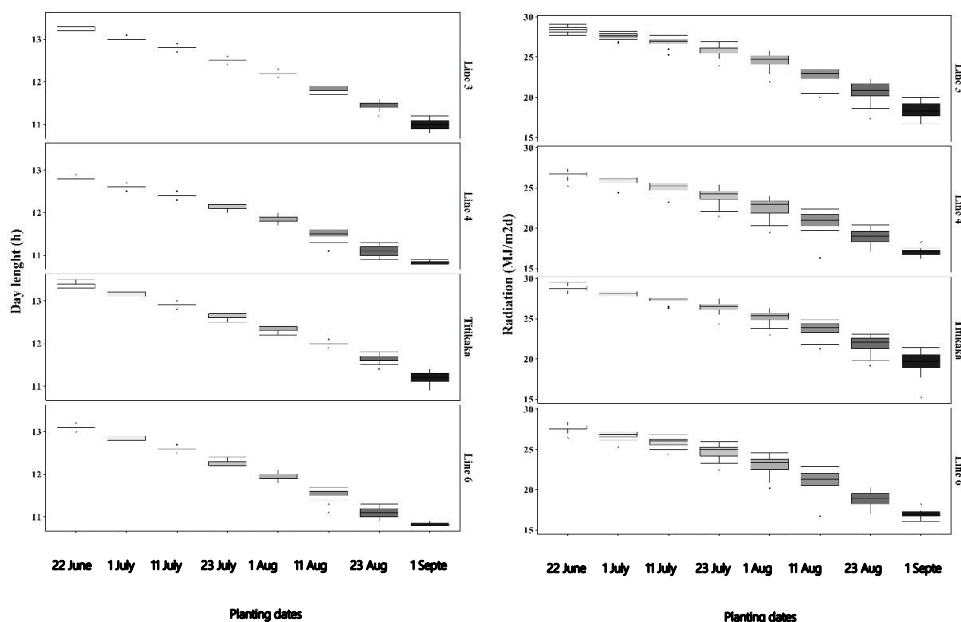
به‌منظور تجزیه و تحلیل مدل CROPGRO آماده شده برای کینوا، این مدل برای تاریخ کاشت‌های تابستان به فاصله ۱۰ روزه و لاین‌های متوسط رس ۳ و ۶، لاین دیررس ۴ و رقم تی‌تی‌کاکا به مدت ۳۰ سال از ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹ در شرایط پتانسیل برای شهر یزد اجرا شدند. نتایج خروجی مدل برای میانگین طول‌روز، تشعشع، دمای حداقل و حداکثر در طول فصل رشد شبیه‌سازی شده برای تاریخ کاشت‌های تابستانه لاین‌های مختلف کینوا در دوره ۳۰ ساله بخوبی روند کاهشی را از ابتدا تا انتهای تابستان بدون اختلاف

همچنین عامل افزایش دوره رشد در تاریخ کاشت‌های بعد از اول مرداد نیز کاهش زیاد دما و طول‌روز از دما و طول‌روز بهینه کینوا است که در انتهای نمو موجب طولانی شدن دوره رسیدگی فیزیولوژیک (شکل ۷) گردید.

بررسی تجزیه و تحلیل فصلی ۳۰ ساله مدل برای شهر یزد نشان داد که تاریخ کاشت مطلوب برای لاین‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ به ترتیب اول مرداد، آخر تیر، نیمه مرداد و آخر تیر است زیرا کوتاه‌ترین دوره رشد (شکل ۷) در تاریخ کاشت‌های ذکر شده بود؛ اما به لحاظ اهمیت آب برای بهره‌برداران در تاریخ کاشت‌های فوق با تأخیر در تاریخ کاشت برای لاین‌ها به ترتیب به آخر مرداد، نیمه مرداد، اول شهریور و نیمه شهریور علاوه بر کاهش مصرف آب، طول دوره رشد لاین‌ها به ترتیب ۳/۹، ۶، ۴/۷ و ۱۱/۸ روز بیشتر خواهد شد (شکل ۷)؛ که تأثیر چندانی در مصرف آب نخواهد داشت.

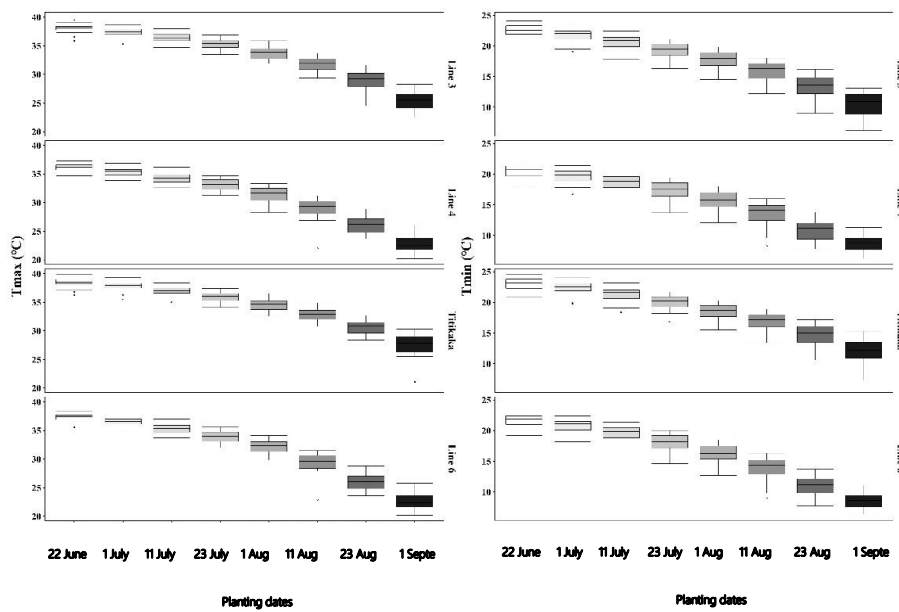
۴، ۵ و ۶ به ترتیب ۴۱/۲، ۵۵، ۳۸/۲ و ۳۴/۸ روز و تاریخ کاشت ۱۰ شهریور روز تا غنچه‌دهی در لاین‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ به ترتیب ۳۶/۱، ۳۵/۱، ۳۲/۳ و ۳۰/۶ روز بود. این مقدار کاهش روز تا غنچه‌دهی در لاین دیررس ۴ بیشتر از سایر لاین‌ها و حدود ۲۰ روز مشاهده گردید. نتایج روز تا گل‌دهی مشابه نتایج روز تا غنچه‌دهی می‌باشد.

نتایج طول دوره رشد لاین‌ها نشان داد از تاریخ کاشت اول تیر تا اول مرداد، این دوره به ترتیب در لاین‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ به تعداد ۳/۹، ۹/۲، ۳/۳ و ۱/۸ روز کوتاه‌تر و از تاریخ کاشت اول مرداد تا آخرین تاریخ کاشت شهریور طول دوره رشد لاین‌ها به ترتیب ۲۷/۹، ۴۴/۷، ۱۴/۳ و ۵۷ روز بلندتر گردید (شکل ۷). احتمال می‌رود علت کاهش طول دوره رشد تا تاریخ کاشت اول مرداد، کاهش کم دما و طول‌روز از دما و طول‌روز بهینه کینوا (Eghbali et al., 2023) باشد که موجب تسریع در غنچه‌دهی و گل‌دهی (شکل ۶) شد؛

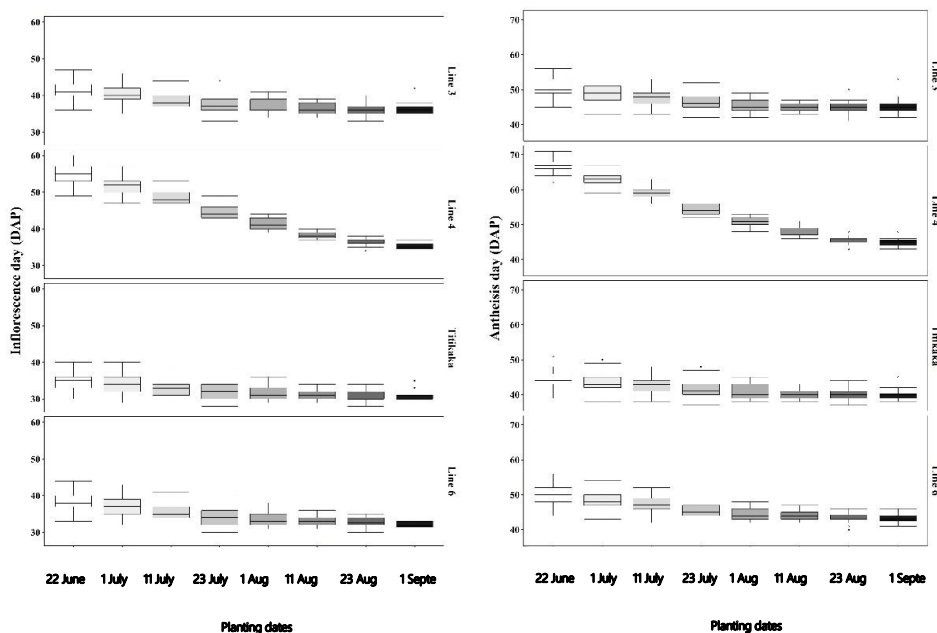


شکل ۴. نتایج خروجی مدل DSSAT برای میانگین طول‌روز (شکل سمت چپ) و تشعشع (شکل سمت راست) در طول فصل رشد شبیه‌سازی شده برای تاریخ کاشت‌های تابستانه لاین‌های مختلف کینوا در دوره ۳۰ ساله ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹

Fig 4. Results for 30 years (1990-2019) for DSSAT model simulated along the seasonal daylength period (left figure) and radiation (right figure) under different planting dates of the quinoa lines.

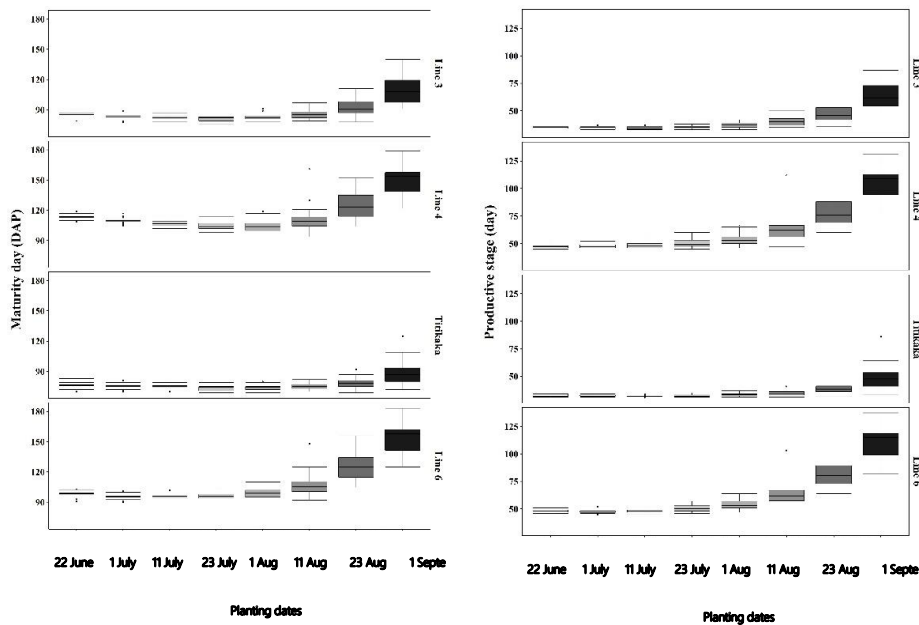


شکل ۵. نتایج خروجی مدل DSSAT برای میانگین دمای حداکثر (شکل سمت چپ) و دمای حداقل (شکل سمت راست) در طول فصل رشد شبیه‌سازی شده برای تاریخ کاشت‌های تابستانه لاین‌های مختلف کینوا در دوره ۳۰ ساله ۱۹۹۰-۲۰۱۹  
**Fig 5. Results for 30 years (1990-2019) for DSSAT model for seasonal maximum temperature (left figure) and minimum temperature (right figure) under different planting dates of the quinoa lines**



شکل ۶. نتایج خروجی مدل DSSAT برای پیش‌بینی غنچه‌دهی (شکل سمت چپ) و گل‌دهی (شکل سمت راست) تاریخ کاشت‌های تابستانه لاین‌های مختلف کینوا در دوره ۳۰ ساله ۱۹۹۰-۲۰۱۹  
**Fig 6. Result for 30 years DSSAT model's results (1990-2019) for prediction of inflorescence (left figure) and anthesis (right figure) under different planting dates of the quinoa lines from 1990 to 2019.**





شکل ۷. نتایج خروجی مدل DSSAT برای پیش‌بینی رسیدگی فیزیولوژیک (شکل سمت چپ) و فاصله گل‌دهی تا رسیدگی فیزیولوژیک (شکل سمت راست) تاریخ کاشت‌های تابستانه لاین‌های مختلف کینوا در دوره ۳۰ ساله ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹

Fig 7. Result for 30 years DSSAT model's results (1990-2019) for prediction of physiological maturity (left figure) and productive stage (right figure) under different planting dates of the quinoa lines from 1990 to 2019.

*Chenopodium quinoa* Willd. *Food Rev Int.* 19, 87–97. DOI: 10.1081/FRI-120018870

Bunce, J. A. (2018). Thermal acclimation of the temperature dependence of the VCmax of Rubisco in quinoa. *Photosynthetica*, 56, 1171–1176. DOI: 10.1007/s11099-018-0799-3

Ceccato, D.V., Daniel Bertero, H. & Batlla, H. (2011). Environmental control of dormancy in quinoa (*Chenopodium quinoa*) seeds: two potential genetic resources for pre-harvest sprouting tolerance. *Seed Sci. Res.* 21, 133-141. DOI:10.1017/S096025851100002X

Eghbali, Sh., Jahan, M., Salehi, M., & Nassiri, M. M. (2023). Determination of Cardinal Temperatures and Photoperiodic Response of Quinoa *Chenopodium quinoa* L. Lines using Linear and Nonlinear Models. *Journal of Agroecology*, 15, 191-208. [In Persian]. DOI: 10.22067/agry.2021.69386.1036

Hinojosa, L., González, J., Barrios-Masias, F., Fuentes, F., & Murphy, K. (2018). Quinoa Abiotic Stress Responses: A Review. *Plants*, 7, 106. DOI:10.3390/plants7040106

Hinojosa, L., Matanguihan, J. B., & Murphy, K. M. (2019). Effect of high temperature on pollen mor-

## نتیجه‌گیری

واسنجی و ارزیابی مدل CROPGRO برای کینوا در نرم‌افزار DSSAT 4.7 نشان‌دهنده‌ی شبیه‌سازی خوب داده‌های روز تا غنچه‌دهی، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک می‌باشد. با کمک این مدل می‌توان واکنش فنولوژی ارقام کینوا به تاریخ کاشت در مناطق خشک را بخوبی پیش‌بینی کرد و از آن برای تعیین تاریخ کاشت مناسب کینوا کمک گرفت. این مدل کالیبره شده هم‌اکنون می‌تواند برای ارزیابی تأثیرات مختلف مدیریت زراعی و تصمیم‌گیری در نظام‌های کشت کینوا در شرایط اقلیمی جاری و آینده و همچنین جهت بررسی اثرات دما، CO<sub>2</sub>، آب، مواد مغذی و شیوه‌های مدیریت زراعی در طیف وسیعی از محیط‌های رشد کینوا مورد استفاده قرار گیرد.

## منابع

Bazile, D., Bertero, H. D., & Nieto, C. (2014). Estado del arte de la quinua en el mundo, FAO (Santiago de Chile) y CIRAD (Montpellier, Francia).

Bertero, H.D. (2003). Response of developmental processes to temperature and photoperiod in Quinoa

- Soltani, A., & Hoogenboom, G. (2007). Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. *Field Crops Research*, 103, 198-207. DOI: 10.1175/1520-0477
- Soltani, A., Robertson, M.J., Mohammad-Nejad, Y., & Rahemi-Karizaki, A. (2006). Modeling chickpea growth and development: leaf production and senescence. *Field Crops Research*. 99, 14-23. DOI: 10.1093/jxb/eri089
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63, 1309-1313.
- Yin, X., Struik, P. C. J., Tang, Ch. Qi., & Liu, T. (2005). Model analysis of flowering phenology in recombinant inbred lines of barley. *Journal of Experimental Botany*, 56, 959-965.
- Zacharias, M., Kumar, S.N., Singh, S.D., Swaroopa, D.N., & Aggarwal, P.K. (2015). Evaluation of a regional climate model for impact assessment of climate change on crop productivity in the tropics. *Current Science*, 108, 1119-1126.
- phology, plant growth and seed yield in quinoa *Chenopodium quinoa* Willd. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 205, 33-45. DOI: 10.1111/jac.12302
- Hirich, A., Choukr -Allah, R., & Jacobsen, S.E. (2014). Quinoa in Morocco -Effect of sowing dates on development and yield. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 23, 1-7.
- Hoogenboom, G., Jones, J.W., Porter, C.H., Wilkens, P.W., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., & Tsuji, G.Y. (2004). DSSAT 4., Overview, vol. 1. ICASA, University of Hawaii, Honolulu, USA. DOI: 10.11648/j.ijis.20211006.13
- Hoogenboom, G., Porter, C.H., Shelia, V., Boote, K.J., Singh, U., White, J.W., Hunt, L.A., Ogoshi, R., Lizaso, J.I., Koo, J., Asseng, S., Singels, A., L.P., M., & Jones, J.W. (2017). Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7 (<https://DSSAT.net>). DOI:10.1016/j.gfs.2012.11.009
- Matthews, R.B., Rivington, M., Muhammed, S., Newton, A.C., & Hallett, P.D. (2013). Adapting crops and cropping systems to future climates to ensure food security: the role of crop modelling. *Global Food Security* 2, 24-28. DOI: 10.22067/jag.v11i2.31912
- Murphy, K., & Matanguihan, J. (2015). quinoa improvement and sustainable production (I. Jhon Wiley and Sons, Ed.). New Jersey. DOI: 10.3390/agronomy9120832
- Nassiri, M. M., Koocheki, A. R., Fallahpour, F., & Amiri, M. B. (2019). Optimization of Nitrogen Fertilizer and Irrigation in Wheat *Triticum aestivum* L. Cultivation by Central Composite Design. *Journal of Agroecology*, 11, 515-530. [In Persian].
- Präger, A., Boote, K. J., Munz, S., & Hönninger, S. G. (2019). Simulating growth and development processes of Quinoa *Chenopodium quinoa* Willd.: adaptation and evaluation of the CSM-CROPGRO model. *Agronomy*, 9, 832. DOI: 10.1016/j.fcr.2007.06.003
- Salehi, M., & Dehghani, F. (2017). Quinoa, suitable semi cereal for salt water resources. *Report of Minisrty of Agricultural Jihad*. [In Persian]. DOI: 10.1016/j.fcr.2006.02.005